

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭКОНОМИКИ И УПРАВЛЕНИЯ
КАФЕДРА СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Т.Я.ДУБНИЩЕВА

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Учебно-методический комплекс
для всех специальностей

НОВОСИБИРСК
2008

УДК 500
ББК 20я7
Д79

Издается в соответствии с планом учебно-методической работы НГУЭУ

Д79 **Дубнищева Т.Я.**
Концепции современного естествознания: Учебно-методический комплекс. — Новосибирск:
НГУЭУ, 2008. — 272 с.

ББК 20я7

© НГУЭУ, 2008
© Дубнищева Т.Я., 2008

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

Раздел 1. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЙ

1.1. ВЫПИСКА ИЗ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА

Курс «Концепции современного естествознания» (КСЕ) введен в стандарт обучения студентов (бакалавров и специалистов) более 45 специальностей гуманитарных направлений по блоку естественно-научных и математических дисциплин. Среди них: 520400 — «Философия», 521100 — «История», 520100 — «Культурология», 520200 — «Геология», 520300 — «Филология», 520500 — «Лингвистика», 521000 — «Журналистика», 521300 — «Политология», 521400 — «Психология», 521800 — «Социальная работа», 522400 — «Религиоведение», 522500 — «Искусство» (по видам), 522700 — «Конфликтология», 522000 — «Коммерция», 522600 — «Востоковедение, африканистика», 020400 — «Психология», 522800 — «Международные отношения», 522200 — «Статистика», 062100 — «Управление персоналом», 021100 — «Юриспруденция», 350400 — «Связи с общественностью», 230500 — «Социально-культурный сервис и туризм», 351300 — «Коммерция (торговое дело)», 351400 — «Прикладная информатика (по областям)», 351000 — «Антикризисное управление», 521600 — «Экономика», 351200 — «Налоги и налогообложение», 521500 — «Менеджмент», 061100 — «Менеджмент организации», 060400 — «Финансы и кредит», 060700 — «Статистика», 060800 — «Экономика и управление на предприятии (по отраслям)», 060200 — «Экономика труда», 060500 — «Бухгалтерский учет, анализ и аудит», 350200 — «Международные отношения», 350300 — «Регионоведение» и др.

Введение этого курса отразило признание революционизирующей роли естествознания, составившей один из самых значительных феноменов XX в., и вызвано превращением науки в производительную силу общества и стремительным развитием технологий, когда деятельность человека становится явлением планетарного масштаба, и ставится вопрос об определенном, отвечающем новым реалиям, ограничении потребностей. Отсюда и цель — ознакомление студентов с важнейшим компонентом современной культуры — естествознанием, формирование целостного взгляда на окружающий мир на основе рационального научного мышления. Основное содержание дисциплины рассматривается «как продукт междисциплинарного синтеза в рамках комплексного историко-философского, культурологического и эволюционно-синергетического подходов к современному естествознанию, в основе которого лежит физика». Это зафиксировано в решениях семинара экспертов ЮНЕСКО «Высшее образование в XXI веке» (1998 г.). Поэтому курс КСЕ затрагивает основы, современные проблемы и результаты физики, химии, биологии, геологии, астрономии, кибернетики, синергетики и др.

Основные дидактические единицы, согласно стандарту по дисциплине ЕН.Ф.02 «Концепции современного естествознания», следующие: «естественно-научная и гуманитарная культуры; научный метод; история естествознания;

панорама современного естествознания; корпускулярная и континуальная концепции описания природы; порядок и беспорядок, хаос; структурные уровни организации материи; пространство и время; микро-, макро- и мегамиры; принципы относительности, симметрии и законы сохранения; взаимодействия, близко- и дальное действие; понятие «состояние»; принцип суперпозиции; принципы неопределенности и дополненности; динамические и статистические закономерности; принцип возрастания энтропии; химические системы, энергетика процессов, реакционная способность веществ; внутреннее строение и геологическая история Земли; современные концепции развития геосферных оболочек; литосфера как абиологическая основа жизни; ресурсная геодинамическая, геофизико-химическая и географическая оболочка Земли; особенности биологического уровня организации материи; принцип эволюции; воспроизводство и развитие живых систем; многообразие как основа устойчивости развития биосферы; генетика и эволюция; человек: физиология, здоровье, творчество, работоспособность; биоэтика; экология и здоровье человека; биосфера и космические циклы; ноосфера; необратимость времени; самоорганизация в живой и неживой природе; принципы универсального эволюционизма; путь к единой культуре».

В построении курса использован системный подход. Сведено к минимуму количество формул, часть необходимых сведений сообщается посредством аналогий, образов, использована и история науки. Настоящая рабочая программа является авторской разработкой, основанной на принятой МОПО РФ в 1995 г. программе автора, которая в течение прошедших лет использовалась в преподавании курса, совершенствовалась для студентов разных специальностей НГАЭиУ. Она была опубликована как в виде отдельного издания, так и в виде статьи в журнале «Вестник Российского университета дружбы народов» серия ФЕНО (фундаментальное естественно-научное образование) в 1998 г. Постепенно уточняясь, она соответствует авторскому учебнику и учебным пособиям, рекомендованным Министерством образования для студентов вузов Российской Федерации, которые используются в качестве базовых и по новому стандарту высшего образования. Учебник автора (пятое, переработанное издание) признан лауреатом по данной учебной дисциплине конкурса учебников и учебных пособий, проводимым Министерством образования Российской Федерации в 2001 г.

Учебно-методический комплекс Т.Я.Дубнищевой по курсу «Концепции современного естествознания», включающий помимо программы, учебника и учебных пособий компьютерный мультимедийный учебник, был удостоен Большой золотой медали Сибирской ярмарки на выставке «УЧСИБ-2002».

1.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Высокий профессионализм неотделим от гуманизма и нравственности, цельного видения единства и взаимосвязанности природы и общества, Человека и Космоса. И это особенно важно в условиях, когда человеческая деятельность оказывает глобальное влияние на планету в целом. Жизнь человечества стала неделимой, единой при всей ее разнородности. Поэтому в соответствии со стандартом МО РФ курс построен не как сумма отдельных дисциплин, а именно как курс концепций современного естествознания с намеренным подчеркиванием его планетарного характера.

«Общая тенденция, — как подчеркивал Станислав Лем, — заметная повсюду, в том числе и в США, такова, что возрастающей сложности государственных, технических, наконец, глобальных проблем сопутствует явное снижение уровня компетентности правящих». И «остается только желать, чтобы когда-нибудь наступило время проверки профессиональной пригодности как экспертов-специалистов, так и политиков (проверки, одинаково тщательной для тех и других)». Эти обстоятельства меняют отношения к политической власти, к лидерам, принимающим ответственные решения. Без знания современной науки, без освоения ее языка и методов невозможно принятие ответственных решений, которые требуются для управляемого развития. Дальнейшее развитие общества должно будет происходить в условиях экологического императива, и потому человечеству предстоит смена нравственных принципов, требующая перестройки сознания и новых отношений между людьми.

Общепризнанно, что достижения науки, и в первую очередь естествознания, влияют на культурный уровень жизни людей, а в нынешнем столетии эти достижения столь значительны, что применение их стало влиять в глобальном масштабе на структуру общества. И уже нельзя рассматривать проблему обучения молодежи в отрыве от тех социальных изменений, которые вызваны НТР. Жизнь показывает, что современное общество пока не подготовлено к тому, чтобы с пользой употребить материальный достаток и досуг, которые обеспечены НТР. Очевидны и многочисленные признаки дегенерации общества в наиболее развитых странах. Но дальнейший рост материального благосостояния и связанное с этим увеличение досуга нельзя остановить, и поэтому нужно дать людям, и прежде всего молодежи, смысл существования, привить интерес к решению социальных проблем, воспитывать в них духовные качества, необходимые для восприятия науки и искусства. Прививать учащейся молодежи любовь и уважение к науке, желание и умение объективно оценивать ее достижения особенно важно сейчас, когда средства массовой информации обеспечивают нас сентенциями на любой вкус. Религиозные, оккультные и различные паранормальные верования и предрассудки демонстрируют непросвещенный консерватизм, их адепты апеллируют к человеческим слабостям, невежеству и страху перед лицом социальных потрясений и неизвестностью, чтобы модернизировать обилие своих лженаучных доктрин и практики. Поскольку воспитание и развитие духовных качеств чело-

века определяется в значительной мере образованием, то это и есть основная задача, выдвинутая НТР перед школой и высшими учебными заведениями.

Уровень науки в стране определяется степенью развития научной общественности, подобно тому, как уровень искусства определяется вкусами и культурой общества. Для этого нужно планомерное воспитание, а проблема воспитания молодого поколения заключает в себе секрет социальной стабильности и устойчивого развития человечества. Только общественность, умеющая верно оценить достижения и отличить их от ложного успеха, может помочь обществу развиваться по правильному пути. Образование, культура, наука — это краеугольные камни будущего развития. По отношению государства к этим трем сферам легко представить будущее государства. Говоря о концепции устойчивого развития, академик В.А.Коптюг отмечал необходимость осознания ее реализации большей частью людей на планете, подавляющей частью общества каждой страны. «Если мы хотим, чтобы представители общества действительно принадлежали к роду *homo sapiens*, то система образования на всех этапах должна содействовать развитию самостоятельного мышления, критического анализа и формированию духовного стержня». Отсюда и большое значение курса «Концепции современного естествознания» в воспитании молодого поколения граждан страны.

Эти обстоятельства учтены в формулировке задач курса для студентов по социально-экономическим специальностям: целесообразно углубление системных представлений о естествознании с трактовкой его как основы экологической и синергетической грамотности.

Итак, цели и задачи курса таковы:

1. Формирование ясного представления о естественно-научной картине мира как основе целостности и многообразия представлений о природе и убежденности в том, что наука — это особый вид социальной деятельности, область профессионального умственного труда, органический компонент человеческой культуры.
2. Изучение и понимание основ фундаментальных законов природы, составляющих стержень наук, составляющих современное естествознание.
3. Понимание возможностей научного метода, критериев научности основных законов в дополнение к образному и художественному методам познания. Понимание роли математики как языка науки и зеркала природы, а также возможностей моделирования явлений природы.
4. Понимание необходимости преемственности в изучении природных процессов и изменения методов исследования и языка описания по мере усложнения природных систем вплоть до биосферы, в которой существует человеческая цивилизация.
5. Формирование представлений об универсальности эволюции и принципах синергетики в приложениях к неживой и живой природе, человеку и обществу и умения самостоятельно и критически анализировать информацию, представляемую средствами телекоммуникации.

6. Формирование убежденности в необходимости пре-
вращения концепции устойчивого развития в систему
духовных и профессиональных установок человечества.

7. Осознание глобальных проблем в культуре, эне-
ргетике, экономике и экологии в их связи с развитием
естествознания как научной базы техники и технологий.

8. Умение хорошо ориентироваться в событиях и логике
развития отечественной и мировой науки и техники.

9. Понимание роли фундаментального и гуманитарного
образования как способа воспроизводства единой культуры
и формирования гармоничной личности будущего.

10. Формирование гражданской ответственности за
состояние природы и общества и желания активно участ-
вовать в практической деятельности по обеспечению
условий выживания людей в отдельности и человеческой
цивилизации в целом.

1.3. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ УСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Бакалавр и специалист должны в соответствии с целями
и задачами курса КСЕ освоить основные дидактические
единицы образовательного стандарта, перечисленные
выше.

В соответствии с Образовательным стандартом МО РФ
для многих направлений и специальностей планируется
распределение учебной нагрузки (для ряда специаль-
ностей — число отведенных часов больше).

1.4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ

Формы контроля на дневной и заочной формах обу-
чения, естественно, отличаются.

На *заочной* форме обучения контроль осуществляется
через выполнение контрольной работы, содержащей воп-
росы по основным темам курса. Контрольная работа пред-
ставляется на проверку в письменной форме, занимает
около 12–15 страниц. Ответы должны соответствовать
заданному вопросу и быть четко сформулированы.

На *дневной* форме обучения по каждой теме преду-
сматривается, помимо занятий в аудиториях, и самостоя-
тельная работа по составленным планам и заданиям. Сог-
ласно положению МО РФ на нее отводится примерно
половина времени, затраченного в аудиториях.

Первые две темы изучаются на лекциях и семинарах, в
качестве промежуточного контроля усвоения знаний
проводятся тестирование, коллоквиум или контрольная
работа. Усвоение этих тем предполагает знакомство с
основными концепциями, моделями, понятиями и законами,
сложившимися в классической науке. Результаты усвоения
отмечаются в качестве оценки на контрольной неделе в
деканате.

Третья тема изучается на лекциях и семинарах согласно
графику учебных часов. В плане семинаров предусмотрено
использование обучающих компьютерных программ по
курсу. Запланировано и самостоятельное усвоение мате-
риала, которое частично контролируется через написание
студентом рефератов по выбранной теме — индивидуаль-
ные занятия. Выполняя задание, студенты пользуются
индивидуальными консультациями преподавателя при
работе с литературой и изучении наиболее сложных воп-
росов. По мере усвоения студентом материала препо-
даватель уточняет тему его самостоятельной реферативной
работы. Студент готовит текст реферата и обсуждает его с
преподавателем. Защита рефератов и их обсуждение
происходит на семинарах по близким темам, чтобы сту-
денты (помимо выступающего с сообщением студента)
были подготовлены к ведению дискуссии по теме. Предва-
рительно преподаватель выделяет наиболее острые воп-
росы по теме и готовит докладчиков и их оппонентов.

Последние две темы изучаются в конце семестра*, по
ним предполагается выполнение лабораторных работ на
компьютере, а после этого — зачет (или экзамен).

Раздел 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование тем	Количество часов			
	Лекции	Семинары	Индиви- дуальная работа	Самостоя- тельная работа
Тема 1. Методология, составные части и этапы развития естествознания. Понятия пространства, времени и материи	6	4	—	4
Тема 2. Модели классического естествознания и закономерности природы	8	4	—	16
Тема 3. Вероятностный мир, описание процессов	8	4	10	10
Тема 4. Законы эволюции. Открытые системы и самоорганизация	10	4	4	8
Тема 5. Естествознание и развитие цивилизации	4	2	4	8

* Или учебного года (для специальностей, предусматривающих изучение курса в двух семестрах).

При *заочной* форме обучения общее число учебных часов — 108 (для большинства специальностей), из них — 8 часов лекций, остальное — самостоятельная работа. Домашнее задание — контрольная работа, итоговый контроль — зачет или экзамен.

При *дневной* форме обучения общее число учебных часов — 108 (для большинства специальностей), в том числе: лекций — 36, семинарских занятий — 18, индивидуальных занятий — 18, самостоятельных занятий — 36 часов. Домашнее задание — реферат, итоговый контроль — зачет или экзамен.

2.2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ

Тема 1. Методология, составные части и этапы развития естествознания. Понятия пространства, времени и материи (главы 1–3)

Лекции

1. Естествознание — часть культуры. Естественно-научная и гуманитарная культуры. Формирование научного метода. Критерии истинности гипотез и представлений. Соотношения теории и эксперимента. Составные части естествознания в своем развитии. Взаимоотношения науки, философии и религии. Значение естественно-научного мышления для гуманитарного образования. Цели и задачи курса КСЕ.

2. Возникновение науки и становление научных программ. Понятия «научная картина мира» и «научная программа». История естествознания. Математическая гармония природы. Панорама современного естествознания и тенденции развития. Научные революции и их особенности в различных общественно-экономических системах. Понятия научного прогресса и научно-технической революции. Особенности НТР в различных странах и проблемы. Оценка научных достижений.

3. Развитие концепций движения, пространства и времени. Структура и свойства пространства, геометрия Евклида как общее соглашение. Масштабы расстояний во Вселенной и методы их оценки. Пространство и время в современной науке. Симметрия пространства и времени. Временные масштабы во Вселенной. Методы измерения времени. Структурность и системность организации материи. Методы получения знаний в микро-, макро- и мегамире.

Семинары

1. Понятия «научная программа» и «естественно-научная картина мира». Научный метод, критерии доказательности и научности, наука о природе в контексте культуры. Математическая гармония природы и эффективность ее использования в науке.

Способы познания и освоения окружающего мира. Научное знание, цели и задачи науки. Как формировалось представление о критерии истинности знания? Наука как часть единой культуры. Значение науки в материальной, социальной и духовной культуре.

Естественно-научная картина мира и ее компоненты. Физическая картина мира и ее эволюция. В каких видах существует материя? Как доказать реальное, объективное существование материи? Что такое «дифференциация и интеграция научного знания»?

Критерии и нормы научности. Границы научного метода. Эффективность использования математики в естествознании. Роль моделирования в естествознании. Компьютерная революция.

1. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.15–29.
2. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.8–15.
3. Дубнищева Т.Я., Пигаев А.Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.4–15.
4. Лавриненко В.Н., Ратников В.П. и др. Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — Гл.1.
5. Степин В.С. Философская антропология и философия науки. — М., 1986.
6. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. — М.: Наука, 1987.
7. Кругляков Э.П. «Ученые» с большой дороги. — М.: Наука, 2001. — С.18–68, 113–145.
8. Бройль Луи де. Революция в физике. — М.: Мир, 1963.
9. Кун Т. Структура научных революций. — М.: Прогресс, 1977.

2. Масштабы окружающего мира во времени и в пространстве. Пространственно-временные масштабы и физическое моделирование. Проблемы измерений. Точность измерения, системы единиц, физические величины. Методы получения знаний в микро-, макро- и мегамире. Моделирование явлений и процессов.

Единицы измерения пространства, роль метрической системы. Какие характеристики, кроме доступности и постоянства, эталона физической величины должны быть учтены? Проведите сопоставление масштабов во Вселенной. В чем проявляется однородность и изотропность пространства?

Что означает «евклидовость» пространства? Как измеряются расстояния в микро-, макро- и мегамире?

Понятия «пространство» и «размерность пространства» в развитии.

Единицы измерения времени. История часов, календаря и хронологии в разных странах. Масштабы времен во Вселенной. Понятие «время» в естествознании.

Системы единиц. Точность измерений и погрешность. Какими измерительными приборами в быту Вы пользуетесь? Роль моделирования. Интерполяция и экстраполяция. Модели классической механики.

1. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.15–29, 90–92.
2. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.22–25.
3. Дубнищева Т.Я., Пигаев А.Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.16–21.
4. Пуанкаре А. О науке. — М.: Наука, 1993.

5. Горелов А.А. Концепции современного естествознания. — М.: ВЛАДОС, 1999. — С.38–52.
6. Елаганинова О.В. Роль социальной информации и математических методов в выработке управленческих решений // Научное управление обществом. — М., 1969. — Вып.3.
7. Потеев М.И. Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.88–99.

Самостоятельная работа

1. Взаимоотношения науки и власти. Международное признание достижений ученого и международные премии. Национальное и интернациональное в развитии мировой науки. Какова роль естественных наук в формировании политических взглядов (см. гл.4, 5 [4], гл.12 из [6])? Охарактеризуйте взаимоотношения естествознания с властными структурами на разных этапах развития наук и общества (см. [1; 3; 5]).

1. Венгеров А.Б. Синергетика и политика // Общественные науки и современность. — 1993. — №4. — С.55–69.
2. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.308–312.
3. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание: Пер. с англ. — М.: Иностранная литература, 1961. — 152 с.
4. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. — М.: Наука, 1991. — Гл.4, 5.
5. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. — М.: Молодая гвардия, 1990. — 352 с.
6. Хлеботорос Р.Г., Фет А.И. Природа и общество. Модели катастроф. — Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. — 344 с. — Гл.12.
7. Елаганинова О.В. Роль социальной информации и математических методов в выработке управленческих решений // Научное управление обществом. — М., 1969. — Вып.3.
8. Идлис Г.М. Революции в астрономии, физике и космологии. — М.: Наука, 1985. — 232 с.

2. Дайте понятие научных революций и конкретные примеры научных революций. Чем отличается от натурфилософии наука Нового Времени? Научные и научно-технические революции. Достижения современной НТР в связи с необходимостью контролировать развитие цивилизации в поисках пути устойчивого развития и переходом в информационную эпоху.

1. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание: Пер. с англ. — М.: Иностранная литература, 1961. — 152 с.
2. Идлис Г.М. Революции в астрономии, физике и космологии. — М.: Наука, 1985. — 232 с.
3. Хлеботорос Р.Г., Фет А.И. Природа и общество. Модели катастроф. — Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. — 344 с.
4. Лотман Ю.М. Культура и взрыв. — М., 1992.
5. Малинецкий Г.Г. Нелинейная динамика — ключ к теоретической истории? // Общественные науки и современность. — 1996. — №5.
6. Махлун Ф. Производство и распространение знаний в США. — М., 1966.

7. Елаганинова О.В. Роль социальной информации и математических методов в выработке управленческих решений // Научное управление обществом. — М., 1969. — Вып. 3.
8. Мелик-Гайказян И.В. Информационные процессы и реальность. — М.: Наука, 1997. — 190 с.
9. Бройль Луи де. Революция в физике. — М.: Мир, 1963.
10. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.308–312.

Тема 2. Модели классического естествознания и закономерности природы (главы 4–9)

Лекции

1. Фундаментальные характеристики материи. Масса — мера инертности и гравитации. Принцип эквивалентности. Энергия — мера движения и взаимодействия. Механика тел макромира. Основные модели классической механики. Основы механики, великие законы сохранения и свойства симметрии пространства и времени.

2. Дискретность и непрерывность как способы описания. Колебания и волны. Концепция атомизма в своем развитии. Понятие о физическом поле. Универсальность физических законов. Вещество как система частиц. Полевая концепция описания свойств материи. Концепция квазичастиц. Фундаментальные взаимодействия.

3. Понятие «состояние». Начала термодинамики как феноменологические законы природы и их приложения в биологии, химии, физиологии, технике. Понятие энтропии. Связь энтропии с микросостоянием. Необратимость времени.

4. Свет как электромагнитная волна. Дисперсия света и спектры. Спектр электромагнитного излучения. Спектроскопия и спектральный анализ. Понятие о когерентной и некогерентной суперпозиции волн. Голография. Взаимодействие излучения с веществом.

Семинары

1. Поступательное и вращательное движение тел. Понятие момента силы и момента импульса. Законы сохранения импульса и момента импульса. Законы Кеплера. Закон всемирного тяготения и астрономическая Вселенная.

Сравнение законов поступательного и вращательного движения на примерах, связанных с оптимизацией спортивных занятий.

Законы движения планет и спутников планет. Закон всемирного тяготения. Что такое орбита планеты? Какова форма орбит? Могут ли планеты столкнуться при своем движении вокруг Солнца? На каком среднем расстоянии от Солнца находится планета Меркурий, если ее период обращения равен 58,65 земных суток?

Проявление законов классической механики в масштабах нашей планеты. Силы Кориолиса. Закон Бэра. Как изменяются кинетическая, полная и потенциальная энергии планеты при ее движении вокруг Солнца? Как определяется ускорение свободного падения на поверхности планет? В какое время года линейная скорость движения Земли по орбите наибольшая и почему?

Моменты сил и момент импульса. Оценки величин моментов импульса для электрона в атоме, велосипедного

колеса и двойных звезд. Почему конечная скорость последней ступени многоступенчатой ракеты намного превышает конечную скорость одноступенчатой ракеты того же веса и при том же запасе горючего? Как фигуристка на льду может увеличивать скорость своего вращения?

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.108–120.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.91–95.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.22–26.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.27–31, 67–71, 83–87, 98–107.
5. *Горелик Г.Е.* О сохранении законов сохранения // Природа. — 1992. — №5.

2. Понятие о волнах и колебаниях. Основные модели. Модель гармонического осциллятора. Волновое описание как единое описание процессов в естествознании и вне него. Эффект Доплера и его значение.

Колебания и волны. Простейшие модели. Каково назначение маятника в стенных часах? Волновые процессы в природе. Гармонический осциллятор. Какие типы волн используются при описании волнового движения? Приведите примеры поперечных, продольных и стоячих волн в упругой среде. Что такое «когерентность» и «резонанс»?

Звуковые волны. Скорость звука. Какова частота звуковой волны с длиной волны 2 см в морской воде и можно ли ее услышать (скорость звука в морской воде — 1530 м/с)? Определите наименьшую частоту стоячих звуковых волн, которые можно создать между двумя стенками, расположенными на расстоянии 7,5 м.

Световые волны. Скорость света. Поперечные волны. Явления поляризации света и дисперсии. Спектр электромагнитного излучения. По какому свойству инфракрасного и рентгеновского излучений можно обнаружить их существование? Как установили, что они — тоже электромагнитная волна?

В чем состоит эффект Доплера и какова его роль в исследовании звезд, Вселенной? К нам или от нас движется звезда, если длина волны, соответствующая линии водорода, в спектре этой звезды меньше, чем в спектре, полученном в лаборатории?

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.145–167, 287–300.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.25–29.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.62–70.
4. *Шугрин С.М.* Космическая организованность биосферы и ноосферы. — Новосибирск: Наука, 1999. — 485 с.
5. *Малинецкий Г.Г.* Нелинейная динамика — ключ к теоретической истории? // Общественные науки и современность. — 1996. — №5.

6. *Идлис Г.М.* Революции в астрономии, физике и космологии. — М.: Наука, 1985. — 232 с.
7. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.66–78.
8. *Гумилев Л.Н.* Ритмы Евразии: эпохи и цивилизации. — М.: Экспресс, 1993. — 576 с.
9. *Дубровский С.* Прогнозирование катастроф на примере циклов Кондратьева // Общественные науки и современность. — 1993. — №3. — С.82–91.

3. Приложения начал термодинамики в биологии, химии, физиологии, технике. Понятие энтропии. Энтропия и информация.

Начала термодинамики. Дайте понятие внутренней энергии. Какие виды внутренней энергии вы знаете? Как измеряется внутренняя энергия? В чем сущность первого начала термодинамики? Обсуждение оптимизации работы тепловых машин.

Начала термодинамики как основа работы живых организмов.

Энтропийный подход к превращению энергии в звездах и Вселенной.

Поясните понятия энтропии и термодинамической вероятности. В чем состоит принцип Больцмана, каково значение этого принципа в современном естествознании? Связь энтропии с информацией.

1. *Волькенштейн М.В.* Энтропия и информация. — М.: Наука, 1980. — 192 с.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.206–209, 348–351, 639–655.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.92–99.
4. *Воробьев Г.Г.* Информационная культура управленческого труда. — М., 1979.
5. *Гейзенберг В.* Философия и физика. Часть и целое. — М.: Мир, 1975.
6. *Новиков И.Д.* Куда течет река времени? — М.: Молодая гвардия, 1990.
7. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994. — 236 с.

Самостоятельная работа

1. Физические величины в описании движения тел. Механическая картина мира Галилея–Ньютона и законы движения. Динамика и статика. Законы сохранения классической механики.

Описание движения Аристотелем, Галилеем, Декартом, Ньютоном. Переход от наглядности к абстракции. Формирование научного метода. Развитие математического анализа и аналитической механики.

Описание движений объемных тел, реальные движения и модели.

Законы механики Галилея–Ньютона и законы сохранения импульса и энергии классической механики.

Обсуждение понятия потенциальной энергии разных тел, примеры. Связь абстрактного понятия энергии с наглядным понятием силы.

Наглядность описания и общность законов классической механики для других областей естествознания. Связь законов сохранения со свойствами симметрии пространства и времени.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.74–108.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.25–29.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.22–26.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.27–31, 67–71, 83–87, 98–107.
5. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.32–42.

2. Астрономическая Вселенная и закон всемирного тяготения.

Как определяют расстояния до звезд? Что такое «параллакс» и «звездная величина»? Период обращения Плутона равен 250 земных лет. Каково его расстояние от Солнца и какую часть своего «года» он прошел после того, как его открыли?

Общие представления о строении и составе солнечной системы. Что называется астрономической единицей длины и чему она равна? Перечислите по порядку расположения от Солнца планеты Солнечной системы. Какие из них видны невооруженным глазом? Определите период обращения Венеры в земных годах, если ее расстояние от Солнца равно 108,2 млн км.

История закона всемирного тяготения и доказательства справедливости его на Земле, в Солнечной системе и за ее пределами. Обсуждение приливных сил для Земли. Почему Луна вызывает более сильные приливы, хотя притяжение ею Земли меньше в 175 раз, чем Солнцем?

Что такое близкое действие и действие на расстоянии? Системы двух и трех тел, взаимодействующих посредством сил тяготения. Проблемы защиты Земли от метеоритной опасности.

Изменение веса на Земле при изменении широты местности или высоты над поверхностью. Вес тела на других небесных телах. Оцените изменение своего веса при переезде с экватора на полюс.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.121–144.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.31.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.28–35.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.120–124, 142–147, 160–161.
5. *Новиков И.Д.* Куда течет река времени? — М.: Молодая гвардия, 1990.
6. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — М.; СПб.: Питер, 1999. — С.32–41.

3. Фундаментальные характеристики материи. Масса — мера инертности и гравитации. Принцип эквивалентности. Энергия — мера движения и взаимодействия.

Масса инертная и гравитационная. Как могло бы сказаться их отличие по величине? Как была измерена масса Земли?

Значение понятия массы в классической механике и общей теории относительности, в современной картине мира. Принцип эквивалентности. Масса небесных тел. Определите массу Солнца, если известно, что Земля движется вокруг него со скоростью 30 км/с на среднем расстоянии 150 млн км.

Масса и энергия. Формула Эйнштейна. Энергетические проблемы науки и современного мира. Сравнение различных источников энергии.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.80–84, 125–130, 466–472.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.27–31.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.22–45.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.83–87.
5. *Гейзенберг В.* Философия и физика. Часть и целое. — М.: Мир, 1975.
6. *Круглякова Э.П.* «Ученые» с большой дороги. — М.: Наука, 2001. — С.18–68, 113–145.
7. *Дэвис П.* Суперсила: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 272 с.

4. Вещество как система частиц. Электрон, атом, молекула.

Атомизм Демокрита и Эпикура. Отношение к идее атомизма в Европе в период зарождения науки Нового времени. Почему католическая церковь считала атомизм ересью? Привести пример физического явления, подтверждающего движение молекул.

Атомизм Бойля, Ломоносова, Бернулли. В чем он выражался и каково было отношение к этим взглядам современников? Какие газы могут считаться идеальными? Какие эмпирические законы характеризуют идеальный газ? Дайте понятие о параметрах идеального газа и изопроцессах.

Развитие идей атомизма в химии. Как развивались представления о составе веществ? Какие основные законы определяют состав веществ? Каково значение закона Авогадро? Сколько молекул содержится в 1 м³ воды? Какова масса молекул воды? Найти размер молекул воды, считая их шарообразными ($\rho = 10^3$ кг/м³; $V = 1$ м³; $\mu = 18$ кг/кмоль; $N = 6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹, $n = ?$).

Дайте определения атому и молекуле. Какие виды связи объединяют атомы в молекулы? Атомизм и законы электролиза. Почему сопротивление электролита уменьшается при повышении его температуры?

Открытие электрона. Какие элементарные частицы стабильны? Реальность микрочастиц.

Строение вещества в свете современных представлений. Почему газы при нормальных условиях являются изоляторами? Какие факторы способны это изменить?

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.186–189, 238–249.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.32–35.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигаев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.52–61.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.150–165, 95–97.
5. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.62–68.
6. *Дэвис П.* Суперсила: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 272 с.
7. *Буравихин В.А., Егоров В.А., Идлис Г.М.* Биография электрона и его родословная. — М.: Агар, 1997.
8. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.15–22.

5. Теплота и температура, их измерение. Начала термодинамики как феноменологические законы природы. Природа тепловых явлений и свойства макросистем.

Сравнение температурных шкал. Температура и теплота. Какая температура имеет одинаковое значение по шкалам Цельсия и Фаренгейта? В каких единицах измеряются энергия, работа, мощность? Как эти величины связаны между собой и что они характеризуют?

Теплоемкость, теплота. Проблемы измерения. В чем несостоятельность вещественной теории теплоты? Молекулярная теория теплоты. Как она способствовала познанию строения вещества? Как определяют температуру смеси? Каков смысл абсолютного нуля температур?

Механический эквивалент теплоты. Значение его открытия. Начала термодинамики. Приведите значения к.п.д. для тепловых станций. На сколько градусов повысится температура воды при падении с плотины Саяно-Шушенской ГЭС (высота 222 м), если считать, что 30% потенциальной энергии воды расходуется на нагревание? Суть спора о «тепловой смерти Вселенной»?

Питание, работа и оптимизация жизнедеятельности. Сколько времени нужно выполнять физические упражнения (типа зарядки мощностью в 500 Вт), чтобы уменьшить свой вес на 450 г (на расщепление 1 г жира расходуется около 40 кДж, а 1 г углеводов — 20 кДж)?

Промышленная революция и развитие теории теплоты. Тепловые циклы работы машин. Цикл Карно. Обратимые и необратимые процессы. Проблемы оптимизации работы тепловых машин. Понятие энтропии.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.169–183.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.34–38.
3. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.186–199.
4. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.119–126.

6. Основные положения молекулярно-кинетических представлений. Понятие «состояние» в естествознании.

Распределение энергии внутри веществ. Понятие внутренней энергии. Уравнения состояния. Идеальные газы. Закрытый сосуд наполнен водой при температуре 27°С. Каким станет давление внутри сосуда, если внезапно исчезнет взаимодействие между молекулами воды?

Каковы особенности статистического описания макросистем? Как Вы понимаете макроскопические характеристики (температуру, давление) с микроскопической точки зрения? Какая величина является мерой средней кинетической энергии молекул?

Сколько молекул воздуха содержится в комнате объемом $(4,3 \cdot 5 \cdot 2,8) = 60 \text{ м}^3$ при нормальных условиях? (Молярная масса воздуха $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, плотность $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$.)

Закон сохранения и превращения энергии в физике и за ее пределами (в химии и биологии).

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.183–215.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.38–41.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигаев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.46–51.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: ИНФРА-М, 1997. — С.199–201.
5. *Гейзенберг В.* Философия и физика. Часть и целое. — М.: Мир, 1975.
6. *Новиков И.Д.* Куда течет река времени? — М.: Молодая гвардия, 1990.

7. Свет как электромагнитная волна. Спектр электромагнитного излучения. Спектроскопия и спектральный анализ. Доказательства материального единства мира. Понятие о когерентной и некогерентной суперпозиции волн. Голография.

Законы распространения света. Оптические приборы. Иллюзии. Определить длину волны фиолетового света в драгоценном камне топазе, если его абсолютный показатель преломления равен 1,63, а длина волны этого света в вакууме 400 нм.

Измерение скорости света. С какой скоростью распространяются электромагнитные волны в кедровом масле, если его абсолютный показатель преломления 1,516?

Явление поляризации и его применение. Определить показатель преломления топаза, если угол полной поляризации луча на его грань равен 50,5°. Через какой светофильтр буквы, написанные на белом фоне красными, будут казаться черными? Спектры и анализ. Какие тела дают сплошной спектр излучения и какие — линейчатый?

Когерентное излучение. Какие волны называются когерентными? Почему обычные источники света не излучают когерентные волны? Если в воде (показатель преломления воды 1,33) интерферируют когерентные волны частоты $5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, усилятся или ослабнет свет в точке, где геометрическая разность хода 1,8 мкм? Лазеры и их применение. Каковы основные свойства лазерного излучения?

Голография. Перспективы.

1. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.287–309.
2. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск, ЮКЭА, 1997. — С.25–29.
3. Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.62–70, 132–133.
4. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: ИНФРА-М, 1997. — С.236–255.
5. Потеев М.И. Концепции современного естествознания. — М.; СПб.: Питер, 1999. — С.78–88.
6. Бройль Луи де. Революция в физике. — М.: Мир, 1963.

8. Электрические и магнитные силы в природе. Представления и эксперименты Фарадея. Исследования Эпинуса и Ампера. Уравнения Максвелла. Эволюция представлений об эфире. Понятие о физическом поле. Электромагнитная картина мира.

Понятие поля в физике. Концепции близко- и дальнего действия. Электрические явления в природе. Космические лучи и полярные сияния. Зная, что Земля — электрически заряженное космическое тело радиусом 6400 км с отрицательным зарядом, создающим напряженность на поверхности -130 Н/Кл , определить заряд Земли и поверхностную плотность заряда. Какова емкость Земли?

Движение электрических зарядов. Проводники и диэлектрики. Какие электрически заряженные подвижные частицы находятся в металлических проводниках, как они расположены и как движутся в них, если проводники электрически нейтральны? Почему ионы являются центрами конденсации водяных паров? Является ли источник тока источником зарядов в цепи?

Магнитные явления. Открытие Эрстеда. Связь электрических и магнитных явлений. Электродинамика Ампера. Какова современная гипотеза происхождения магнитного поля Земли?

Открытия и изобретения Фарадея. Теория Максвелла. Можно ли переносить с помощью электромагнитного подъемного крана раскаленные стальные заготовки?

Понятие электромагнитного поля. Приложения теории. Объясните возникновение индукционного тока с точки зрения теории поля Максвелла. Электромагнитная картина мира.

1. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.268–274.
2. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. Методические рекомендации. — Новосибирск, ЮКЭА, 1997. — С.25–29.
3. Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.62–70.
4. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: ИНФРА-М, 1997. — С.182–186, 231–255.
5. Гейзенберг В. Философия и физика. Часть и целое. — М.: Мир, 1975.
6. Бройль Луи де. Революция в физике. — М.: Мир, 1963.
7. Потеев М.И. Концепции современного естествознания. — М.; СПб.: Питер, 1999. — С.42–55.

9. Полевая концепция описания свойств материи. Концепция квазичастиц. Кристаллы, квазикристаллы, жидкости, плазма.

Дискретность и непрерывность материи. Эволюция представлений. Частицы или поля? Наглядность и абстрактность в описании.

Как соединяются атомы в молекулы? Какие Вам известны виды химической связи, какова их энергетическая значимость? Какова роль энергии и энтропии в образовании молекул? Представление вещества в модели сплошной среды.

Строение вещества в разных агрегатных состояниях. Когда возникает металлическая связь? Дайте представление о теории металлов (классической и квантовой), полупроводниках, диэлектриках и изоляторах. Строение твердых тел.

Концепция квазичастиц.

1. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск, ЮКЭА, 1997. — С.276–284.
2. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.25–29.
3. Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.52–70.
4. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: ИНФРА-М, 1997. — С.182–186, 231–255.
5. Гейзенберг В. Философия и физика. Часть и целое. — М.: Мир, 1975.
6. Бройль Луи де. Революция в физике. — М.: Мир, 1963.
7. Потеев М.И. Концепции современного естествознания. — М.; СПб.: Питер, 1999. — С.55–65.

Тема 3. Вероятностный мир, описание процессов (главы 10–14)

Лекции

1. Термодинамика равновесного излучения, кризис классической теории («ультрафиолетовая катастрофа») и появление гипотезы квантов энергии. Фотоны Эйнштейна и доказательство их реальности. Корпускулярно-волновой дуализм материи.

2. Особенности и специфика микромира. Вероятностное понимание явлений микромира и квантовая механика. Особенности движения микрочастиц. Основные уравнения и их понимание. Процесс измерения в микромире, роль прибора. Принципы соответствия, дополнительности и неопределенности. Понятие о неклассической стратегии познания.

3. Статистическое понимание физических законов. Тождественность микрочастиц и разные статистики. Функции распределения макро- и микрочастиц. Понятие об энергетических уровнях и переходах. Стационарные и нестационарные состояния. Равновесные и неравновесные среды. Создание неравновесных сред. Лазеры и мазеры: усиление и генерация когерентного излучения.

4. Концепции процессов и возможности управления ими. Химические связи и превращения молекул. Основные этапы развития химических концепций. Создание учения о хими-

ческих процессах. Фазовые переходы. Возникновение самоорганизации в неравновесных системах. Понятие прямых и обратных связей.

Семинары

1. Ограниченность законов классической оптики. Проблемы теплового излучения и появление гипотезы световых квантов. Излучение и поглощение энергии атомом.

Волновые свойства света. Какие явления доказывают волновую природу света? Понятие о спектре электромагнитного излучения. При каком условии электрон, связанный с атомом, не излучает энергию?

Законы равновесного теплового излучения (Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина). Модель абсолютно черного излучения. Определение температуры и спектрального класса звезд.

Определить энергетическую светимость голубой звезды (класса O), если абсолютная температура ее атмосферы $T = 30\,000\text{ К}$ (длина волны 500 нм , $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}^4)$).

Плотность потока солнечного излучения, приходящего на Землю, равна $1,4 \cdot 10^3\text{ Вт}/\text{м}^2$. Какое световое давление производит солнечное излучение на идеально зеркальную поверхность (коэффициент отражения равен единице)?

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.378–384, 463–475.
2. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.70–76.
3. *Бабушкин А.Н.* Современные концепции естествознания. — СПб.: Лань, 2000. — С.62–66.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997. — С.283–287.

2. Корпускулярно-волновые свойства света. Корпускулярно-волновой дуализм материи. Принцип неопределенности. Вероятностное понимание явлений микромира и квантовая механика. Понятие о неклассической стратегии познания.

Что понимается под понятием «корпускулярно-волновой дуализм»? Поясните суть гипотезы Луи де Бройля. Почему мы не наблюдаем волновых свойств от объектов макромира? Определить энергию и импульс фотона, соответствующего длине волны 480 нм .

Как была экспериментально подтверждена гипотеза де Бройля и какое значение для естествознания и мировоззрения имеет использование корпускулярно-волновых свойств вещества?

Поясните понятия детерминизма и принципы неопределенности, соответствия, причинности и дополнителности. Связаны ли они между собой? Какова роль измерительного прибора в микромире? Какие следствия для науки имеет принцип соответствия?

Можно ли говорить о движении микрочастиц по определенным траекториям? Как и когда создавалась наука о движении в микромире, кто ее создавал? Какие перспективы открывает использование ее достижений?

Сформулируйте особенности стратегии познания классического и неклассического типов.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.444–452.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск, ЮКЭА, 1997. — С.43.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.70–76.
4. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: ИНФРА-М, 1997. — С.283–287.
5. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.269–311.
6. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: ВЛАДОС, 1999. — С.38–52.

Индивидуальные занятия

Работа над рефератами (темы рефератов и литература к ним — в методическом приложении).

Самостоятельные занятия

1. Концепции химии — развитие учения о составе и структуре вещества. Периодическая система химических элементов Менделеева и ее современное понимание.

Первый этап развития химических знаний — учение о составе веществ. От алхимии — к химии. Формирование понятия о химическом элементе, химическом соединении.

Законы стехиометрии (эквивалентов, постоянства состава и кратных отношений) и их значение как фундамента химии.

Первые схемы упорядочения химических элементов и их свойств. Периодическая таблица химических элементов Менделеева. Принцип Паули.

Изменения в понятии «структура» в химии. Установление связи между структурой молекулы и функциональной активностью соединения. Особенности строения атома углерода, определившие его значение для живой природы.

Распространенность химических элементов в природе. Переход от анализа к синтезу в химии. Синтез новых материалов. Успехи в развитии органического синтеза.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.2, гл.2, 5; ч.3, гл.7.
2. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.248–258.
3. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.22–31.

2. Химические реакции и энтропия. Понятие о цепных реакциях. Свободные радикалы.

Эндо- и экзотермические химические реакции. Роль энтропии.

Тепловой эффект реакции. Закон Гесса как закон сохранения и превращения энергии в химических реакциях.

Понятие о цепных реакциях. Реакции горения.

Сравнение динамического и статистического описания сложных систем. Системы вблизи и вдали от равновесия. Моделирование катастрофических процессов в реальных газах.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.3, гл.9; ч.4, гл.3.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.19.
3. *Эткинс П.* Порядок и беспорядок в природе. — М.: Мир, 1987. — С.110–125.
4. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.419–424.
5. *Литовко П.О.* Практикум по естествознанию. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. — С.277–286.

3. Элементы физической кинетики. Средние значения и флуктуации. Флуктуационное объяснение процессов переноса. Фазовые переходы на Земле и в космосе, реальные системы. Спонтанное нарушение симметрии при фазовых переходах. Примеры. Связь энтропии с микро-состоянием.

Явления переноса. Примеры. Необратимость процессов. Законы диффузии. Значение явлений диффузии и осмоса в живой природе.

Обобщение термодинамических закономерностей на неравновесные процессы.

Понятия «фаза» и «фазовые переходы». Примеры. Почему при испарении жидкости ее температура понижается? Может ли замерзнуть кипящая вода? «Перестройка» как фазовый переход.

Обобщение понятия энтропии на открытые системы и закон изменения энтропии. Связь энтропии с микро-состоянием, принцип Больцмана.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.356–375.
2. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.344–355.

4. Радиоактивность (естественная и искусственная). Реакции синтеза и деления, энергетические проблемы. Динамические и статистические закономерности. Неравновесные системы.

Что такое радиоактивность? Как было открыто явление естественной радиоактивности? Какие виды естественной радиоактивности были открыты в экспериментах Э.Резерфорда и Ф.Содди?

Каковы законы радиоактивного распада? Что такое «активность радиоактивного распада»? Через сколько времени распадется 60% радиоактивного полония, если период его полураспада 138 суток? Определите возраст древних деревянных предметов, если известно, что количество нераспавшихся атомов радиоактивного углерода составляет в них 80% от количества его в свежесрубленном дереве (период полураспада углерода 5570 лет).

Возможно ли искусственное расщепление атомов? Дайте представление об альфа- и бета-распадах. Почему ионизирующие излучения вредны и опасны для жизни человека? Что такое «радиационная экология»? Что такое изотопы и можно ли их разделить? Возможно ли превращение химических элементов? Возможны ли искусственные радиоактивные элементы, не является ли это совре-

менной алхимией? Что такое «дефект массы» и «энергия связи ядра атома»?

Характеризуйте реакции деления ядер. Как и когда была открыта реакция деления ядра? Как выполняются законы сохранения в реакциях распада ядер? Сравните по величине удельную теплоту сгорания нефти и деления урана. Какие проблемы энергетики связаны с их использованием?

Охарактеризуйте термоядерный синтез, при какой температуре он может происходить и какие возможности перед энергетикой он открывает? Какие источники энергии звезд Вы знаете?

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.253–259.
2. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.174–188, 389–394.

5. Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы. Тождественность микро-частиц и разные статистики. Частицы и античастицы.

Принцип тождественности как фундаментальный принцип квантовой механики, отражающий ее отличие от механики классической.

Элементарные частицы и их характеристики. Участие элементарных частиц в фундаментальных взаимодействиях.

Вещество и антивещество.

Строение атомных ядер. Ядерные превращения и перспективы исследования ядерных процессов.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.74–108.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск, ЮКЭА, 1997. — С.25–29.
3. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.70–76.
4. *Гейзенберг В.* Философия и физика. Часть и целое. — М.: Мир, 1975.
5. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.301–316
6. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.13–22.
7. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.88–94, 160–165, 167–192.
8. *Бройль Луи де.* Революция в физике. — М.: Мир, 1963.
9. *Буравихин В.А., Егоров В.А., Идлис Г.М.* Биография электрона и его родословная. — М.: Агар, 1997.

6. Клетка как первокирпичик живого. Функционирование на онтогенетическом уровне.

Основные отличия живого от неживого. Понятие онтогенетического уровня. Основные положения клеточной теории. Какова роль этой теории в биологии? Почему клетку определяют в качестве элементарной единицы жизни, что может доказать это?

Клетка — основная форма организации живой материи. Методы изучения состава и строения живой клетки. Структурно-функциональная организация эукариотических кле-

ток. Насколько велико значение методов исследования в изучении клеток?

Работа клетки. Процессы обмена веществ и энергии в клетке. Роль ферментов. Все ли белки являются ферментами? Основные функции клеточных мембран. «Ионный насос». Есть ли мембранная структура в клетках растений? Все ли клетки обладают митохондриями?

Строение и функции ядра клетки. Есть ли различия между ядрами клеток растений и животных? Деление клеток. Каковы фазы митоза и сущность происходящих в них процессов? Каковы причины гибели клеток? Есть ли генетический механизм, контролирующий гибель клеток?

Взаимодействие клеток между собой. Что представляют собой межклеточные структуры? Ткани животных и растений. Что такое нервная ткань и из каких компонентов она состоит?

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.2, гл.9; ч.3, гл.7.
2. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: ВЛАДОС, 1999. — С.123–134.
3. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания: Учебник. — СПб.: Питер, 1999. — С.175–189.
4. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.260–266.
5. *Пехов А.П.* Биология с элементами экологии. — СПб.: Лань, 2000. — Гл.5–7.

7. Обмен веществ и энергии на разных уровнях организации живого. Процессы дыхания и фотосинтеза.

Анаболизм и катаболизм. Основные источники энергии в клетке. Какова роль обмена веществ и энергии в жизни? Каковы формы используемой энергии? Как организмы ее используют?

Молекулярное строение живой клетки — ДНК, РНК, АТФ. Структура и синтез белка. Рибосомы как «фабрики белка». Как используется АТФ в биологической работе, в транспорте ионов через мембрану, в росте клеток и в биосинтезе белка?

Законы термодинамики и объяснение процессов метаболизма.

Процессы фотосинтеза и хемосинтеза. Химия процессов, световые и темновые реакции. Что происходит, когда свет падает на хлорофилл?

Подготовка энергии к использованию (дыхание). Реакции брожения. Какова роль дыхания в подготовке энергии к использованию? Почему энергия, запасенная в глюкозе, не может использоваться прямым образом для обеспечения биологических реакций?

Использование энергии в клетках. Метаболизм на организменном уровне. Автотрофные, миксотрофные и гетеротрофные организмы. Происхождение типов обмена. Опишите свойства автотрофов и гетеротрофов с точки зрения ввода и использования энергии.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.2, гл.9; ч.3, гл.7.
2. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания: Учебник. — СПб.: Питер, 1999. — С.190–204.
3. *Пехов А.П.* Биология с элементами экологии. — СПб.: Лань, 2000. — Гл.5–7.

Тема 4. Законы эволюции. Открытые системы и самоорганизация (главы 15–22)

Лекции

1. Эволюционные процессы во Вселенной и моделирование. Многообразие мира галактик. Объяснение образования структур во Вселенной. Стационарные и нестационарные сценарии развития.

2. Эволюция планет, Земли и климата. Элементы геохронологии. Перспективы и модели геологической эволюции Земли. Особенности эволюции Земли в фанерозое.

3. Формы и уровни жизни. Биология: натуралистическая, физико-химическая, эволюционная. Этапы развития. Уровни организации жизни на Земле. Молекулярно-генетический уровень изучения живой материи. Проблемы, изучаемые на молекулярном уровне. Молекулярные механизмы генетической репродукции, изменчивости и биосинтеза белка. Молекулярные основы воспроизводства жизни и процессов жизнедеятельности.

4. Эволюционная биология. Гипотезы происхождения жизни. Дарвинизм и синтетическая теория эволюции. Открытие генома человека. Современный взгляд на проблемы эволюции живой материи.

5. Самоорганизация материи. Синергетика — новый научный метод. Динамический «хаос» и «бифуркация». Переход к эволюционной парадигме. Самоорганизация в живой и неживой природе. Понятие о постнеклассической стратегии познания.

Семинары

1. Энергетика химических процессов. Макросистемы вдали от равновесия. Стационарные неравновесные системы и принцип Ле Шателье. Открытые системы и условия возникновения упорядоченности. Информационный подход в естествознании.

Равновесие в химических реакциях. Возможность управления направлением и скоростью реакции. Понятие о необратимых процессах.

Принцип локального равновесия. Принцип Ле Шателье–Брауна в химических технологиях.

Фазовые портреты систем, аттракторы и эволюция. Возникновение упорядоченности в гидродинамике. Условия возникновения. Проблема турбулентности.

Динамический хаос и бифуркации. Диссипативные структуры вблизи точки бифуркации. Диссипативные системы и принцип минимального производства энтропии. Понятие о теории катастроф.

Элементы теории информации. Энтропия и информация. Измерение информации. Оценка информации, содержащейся в сообщении. Рассчитайте информационную емкость молекулы воды.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.4, 5.
2. *Дубнищева Т.Я., Пигаев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.108–116.
3. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.419–432.
4. *Липовко П.О.* Практикум по естествознанию. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. — С.120–135.

5. *Коган И.М.* Прикладная теория информации. — М.: Радио и связь, 1981. — 215 с.
6. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: ВЛАДОС, 1998. — С.109–116.
7. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.265–276.

2. Атмосфера и океан как сильно неравновесные процессы. Самоорганизованная критичность. Приложения к эволюции геосфер и предсказанию землетрясений.

Эволюция Земли и ее оболочек. Процессы формирования атмосферы и океана, их взаимосвязь. Возможности предсказаний погоды.

Элементы теории самоорганизованной критичности.

Приложения теории к предсказанию землетрясений и катастроф.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.4.
2. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.122–133.

Индивидуальное занятие

Физиологические основы психологии, социального поведения, экологии и здоровья человека. Этология и социобиология. Биоэтика. Биологическое и социальное в онтогенезе человека. Генная инженерия и этические проблемы.

Раздражимость и нервная система. Нервный импульс как элементарная частица мысли.

Рефлексы условные и безусловные. Типы поведения. Генетика о поведении.

Отличия животных и растений. Элементы антропологии. Сходства и отличия человека и животных. Законы биологической и социальной экологии. Основы биоэтики.

Психофизиология человека. Здоровье, болезнь, творчество. Биологическое и социальное в онтогенезе человека.

От биосферы — к ноосфере. Этика науки. Современные достижения генной инженерии и этические проблемы.

1. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.137–173.
2. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.311–317.
3. *Лавриненко В.Н., Ратников В.П. и др.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — Гл.8.
4. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.215–230.

Самостоятельные занятия

1. Биосфера Земли и ее формирование с учетом влияния живой материи. Понятие о биогеохимии. Развитие идей Вернадского. Земля как живая планета.

Строение биосферы Земли и история ее формирования. Сферы Земли. Геохимические круговороты.

Активационный фон жизни. Роль живой материи в эволюции оболочек планеты, элементы биогеохимии Земли.

Биотический круговорот и моделирование процессов в биосфере. Биоинформация и направленность биологической эволюции. Критические состояния в биосфере.

Основы учения Вернадского о биосфере и перспективах ее эволюции.

Солнечная активность и элементы организованности нашей планеты.

От биосферы — к ноосфере. Идеи Вернадского и современность.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.7. — С.621–627.
2. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.234–258.
3. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.411–426.
4. *Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000. — С.424–429.
5. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.146–159.

2. Самоорганизация как фазовый переход в динамике, химии, экологии. Высшая нервная деятельность, работа мозга. Человек как биосистема. Поведенческая информация и речь, появление логической информации и целенаправленность развития.

Понятие фазовых переходов. Описание и примеры фазовых переходов. Идеи Г.Хакена о самоорганизации в природе.

Понятие о порядке и хаосе. Основные понятия и идеи синергетики.

Примеры самоорганизации в области гидродинамики, химии, экологии. Роль коллективных взаимодействий в неравновесной открытой системе.

Разум и жизнь. Особенности биологии человека и строения мозга человека. Понятие о высшей нервной деятельности.

Роль речи и информации в формировании человека и общества.

Происхождение жизни и появление человека на Земле.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.3.
2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — С.19.
3. *Эткинс П.* Порядок и беспорядок в природе. — М.: Мир, 1987. — С.110–125.
4. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.111–117.
5. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.215–230, 276–290.
6. *Липовко П.О.* Практикум по естествознанию. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. — С.269–276.

3. Компьютеры, математические модели и нелинейные явления. Диссипативные системы в окрестности точки бифуркации. Математическое моделирование биоэволюции.

Линейные и нелинейные явления, возможности их описания, примеры.

Понятие о математическом моделировании нелинейных процессов в сложных системах.

Возможности описания развития процессов с помощью компьютерного моделирования. Понятие о точке бифуркации и гомеостатическом режиме.

Моделирование эволюции живой материи на компьютере.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.6–8.
2. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.118–126.
3. *Потеев М.И.* Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999. — С.265–276.
4. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.108–118.
5. *Литовко П.О.* Практикум по естествознанию. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. — С.167–183, 231–237.

4. О взаимодействии между физическими, химическими и биологическими процессами на биосферном уровне организации материи.

Закономерности развития экосистем. Негэнтропийная пирамида и проблемы устойчивости биосистемы.

Биологическое разнообразие как основа устойчивости биосферы.

Моделирование процессов в биосистеме: основные модели.

Моделирование биоценозов с учетом техносферы.

О моделировании социальных систем. Проблема устойчивости.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.6, 7.
2. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.108–126.
3. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.113–117, 124–134.
4. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.303–317.
5. *Лавриненко В.Н., Ратников В.П. и др.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — Гл.7.
6. *Василькова В.В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем. — СПб.: Лань, 1999. — С.283–311.

Тема 5. Естествознание и развитие цивилизации (глава 23)

Лекции

1. Космос и живая природа. Проблема антропогенеза. Коллективные взаимодействия и развитие цивилизации. Технический историзм. Организованность ноосферы. Поток в ноосфере. Экологический кризис и пределы роста.

2. Синергетический подход к концепции устойчивого развития. Глобальные кризисы и будущее естествознания. Переход к ноосфере, возможность управления развитием природы и общества. О ноосфере и парадигме единой культуры.

Самостоятельные занятия

1. Космические и биологические циклы. Экономика как пример диссипативной системы. Волны в экономике. Колебания делового цикла. Проблема инфляции. Механизмы, управляющие структурой больших систем.

Системная организация сложных процессов.

Космические и биологические циклы. Ритмика человека и природы.

Моделирование вихревых процессов в науке. Системная организация сложных процессов.

Колебания делового цикла. Космизм и циклизм в развитии общества.

Проблема инфляции. Возможности управления поведением больших систем.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.4.
2. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.92–98.
3. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.101–103, 111–115.
4. *Дыбов А.М., Иванов В.А.* Концепции современного естествознания. — Ижевск: Удмурдский университет, 1999. — С.254–266.
5. *Василькова В.В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем. — СПб.: Лань, 1999. — С.283–311.
6. *Литовко П.О.* Практикум по естествознанию. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. — С.142–148.

2. Энтропия и информация. Перспективы информационного подхода ко Вселенной. Антропный принцип. Космические ориентиры человечества. Космическая религия и этика. Жизнь как физико-химический процесс. Синергетический подход к коэволюции человека, общества и природы. Идеи активной коэволюции. Концепция устойчивого развития.

Понятие информации. Связь информации и энтропии. Возникновение и передача информации. Распространение импульса по нейрону.

Описание жизни как физико-химического процесса. Роль каталитических процессов. «Игра жизни» и рождение информации.

Экологический императив и развитие цивилизации.

Мировые универсальные константы и антропный принцип.

Наука и религия. Наука и нравственность. Ответственность ученых за использование достижений науки и развитие цивилизации.

Роль международных соглашений в решении мировых проблем. Идеи активной коэволюции. Концепция устойчивого развития.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск, ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.5, 8.
2. *Дубнищева Т.Я., Пигарев А.Ю.* Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. — С.93–100.
3. *Горелов А.А.* Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — С.104–109.
4. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — С.323–350.

5. *Василькова В.В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем. — СПб.: Лань, 1999. — С.283–311.
6. *Коптюг В.А.* Наука спасет человечество. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997.

3. Моделирование социальных процессов. О квазинаучных тенденциях в обществе и СМИ.

Истоки упорядоченности в эволюции. Организованность биосферы и ноосферы.

Роль коллективных процессов в развитии общества и цивилизации.

Взаимоотношения между наукой и религией в историческом аспекте.

Взаимоотношения между знанием и верой. Желание верить, чтобы не трудиться в получении знания. Особенности кризисов XX века.

Политические заказы и «свобода печати». Лжеучения и СМИ.

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — Ч.4, гл.8.
2. *Черной Л.С.* Экономика, рынок, государство. — М.: Наука, 2000. — С.94–106, 202–219.
3. *Кругляков Э.П.* «Ученые» с большой дороги. — М.: Наука, 2001. — С.18–68, 113–145.
4. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 1997. — Гл.20, 21.
5. *Дыбов А.М., Иванов В.А.* Концепции современного естествознания. — Ижевск: Удмурдский университет, 1999. — С.254–266.
6. *Василькова В.В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем. — СПб.: Лань, 1999. — С.283–311.

Раздел 3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

3.1. ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Логическая информация и проблема «двух культур» — естественных наук и гуманитарного знания.
2. Антропный принцип и физические константы.
3. Научный закон и целесообразность.
4. Причины популярности астрологии.
5. Рационализм и мистицизм в познании природы.
6. Развитие науки и научные революции.
7. Особенности математического моделирования биологических процессов.
8. Гипотезы о возникновении жизни.
9. Развитие эволюционных идей в науках о живой природе.
10. Эволюция биосферы, ее ресурсы и пределы устойчивости.
11. Концепция устойчивого развития.
12. Проблемы и перспективы атомной энергетики.
13. Учение Вернадского о ноосфере и современность.
14. Цивилизация на путях поиска идеальной энергетики будущего.
15. Информационно-энтропийные свойства социальных систем и управление ими.
16. Возможности экономного расходования энергии.
17. Генная инженерия: современный этап, проблемы и перспективы развития.
18. Проблемы создания искусственного интеллекта.
19. История создания атомной бомбы.
20. Лазеры и их применение.
21. Достижения биологии в начале XXI века.
22. Природные системы на грани хаоса и порядка.
23. Феномен самоорганизации в природе и обществе.
24. Симметрия в природе и искусстве.
25. Достижения космонавтики и народное хозяйство.
26. Приложения теории катастроф в естествознании.
27. Индивидуальность человека: влияние наследственности и среды.
28. Клонирование: научный и моральный аспекты.
29. Молекулярные основы эмоциональных состояний человека.
30. Солнечно-земные связи и их влияние на человека.
31. Тайны работы головного мозга.
32. Обсуждение теорий происхождения человека.
33. Моделирование общественных процессов.

3.2. ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. Наука как часть культуры. Отличие науки от обычного сознания. Предмет и цели естествознания. Какие научные дисциплины составляют естествознание? Как они соотносятся в разные периоды развития естествознания?

2. Отличия науки Нового времени от натурфилософии. Формирование научного метода. Роль науки и техники в современном мире. Основные достижения НТР. Особенности эпохи НТР, ее противоречия, влияние на мировоззрение.

3. Понятия «научная картина мира» и «научная революция». Примеры научных революций, их отличия от промышленных и научно-технических революций.

4. Методы естествознания (всеобщие, общенаучные и конкретно-научные). Всеобщность законов естествознания, их отличия от других наук (гуманитарных, технических,

математических). Чем отличается наблюдение от эксперимента? Что такое «мысленный эксперимент»?

5. Методы оценки расстояний и размеров тел. Поясните шкалу размеров существующего и место живых организмов на ней. Где на Земле наиболее близко к ее центру?

6. Основные свойства пространства. Геометрические модели и реальные материальные тела. Евклидово пространство, «искривленное» пространство, пространственно-временной континуум и фрактальная геометрия.

7. Методы измерения времени. Как определяют возраст ископаемой находки и небесного тела? Поясните шкалу временных масштабов во Вселенной, оцените масштаб времен существования живого и человечества на ней. Будет ли на Земле смена дня и ночи, если прекратится ее вращение вокруг своей оси?

8. Измерение расстояний до небесных тел и размеров тел методом параллакса. Как были определены размеры нашей планеты? Как можно доказать, что Земля вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца?

9. Какие движения легли в основу создания календаря? Какие календари сейчас используются? С какой скоростью и в каком направлении должен лететь самолет в районе экватора, чтобы местное солнечное время для его пассажиров остановилось?

10. Различие между аксиоматическим и гипотетико-дедуктивным методом как основным в современном естествознании и значение выведения следствий из теории путем дедукции. Механика Ньютона и детерминизм классического естествознания.

11. Фундаментальные типы взаимодействий в физике. Почему они так называются, чем отличаются и как проявляются? Приведите примеры.

12. Законы сохранения импульса и момента импульса. Примеры их проявления в природе, науке и технике. Связь великих законов сохранения со свойствами симметрии пространства и времени.

13. Строение Солнечной системы. Законы движения планет и закон всемирного тяготения. Почему этот закон назван «всемирным»?

14. Модели материальной точки и гармонического осциллятора. Поясните роль математики и моделирования в естествознании. Типы волн. Звук.

15. Колебания и волны в природе и в науке. Эффект Доплера и его применение. Как установили и измерили скорость вращения Солнца вокруг своей оси? Поясните закон Хаббла и его роль для мировоззрения.

16. Измерение температуры и температурные шкалы. Теплота, ее измерение и единицы измерения. Роль уравнений теплового баланса в установлении закона сохранения энергии. Можно ли передавать телу некоторое количество теплоты при неизменной температуре?

17. Понятие энергии. Энергия механическая, тепловая, внутренняя. Какие процессы изменяют перечисленные виды энергии? Значение установления механического эквивалента теплоты для единства естествознания.

18. Тепловые машины, идеальный и реальный цикл, коэффициент полезного действия. Приведите значения КПД для тепловых станций. Как преобразуется химическая энергия пищи в живых организмах? «Начала термодинамики» и проблема вечных двигателей.

19. Понятие «энтропия». Закон возрастания энтропии в замкнутых системах и второе начало термодинамики. В чем состоит суть спора о «тепловой смерти Вселенной»? Термодинамическая вероятность и энтропия.

20. Связь макроскопических параметров системы с микроструктурой веществ. Что такое температура с точки зрения микроструктурных параметров? Процессы обратимые и необратимые, системы открытые и изолированные. Как Вы понимаете термин «стрела времени»?

3.3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие изолированной системы. Приведите примеры. Как изменяются в таких системах энергия и энтропия?

2. Какими видами взаимодействий описывается плавание, скатывание с горы, телевидение, движение спутника по орбите, происхождение энергии Солнца и звезд, любовь, высвобождение энергии при взрыве атомной бомбы?

3. Оцените свой вес на Луне и Солнце. Как связаны ускорения свободного падения на них и универсальная гравитационная постоянная?

4. Что такое материя, и в каких формах она существует? Каковы объективные условия ее существования и в чем заключается основной закон природы?

5. Что такое ось мира и как она расположена относительно оси вращения Земли? Как определить широту местности по Полярной звезде?

6. На каком расстоянии от Солнца находится планета Венера, если ее период обращения равен 0,615 земного года?

7. Как меняется кинетическая, потенциальная и полная механическая энергия планеты при ее движении вокруг Солнца?

8. Почему на Земле происходит смена дня и ночи, смена времен года? В каком направлении относительно сторон горизонта вращается Земля?

9. Что называют внутренней энергией в молекулярной физике? Как можно ее измерить?

10. Что такое термодинамическое равновесное состояние системы? Могут ли бесконечно долго находиться в одной изолированной системе тела с разными значениями температуры?

11. Почему молекулы одного и того же газа при постоянной температуре движутся с различными скоростями?

12. Существует ли в природе как угодно низкая и как угодно высокая температура тел и почему?

13. Что такое идеальный газ? Каковы свойства идеальных газов, существуют ли подобные общие законы для других агрегатных состояний вещества?

14. Определите КПД тепловой машины, если ее рабочее тело получило $1,1 \cdot 10^7$ Дж, отдав холодильнику $9,5 \cdot 10^6$ Дж теплоты. Каково назначение рабочего тела в тепловом двигателе?

15. Что такое теплоемкость и как она изменяется? Как объясняется пороговый характер изменения теплоемкости с температурой?

3.4. ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ ИЛИ ЭКЗАМЕНУ

1. Изменения представлений о времени и пространстве по мере развития науки. Переход от представлений классической механики Ньютона к представлениям Эйнштейна.

2. Суть концепции атомизма в ее развитии. Ее связь с современными проблемами построения единой физической теории. Вещество как система частиц. Проблема поиска «первичных объектов».

3. Законы термодинамики изолированных систем. Понятия: «положение равновесия», «температура», «внутренняя энергия», «энтропия». Связь энтропии и вероятности.

4. Понятие фазы и фазового перехода, примеры. Явления переноса: диффузия, осмос. Опишите процесс формирования и передачи нервного импульса по нейрону.

5. Концепции близкого действия и дальнего действия. Поперечные, продольные и стоячие волны в упругой среде. Эффект Доплера и его использование. Что такое «когерентность», «резонанс», «поляризация»?

6. Понятие «поле», теория электромагнитного поля. Развитие представлений о свете. Как и кем было показано, что свет есть электромагнитная волна? В чем проявляются волновые свойства света? Каков спектр электромагнитного излучения?

7. Дискретность и непрерывность материи. В каких явлениях проявляются корпускулярные свойства света? Проблемы теплового излучения и создание квантовой теории света.

8. Представления о строении атомов в своем развитии. Открытие электрона. В какой степени атом похож на солнечную систему? Понятие об энергетических уровнях и переходах.

9. Какие частицы составляют ядро атома, каковы его размеры? Понятие «элементарные частицы», их классификация. Как они исследуются? В чем состоит гипотеза кварков?

10. Поясните суть гипотезы Луи де Бройля. Как и кем она была экспериментально подтверждена, какое значение для естествознания имеет использование корпускулярно-волновых свойств вещества?

11. Специфика микромира по сравнению с изучением мега- и макромира. Поясните принципы неопределенности, соответствия, причинности и дополтельности.

12. Как изменились стратегия познания и представления о случайном и закономерном при исследовании микромира? Поясните роль прибора в квантовой механике.

13. Явление радиоактивности (естественной и искусственной). Реакции деления ядер, проблемы энергетики, связанные с этими реакциями.

14. Реакции синтеза ядер. Источники энергии звезд, эволюция обычных звезд и красных гигантов. Перспективы эволюции Солнца.

15. Что изучает химия, каковы основные этапы ее развития? Развитие представлений о составе веществ и структуре молекул. Понятие химического элемента, химического соединения, химических связей, роль энергии и энтропии при образовании молекул.

16. Строение жидкостей. Объясните значение в живой природе большой теплоемкости воды, большого поверхностного натяжения и свойства капиллярности. Особен-

ности растворения в воде различных веществ. Гидрофильные и гидрофобные процессы.

17. Распространенность химических элементов на Земле и в ее биосфере. В чем единство химического состава живых организмов и неживой природы? Строение атома углерода и его роль в живой природе. Роль каталитических реакций в жизнедеятельности организмов.

18. Развитие биологии, изменение ее целей и методов в связи с развитием других естественных наук. Значение молекулярной биологии в развитии науки о живой материи.

19. Основные положения и значение клеточной теории в развитии биологии. Какими методами удалось изучить состав живой клетки и ее молекулярное строение? Опишите функции клеточных мембран. Охарактеризуйте строение и биологическое значение АТФ.

20. Формирование идей эволюции, теории Ламарка и Дарвина. Доказательства эволюции органического мира. Виды изменчивости, их сходства и отличия. Естественный отбор как направляющий фактор эволюции. Понятия «популяция» и «вид». Почему популяция является единицей эволюции?

21. Сущность микро- и макроэволюции, примеры действующих в них процессов. Понятие о неodarвинизме и синтетической теории эволюции.

22. Что такое «ген», «кодон», «нуклеотиды», «нуклеиновые кислоты»? Что изучает генетика, как она развивалась? Кто и когда построил модель структуры ДНК? Разновидности РНК, их значение.

23. Как происходит деление клеток, ядра и ДНК? Как происходит биосинтез? Как реализуется система воспроизводства?

24. Понятие «биосфера», ее функции и оболочки. Учение Вернадского о биосфере. Основные этапы развития биосферы. Сравните биомассу поверхности суши, почвы и мирового океана. Круговорот веществ в биосфере. Гипотезы происхождения живого. Почему жизнь пока обнаружена только на нашей планете?

25. Охарактеризуйте понятия: «экосистема», «биогеоценоз», «экологическая ниша», «биоценоз». Чем определяется их устойчивость, какие связи существуют между организмами в экосистеме, какими моделями описывают отношения между трофическими уровнями в биоценозах? Глобальный экологический кризис, его причины и перспективы преодоления.

26. Распределение на Земле солнечной энергии. Дайте понятие о неэнтропии солнечного излучения, биотическом круговороте и оцените биосферную роль хозяйственной деятельности человека. Концепция коэволюции. Существует ли ноосфера сейчас?

27. Вселенная, ее размеры, состав и модели развития. Назовите эмпирические подтверждения расширения Вселенной? Что означает «стационарность» и «нестационарность» Вселенной? Какие наблюдения подтвердили модель Большого Взрыва?

28. Поясните, что такое «галактика», какова их форма и строение. Где находится солнечная система в нашей Галактике? Как изменили физическую картину мира общая

и специальная теории относительности? Как связаны масса и энергия в теории относительности?

29. Понятие закона природы, типы законов в науке: детерминистский закон, вероятностный закон, закон как тенденция, закон как ограничение разнообразия. Закон и целесообразность. Примеры целесообразного поведения в живой и неживой природе.

30. Что такое «мутация» и какие мутации бывают? Наследуются ли приобретенные признаки? Эволюция видов с точки зрения генетики. В чем особенности биотехнологий: геной и клеточной инженерии, их возможности, достижения и перспективы?

31. Геосферы. Возникновение и эволюция океана и атмосферы. Возникновение биосферы, химическая эволюция преджизненных форм. Биосфера как одна из оболочек Земли.

32. Понятие о простых, сложных, устойчивых, неустойчивых, изолированных и открытых системах, об обратимых и необратимых процессах. Макросистемы вдали от равновесия. Принцип локального равновесия. Понятие диссипативной структуры по И.Пригожину.

33. Как возникают структуры из хаоса в неорганической и живой материях? Примеры. Условия образования структур из хаоса. Что такое синергетика?

34. Самоорганизация материи в процессе эволюции галактик, звезд, планет. Поясните проблемы происхождения и эволюции нашей планеты. В чем суть гипотез тектоники литосферных плит, дрейфа континентов? Современный вариант гипотезы мобилизма. Поясните выражение: «Земля — живой организм».

35. Элементы геохронологии. Концепции эволюции растительного и животного миров в соответствии с геохронологической шкалой. Процесс фотосинтеза, его значение для эволюции.

36. Компьютеры, математические модели и нелинейные явления. Динамический хаос и бифуркации, диссипативные структуры в окрестности точки бифуркации. Математическое моделирование биологической эволюции.

37. Феномен человека. С какого времени начинается человеческая история? Появление речи и роль коллективных взаимодействий.

38. Концепция этногенеза по Л.Н.Гумилеву. Явления самоорганизации и инертности в формировании человеческого общества. Какие аналогии развития этносов можно проследить при сопоставлении их с теорией фазовых переходов?

39. Как Вы понимаете проблемы социальной экологии, экологии и социобиологии? Человек как предмет обществоведения и естествознания. Концепция ноосферы по Вернадскому. Суть антропного принципа.

40. Современная естественно-научная картина мира. Выделите роль генетики, кибернетики и психоанализа. Какие парадоксы, ограничения и затруднения имеются в развитии науки? Представьте науку в виде эволюционного процесса и опишите ее ближайшее будущее.

3.5. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997 (1-е изд.); М.: Маркетинг, 2000, 2001 (2-е и 3-е изд.).
2. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания: Методические рекомендации. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997.
3. Дубнищева Т.Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: Инфра-М, 1997.
4. Дубнищева Т.Я., Пигаев А.Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998 (1-е изд.); М.: Маркетинг, 2000 (2-е изд.).
5. Бабушкин А.Н. Современные концепции естествознания. — СПб.: Лань, 2000.
6. Потеев М.И. Концепции современного естествознания. — СПб.: Питер, 1999.
7. Суханов А.Д., Голубева О.Н. Концепции современного естествознания. — М.: АГАР, 2000.

ТЕКСТЫ ЛЕКЦИЙ
УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
«КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

Глава 1. ЛОГИКА ПОЗНАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

1.1. НАУКА — ЧАСТЬ КУЛЬТУРЫ

Понятия «наука» и «культура» столь многогранны, что не могут быть даны каким-то одним определением, выраженным совокупностью признаков. Для термина «культура» существует около 200 смысловых определений и толкований. При деятельном подходе культура — способ регуляции, сохранения и воспроизводства общества, «технология» человеческой деятельности, некий «ген» жизнедеятельности людей. Она не существует вне человека и общества. Под культурой понимается все, созданное человеческим трудом в ходе истории. *Процесс труда* включает мышление, знания, волю и чувства человека. Осваивая достижения культуры, человек развивает свой внутренний мир, свои знания, навыки, мировоззрение, а, создавая новые элементы культуры, — становится ее творцом, и его труд — творческим. Культура в зависимости от целей может быть *духовной, социальной и материальной*.

Наука — важнейшая часть *духовной культуры*, в которой в наибольшей степени представлена *познавательная* сторона деятельности, направленная на выработку, производство и систематизацию объективных знаний об окружающем мире. Познание мира — неотъемлемая сторона практики материального преобразования мира, обеспечивающая целенаправленное практическое его освоение и изменение. Наука — это и *совокупность самих знаний*, отвечающих определенным критериям, и *социальный институт*, т.е. совокупность организаций, занимающих место в структуре общества и выполняющих общественные функции. В наши дни наука — мощный фактор развития в самых различных областях человеческой деятельности. В принятой в 1996 г. «Доктрине развития российской науки» была дана следующая оценка: «Российская наука за свою многовековую историю внесла огромный вклад в развитие страны и мирового сообщества. Своим положением великой мировой державы Россия во многом обязана достижениям отечественных ученых». Организационные и срочные оперативные мероприятия не могут подменить роль науки по обеспечению безопасности страны и человечества.

Познание может быть *донаучным, внеаучным и научным*. Знания должны отвечать определенным критериям. Донаучное и внеаучное (обыденное) познания описывают состояния предметов и некоторые факты, хотя включают много конкретных знаний об окружающем мире.

Познавательной предпосылкой науки явилось развитие критических функций разума и абстрактного мышления в Древнем Египте и Древнем Вавилоне. Человек, выделяясь из мира природы, почувствовал себя активной силой, преобразующей природу для своей пользы. Общественное разделение труда выделило производственную, трудовую сторону жизни человека, которая ориентировалась на рациональное сознание. Накопление *рациональных знаний* и рост *практических потребностей общества* стали противоречить мифологическому сознанию. И в Древней Греции VII–VI вв. до н.э. возник интерес к пониманию мира в целом. Сознание человека было готово подняться до уровня абстракции, позволяющей задаться

вопросом о первооснове бытия. Переход к научному познанию был противоречивым и долгим и предполагал выработку нового отношения к миру и человеку. Постепенно формировалась идеология и психология разделения общества на классы.

На возникновение науки и истоки научного метода существует несколько точек зрения. По одной из них, *освобождение сознания от мифологии* — основной признак перехода к научному мышлению. Евклид и Архимед стремились *выявить закономерности сами по себе*, они строили теории в соответствии с логикой, а после этого выясняли возможности их практического использования. Обобщенная форма восприятия и объяснения явлений окружающего мира, зародившаяся в античности в трудах Гераклита, Демокрита, Аристотеля и послужившая началом формирования науки в целом, получила название — *натурфилософия*. Она существовала многие века как единая наука о природе и обществе. Наблюдаемые явления сопоставляли со здравым смыслом, сформировавшимся на основе других наблюдений и логики. Из обобщений формулировали *гипотезу* происходящего, затем — новые наблюдения и проверка. В период возникновения наука практически не отличалась от философии. Ученые называли свои труды «позитивной экспериментальной философией». Существенный вклад в обоснование науки и ее методов внесли такие мыслители, как Ф.Бэкон, Р.Декарт, Дж.Локк, Г.Лейбниц и др. Но с развитием специфических особенностей эксперимента и технологии примерно с XVI–XVII вв. наука выделилась из натурфилософии.

Другая концепция относит *возникновение науки* к XVI–XVII вв., связывая рождение науки с *естествознанием*, когда появились работы И.Кеплера, Г.Галилея, И.Ньютона, Хр.Гюйгенса и др. Естествознание создает *идеалы и критерии научности*. Постепенно из натурфилософии выделилась *философия*, обретя свой предмет среди проблем, которые не могут быть решены объективно: проблемы смысла, души, духа, сознания, бытия. Философская мысль только создает предпосылки для индивидуального поиска ответа на вечные вопросы бытия вообще и собственного — в особенности. Поэтому рассмотрение мироздания в целом, размышление о вечности и бесконечном разнообразии природы связаны в философии с жизненными ценностями исследователя, с его пониманием смысла жизни.

Способность осознавать образ — одно из фундаментальных свойств мозга. Реализуемая так *информация* — *содержательная основа мышления*. Окружающий мир отражается в сознании человека во всем многообразии. Сведения о нем поступают через органы чувств, затем передаются в мозг единственным способом — модуляцией нервных импульсов. Импульсы идут по разным волокнам в разные участки мозга. Пространственное и временное суммирование импульсов, связанная с ним мозаика процессов возбуждения и торможения в коре головного мозга — это физиологическая основа человеческого мышления. Но еще необходимо отфильтровать шумы и выделить структурный инвариант, лежащий в основе формирования *образа*.

Принято разделять мышление образами (конкретное) и мышление понятиями (абстрактное), причем правое полушарие мозга специализируется на образах реальных объектов и эмоциональных реакциях, а левое — формирует абстрактное мышление. Из-за асимметрии обычно одна из частей мозга доминирует, и считают, что «правополушарное мышление» настраивает на более успешные занятия гуманитарными науками или искусством, а «левополушарные» — на научно-технические области деятельности. Но нейрофизиологические исследования показали, что правое полушарие распознает текст целиком, а левое — поэлементно. Поэтому и функции их можно считать синтетической и аналитической, соответственно, и обе они должны находиться в гармонии для адекватного познания действительности как отдельным человеком, так и наукой в целом.

Наука стремится к *объективности*, исключая личностное восприятие мира, и это отличает ее от других компонент духовной культуры. *Гуманитарное знание* включает этику, историю, философию, юриспруденцию, педагогику, филологию, искусствоведение и т.п. Кроме того, существует целый ряд наук о человеке (физиология, психология), которые используют гуманитарные и естественно-научные методы исследования. *Естествознание* направлено на изучение природы, в которой действуют независимые от человека законы, которые он пытается постичь. В нем преобладают *причинные объяснения* явлений, но выяснение причины явлений еще не означает понимания или получения полного знания о предмете или явлении. Так, у Ньютона сила — причина ускорения, а Аристотель к силе как причине движения относил и цель («отец — причина ребенка»). В *гуманитарных науках* такое объяснение не всегда возможно, да и не всегда нужно, часто важнее раскрытие целей, мотивов или намерений в поведении людей. В *гуманитарной* методологии понимание достигается через истолкование явлений, текстов и событий; такой метод часто называют *герменевтическим*, по имени бога Гермеса, служившего посредником между богами и людьми и способного истолковывать людям волю богов. Общественные науки больше используют гуманитарное знание, так как в обществе ничего не происходит без действий и намерений человека.

Английский писатель Ч.Сноу в Кембридже прочитал лекцию «Две культуры и научная революция», вызвавшую много споров (1959 г.). Отмечая факт разрыва между «естественно-научной и гуманитарной культурами» в XX в., Сноу указывал на необходимость мер по их сближению. Почти одновременно и в СССР возникла дискуссия о «физиках» и «лириках». Но разрыва не происходило, наука и искусство продолжают сосуществовать и развиваться. Они разными способами исследуют окружающий мир и отражают его в сознании; научные понятия и художественные образы по-разному воссоздают его образ, но они совместимы. Их сосуществование даже плодотворно, о чем говорят примеры истории науки (Леонардо да Винчи, М.В.Ломоносов, И.В.Гете, А.П.Борodin). Именно успехи математики меняют ситуацию «размежевания культур». Постулаты Евклида или закон Архимеда были связаны с *эстетическими критериями*: так как круг — идеальная замкнутая

кривая, регулярно повторяющееся движение должно совершаться равномерно по круговым орбитам; так как целые числа являются чудом, лежащим в основе мироздания, они определяют гармонию прекрасных созвучий и т.д. И такое знание согласовывалось с *гармонией мира*. Эти гармонии подвергались проверке и часто не выдерживали ее (например, круговые орбиты в системе мира Птолемея и Коперника были заменены под давлением результатов тщательных наблюдений эллипсами — искаженными окружностями Кеплера). Но Кеплер обнаружил новую гармонию в установленном им по результатам наблюдений законе площадей. И подобное происходило многократно в истории науки. В естественных науках внелогический элемент сведен к суждению о достаточности опыта, а все прочие должны быть совместимы с положительным знанием и логикой, тогда как в науках гуманитарных и повседневной практической деятельности внелогические суждения разнообразны и являются основными.

В *религии аналогом доказательности* для утверждения этических норм является авторитет постулированного высшего существа, абсолютного духа. Ее вечные истины тем самым опираются тоже на интуитивные суждения. Множество примеров из области *искусства* показывает способность искусства нести достоверность в самом себе через свои «сверхзадачи», убеждающие удовольствием, правдоподобием, своими многообразными частными функциями. И эти многообразные функции притягательны для потребителя искусства, они дают наслаждение, чувство гармонии, убеждают в правильности той или иной позиции. При выборе решения, модели или суждения, как видно из истории открытий в науке, эти функции искусства очень важны и являются условием выживания человечества. И чем больше логические функции психики передаются машине, тем ярче выступает внелогическая функция интеллекта. И в научном творчестве естествознателя все более проявляются черты, свойственные художественному творчеству и научной работе гуманитария.

На границе между «двумя культурами» возникло много *новых дисциплин*: филология разветвилась на *лингвистику, поэтику, литературоведение, фольклористику*; появились *психофизиология* и *математическая лингвистика*. Проникают внелогические элементы в кибернетику. Переход к системному анализу, к диалоговым ЭВМ означает включение элементов, которые не связаны с числом, не формализуются. Это — и синтетическая оценка ситуации, не формализуемый отбор существенных факторов в отличие от несущественных и т.д. И не случайно, что ЭВМ требуют создания рабочих коллективов, где математики работают вместе с лингвистами и психологами. Возрастающая роль интеллектуальной деятельности, которая может быть передана машине и которую машина способна выполнить быстрее, не только подвергает формализации мыслительную способность человека, но и внелогическую. И это составляет сущность новой *«интеллектуальной революции»*, называемой так по аналогии с «промышленной революцией» XVIII–XX вв. Ныне машине передоверяют не только простые вычисления, но и испытание и количественную проверку моделей. Тем самым поиски новых моделей, принимаемых и в науке, и в искусстве с учетом

интуиции, остаются человеку, составляя основу творческой деятельности интеллекта, основу для взаимопонимания и сближения «двух культур».

Современный уровень развития естествознания, обретение им глубоких взаимосвязей с другими науками, прямое и опосредованное влияние на развитие производительных сил включают его в решение *общесоциальных* задач. Наряду с материальным эффектом и новациями от применения достижений естественных и математических наук и способом рационализации, выходящим за пределы естествознания и техники, возникают *новые нравственные ценности* — образцы объективности, добросовестности, честности, реализуемые в труде. Эта крепнущая связь и взаимодействие науки, техники и общества превратили науку в *движущую силу общества*. Наука все более ориентируется на человека, на развитие его интеллекта, его творческих способностей, культуры мышления, на создание материальных и духовных предпосылок его целостного развития.

Складывается и особая дисциплина, называемая *этикой науки*, впервые сформулированная английским ученым Г.Спенсером. Нравственность, по его мнению, есть форма развития эволюции живой природы, определенной фазой которой является человеческое общество. Стронники этого представления развивают *концепцию эволюционного гуманизма* — Дж.Хаксли, К.Уоддингтон, П.Тейяр де Шарден, как и русские мыслители — *космисты* — Н.Ф.Федоров, В.И.Вернадский, А.Л.Чижевский. Они пытались найти объективные (естественно-научные) *основания*

морали. Эти проблемы широко обсуждаются в обществе, а особенно в таких науках, как *социобиология, генетика, этология*.

Цикличность исторических процессов на основе обобщения за 2500 лет исторических событий исследовал Чижевский, *динамику процессов в природе и циклический характер перехода биосферы в ноосферу* — Вернадский, *социокультурный аспект циклов* — П.Сорокин. За последние 25 лет сильно вырос интерес к идеям космистов (особенно после кризисов середины семидесятых годов и последующих перестроек в структуре общества). *Русский циклизм* явился продолжением идей космизма, основы общей теории кризисов как неизбежной стадии в циклической динамике систем в природе и обществе заложил А.А.Богданов. Широко известно учение Н.Д.Кондратьева о больших циклах конъюнктуры, которое было распространено Й.Шумпетером и явилось основой для исследований долгосрочных циклов в экономике и общественной жизни. Появился ряд монографий, проводятся междисциплинарные дискуссии по проблемам *теории циклов и кризисов, социогенетике и прогнозированию*. Внутри самого естествознания укрепляются представления о необходимости соответствия научных концепций гармонии и красоте. *Концепция устойчивого развития* направлена на соответствие и гармонизацию в единстве экологических, социальных и технологических программ развития. Она названа академиком Н.Моисеевым *стратегией выживания человечества*.

1.2. ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЯ НАУЧНОСТИ

Наука — исторически сложившаяся *система познания объективных законов мира*. Она нацелена на получение и систематизацию объективных знаний о действительности, на объяснение и предсказание явлений и процессов на основе открываемых ею законов. **Научное познание** помимо описания и выявляет *причины явлений*, пытается объяснить происходящее. Для него существенным было *формирование критерия истинности и разграничение наук по предметам и методам исследования мира*. Гармония и соразмерность, как и в жизни, важны в научных теориях. С Фалесом связывают первую постановку вопроса о *первоначале* всего и первые *математические доказательства*. Эти два достижения ориентировали развитие научного метода познания.

Пифагор видел гармонию в «математическом узоре», который лежит в основе совокупности всех явлений природы. Его идеи прослеживаются у Филолая, Гераклита, Евклида, Архимеда, Платона, Аристотеля. Книги Евклида «Начала» заложили основы геометрии, все положения которой были обоснованы и взаимосвязаны. Евклид и Архимед выделяли математические закономерности, причем они интересовали их сами по себе.

Система доказательности и обоснованности знания стала складываться в математике еще в античные времена, в диалогах Платона арифметика есть чистое знание и центр всего космоса знаний. Впоследствии стало ясно, что *математические закономерности* отражают глубинную сущность законов природы, а не только внешнюю их сторону. Об этом писали Леонардо да Винчи,

Р.Декарт, И.Кеплер, Г.Галилей, Х.Гюйгенс, И.Ньютон и другие. Структура наук формировалась постепенно.

У Платона «тот, кто не умеет правильно считать, никогда не станет мудрым», наука о числе — высшая мудрость, «все искусства совершенно исчезли бы, если бы было исключено искусство арифметики» («Послезаконие»). Арифметика — наука, ведущая к размышлению и познанию чистого бытия, отделено искусство счета (логистика) от абстрактной арифметики («Государство»). За ней в структуре знаний следует геометрия, которая также «влечет к истине и воздействует на философскую мысль, стремя ее вывесь», стереометрия, «касающаяся измерений кубов и всего того, что имеет глубину», астрономия, изучающая «вращение тел», и завершает ряд математических наук учение о гармонии. Если астрономия — умозрительное изучение числовых соотношений в движении небесных светил, то гармония — умозрительное изучение числовых соотношений в музыкальных созвучиях. Это позволяет человеку «посредством только одного разума, минуя ощущения, устремляться к сущности любого предмета и не отступать, пока при помощи самого мышления не достигнет сущности блага. И он оказывается на самой вершине умопостигаемого». Это восхождение души есть освобождение от оков, поворот от теней к образу и свету, подъем из подземелья к Солнцу. Знание делится на практическое и познавательное, а последнее — на повелевающее и искусство суждения. А арифметика может применяться для измерения поверхностей, глубин и скоростей.

У Аристотеля «Первая философия» — это учение о божестве как неподвижном перво двигателе, бестелесной чистой форме. За ней — физические науки, так как их предметом является сущность, имеющая в себе начало движения и покоя. Математика не исследует бытие в движении и потому уступает физике, хотя более доказательна, абстрактна и истинна. Он в сочинении «О небе» широко использует *числовые соотношения*. Арифметика выше геометрии, так как основана на меньшем числе начал. Все остальные представления о мире еще формировались путем догадок, рассуждений, наблюдений и сопоставлений. Оптику, гармонику и астрономию Аристотель причисляет к наиболее физическим, так как «они в известном отношении обратны геометрии. Ибо геометрия рассматривает физическую линию не как материалистическую, так как она не существует физически, а оптика — математическую линию как физическую» («Физика»). Его воззрения основаны на наблюдениях и соответствии здравому смыслу, поэтому больше относятся к натурфилософии, чем к физике.

Проблема несоизмеримости диагонали квадрата с его стороной, воспринимаемая пифагорейцами как «козни злых сил», привела Евдокса к разработке теории пропорций и приложению ее к геометрии. Он стал беспредельно уменьшать остаток, строя доказательство путем исчерпывания. Так появились *иррациональные числа*, заставив задуматься над основаниями математики и доказательствами. Аксиомы Евдокса вошли в «Начала» Евклида и работы Архимеда, продвинули логику Аристотеля и других учеников Платона, возросла роль чертежа и доказательств «от противного». И это была попытка единого толкования окружающей природы — *натурфилософия*, и по современным воззрениям, не была еще наукой. Постепенно сведения о явлениях становились более конкретными, описание природы стало вытесняться экспериментальным изучением ее законов, выделились разные предметы познания и соответствующие им исходные понятия и методы.

Физика изучает наиболее простые и общие свойства материального мира. Ее законы являются обобщением многих специально поставленных опытов, они справедливы на Земле и в Космосе, отражая материальное единство мира. Возрождение математического метода Архимеда Галилеем означает переход к науке Нового времени, с XVII в. наступила пора *аналитического естествознания*; природе стали задавать вопросы и пытаться отвечать на них с помощью специальных опытов, а полученные результаты записывались, обобщались и анализировались с помощью математики. *Стройные естественно-научные теории* сначала были созданы в механике, а затем в других областях физики. И экспериментально-математическое естествознание надолго определило идеал и *критерии научности*. В физике переход к доказательности и обоснованности знания произошел в XVII столетии, в химии — в XVIII, в биологии — в XIX и т.д.

Естествознание исследует органическую и неорганическую природу на Земле и во Вселенной. Сфера исследования включает объекты *микро-, макро- и мегалиров*. Специфика естествознания в том, что знание отличается высокой степенью объективности, постоянно совершенствуется и представляет собой *наиболее достоверную часть*

всего знания человечества. Были открыты *фундаментальные законы*, объяснившие множество фактов и явлений, на основе этих законов были сформулированы *принципы*, которые составили фундаментальные теории различных дисциплин. Но менялось и отношение человека к процессу исследования природы, формировалась *стратегия познания*. Человек XVII в. отделял себя от изучаемой природы, выделял повторяющиеся явления и объяснял их на основе наглядных представлений и однозначного соответствия результата действия причине, вызвавшей его (*принцип детерминизма*). Большое значение при формировании так называемой *классической науки* сыграли успехи метода Галилея–Ньютона, позволившего с большой точностью дать проверяемые предсказания. К концу XIX в. были значительные достижения: в физике, кроме классической механики, — оптика, термодинамика, законы электричества и магнетизма и др.; в математике — аналитическая геометрия и математический анализ; в химии — учение о составе веществ, изучение основных свойств химических соединений, Периодическая система элементов, структурная химия и др.; в биологии — классификация и изучение основных свойств живых существ, теория клеточного строения, эволюционная теория Дарвина и др. Складывалось впечатление, что стройное здание науки близко к завершению, остаются некоторые «детали». Была уверенность в познаваемости мира «до конца», т.е. все расхождения теории с опытом могут быть преодолены уточнением либо эксперимента, либо теории. Наблюдатель находил вне исследуемых явлений, выводы соответствовали классической, булевой логике («или — или»). *Методология классической науки предполагала мысленную операцию отстранения исследователя от исследуемой природы*.

К началу XX в. в физике произошли изменения, кардинально расширившие представления о естественно-научной рациональности. Выяснилось, что операция устранения субъекта осуществима не всегда и не для всех объектов познания. Квантовая гипотеза излучения, квантовая теория атома, теория броуновского движения и другие изменили представления о воспроизводимости результатов исследования, о роли измерительных приборов (и наблюдателя), о случайности в исследовании природы. Сформировалась *неклассическая стратегия познания*, в основе которой — признание случайности как фундаментального свойства природы, а все выводы опираются на логику «дополнительности» («и — и») и уходят от привычного, наглядного. Принципиально дискретный взгляд на мир из области физики микромира постепенно распространился на другие области науки (и не только естествознания), а включенность наблюдателя (или прибора) в систему не нарушила объективности получаемого знания. Родился новый взгляд на мир в целом, что обогатило культуру человечества и самого человека.

В настоящее время наука переходит к новой *стратегии познания*, в так называемый постнеклассический период. *Интегративный характер постнеклассической науки* проявляется в создании общенаучных дисциплин и методов, появлении таких дисциплин, как *теория систем, синергетика, системный и структурный подходы* и т.д. Обна-

ружение принципиальной хаотичности и неопределенности ряда процессов и состояний привело к тому, что все большую роль, помимо динамических закономерностей, стали играть вероятностно-статистические законы. Формируются *общенаучные методы*, среди которых методу моделирования принадлежит особая роль.

Современная наука — целостный динамически организованный и саморазвивающийся организм. Она насчитывает около 15 тыс. научных дисциплин, число ученых по профессии превосходит 5 млн человек, а научная информация удваивается за каждый 10–15 лет. С развитием методов исследования конкретных естественно-научных дисциплин фундаментальные науки — *физика, химия, астрономия, биология* — сформировались к середине XX в., стали «обрастать» смежными дисциплинами. Появились *биохимия, геофизика, химическая физика, физическая химия, астрофизика, молекулярная биология, геохимия, астробиология, астронавтика* и др.

Система наук многообразна и сложна. *К общественным* относят такие науки, как история, археология, экономика, статистика, демография, история государства и права, этнография и др. *К естествознанию* — много конкретных научных дисциплин, среди них: механика, астрономия, физика, химия, геология, география, биология, а также биохимия, биофизика, астрофизика, космология, химическая физика, физическая химия, ботаника, зоология, антропология, генетика и др. Все активнее развиваются технические науки, нацеленные не на познание, а на преобразование мира. Появились такие теоретические прикладные науки, как физика металлов, физика полупроводников, катализ, аэро- и гидродинамика, а также практические прикладные науки: металловедение, астронавтика, электроника, полупроводниковая и лазерная

1.3. МЕТОДЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ, ВСЕОБЩНОСТЬ ЕГО ЗАКОНОВ. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Природа есть сложная система, сложный организм, где все связано со всем. По выражению современного философа К.Ясперса, «существуют отдельные науки, а не наука вообще как наука о действительном, однако каждая из них входит в мир беспредельный, но все-таки единый в калейдоскопе связей». Аналитический метод и выделение какой-то стороны предмета или явления — наиболее критикуемые стороны *научного метода познания*. Наука с самого начала стала отвлекаться от вопросов «почему?» и вопросов общего характера, занявшись исследованием «как» все происходит. Путь аналитического естествознания, заданный Ньютоном, превратил общие соображения в четко поставленную математическую задачу, и он, не вдаваясь в выяснение физической природы тяготения, решил ее разработанным им же математическим методом.

Ньютон писал: «Причину же этих свойств силы тяжести я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным выше законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря...». На склоне лет он сказал своему племяннику: «Не знаю, кем я кажусь миру, но самого себя я вижу всего лишь мальчишкой, играющим на берегу океана, который забавляется, выбирая то обкатанный камешек, то

технология и другие. Прикладные науки нацелены на разработку способов применения знаний, полученных в фундаментальных науках для удовлетворения жизни общества. Более 90% всех важнейших достижений научно-технического уровня сделаны в XX столетии. В настоящее время происходит *научно-техническая революция* — наука стала ведущей силой *технического прогресса*, изменяя жизнь и мировоззрение людей.

Объяснение явлений в *гуманитарных науках* не всегда позволяет подвести их под какой-либо общий закон, а определяющим оказывается *раскрытие целей, мотивов или намерений в поведении людей*. В средневековье политическая и духовная власть принадлежала религии, что сказало на понимании истины: наука должна была объяснять и доказывать теологические положения. В эпоху Возрождения произошел резкий скачок в развитии культуры. «Коперниканская революция» *ознаменовала начало современной науки*. В основе — признание материального единства мира, единства законов на небе и на Земле. Это означало уже отказ от представлений Аристотеля, канонизированных Ватиканом, и возможность изучать явления на Земле, чтобы выведенные из опытов выводы и закономерности были справедливы вне лаборатории (даже в космосе). Галилей начал ставить специальные опыты и обрабатывать их результаты математически — так в науку вошел эксперимент и математически сформулированный закон, создавалась *современная научная методология*. Математик и философ М.Клайн заключил: «Все, что планируется на основе развитой Ньютоном математической теории, действует безотказно. Сбои, если таковые случаются, обусловлены лишь несовершенством созданных человеком механизмов».

красивую раковину, в то время как необъятный океан истины простирается передо мною, уходя в неведомые дали».

Научный метод, независимо от конкретных приемов и способов исследования в разных научных дисциплинах, отражает единство всех форм знаний об окружающем мире. Исторически сложились общие требования к последовательности действий в труде; с появлением потребности получения знаний возникла потребность в анализе и оценке разных методов — *методология*. Можно сказать, что конкретные научные методы отражают тактику исследования, а общенаучные — стратегию.

Теории — основная форма научного знания. Теории разделяют на описательные, научные и дедуктивные. С содержательной стороны они состоят из эмпирического базиса и логического аппарата теории, а с формальной — это совокупность допущений, аксиом, постулатов, общих законов.

В *описательных* теориях, выделив группу явлений или объектов, формулируют общие закономерности на основе эмпирических данных. Эти теории носят качественный характер, так как не проводится логический анализ и корректность доказательств. Таковы первые теории в области электричества и магнетизма, физиологическая

теория И. Павлова, эволюционная теория Ч. Дарвина, современные психологические теории и т.п. В научных теориях конструируют идеальный объект, замещающий реальный. Обычно они основаны на нескольких аксиомах, принимаемых без доказательств, из которых логически выводятся остальные положения. Часто к основным аксиомам добавляют гипотезы. Следствия теории проверяются экспериментом. Таковы физические теории, использующие логику и достаточно строгий математический аппарат. Третий тип — это *дедуктивные* теории. Первая из них — «Начала» Евклида (сформулирована основная аксиома, потом к ней добавлены положения, логически выведенные из нее, и все доказательства проводятся на этой основе). В таких теориях разработан специальный формализованный язык, все термины которого подвергаются интерпретации.

Понятия и термины теории формируются в *процессах абстрагирования и идеализации*, используемых во всех теориях. *Понятия* отражают существенную сторону явлений, появляющуюся при обобщении исследования. При этом выделяется из целого объекта или явления только некоторая сторона его, понятие может быть сформировано на основе опыта или теории. Так, понятию «температура» может быть дано операционное определение (показатель степени нагретости тела в определенной шкале термометра), а может — с позиций молекулярно-кинетической теории (величина, пропорциональная средней кинетической энергии движения частиц, составляющих тело).

При *абстрагировании* игнорируют свойства объекта, которые считают несущественными. Таковы модели точки, прямой линии, окружности, плоскости, материальной точки и т.д. Реальные объекты могут в каких-то задачах быть заменены этими абстракциями. Землю при движении вокруг Солнца можно считать материальной точкой, но нельзя — при движении по ее поверхности.

При *идеализации* выделяют какое-то свойство или отношение, и возникающий в результате идеальный объект обладает только этим свойством или отношением. В науке важны общие закономерности, которые существенны и повторяются в различных предметах, поэтому приходится идти на отвлечение от реальных разных объектов. Таковы популярные модели «абсолютно черного тела», «идеального газа», «сплошной среды» и т.д.

Применяя теорию, необходимо вновь сопоставлять полученные и использованные идеальные и абстрактные модели с реальностью, т.е. исключать абстракции. Поэтому выбор абстракций должен соответствовать данной теории.

Наблюдения еще не связаны с какой-либо теорией, но формулировка вопросов вызвана какой-то проблемной ситуацией. Наблюдение предполагает наличие определенной программы исследования, какой-то *пробной гипотезы*, подвергаемой анализу и проверке. На наблюдениях и аналогиях строилась *натурфилософия*. Наблюдения и ныне — начальный источник информации, целенаправленный процесс восприятия предметов или явлений. Они используются там, где нельзя поставить прямой эксперимент, например, в вулканологии или космологии. Каждая наука использует свои методы познания мира в зависимости от характера решаемых задач. Сначала на опытной стадии

за систематическими наблюдениями следует специально поставленный *эксперимент*, в котором производятся *измерения*. *Сравнение и измерение* являются частными случаями наблюдения.

Как метод научного познания, анализ — одна из начальных стадий исследования, когда от цельного описания объекта переходят к его строению, составу, признакам и свойствам; он основан на мысленном или реальном расчленении предмета на части. *Синтез* основан на соединении различных элементов предмета в единое целое и обобщении выделенных и изученных особенностей объекта; результаты синтеза включаются в теорию объекта, определяющую пути дальнейших исследований. *Индукция* состоит в формулировании логического умозаключения на основе обобщений данных эксперимента и наблюдений. Эти обобщения рассматриваются как эмпирические законы. Логические рассуждения идут от частного к общему, обеспечивая лучшее осмысление и переход на более общий уровень рассмотрения проблемы. Индуктивный метод используется при решении задач, связанных систематизацией, классификацией, научным обобщением. *Дедукция* — метод познания, состоящий в переходе от некоторых общих положений к частным результатам. Этим методом выявляют конкретное содержание выдвинутых предположений или гипотез. Дедуктивный метод лежит в основе современных методологий (например, системного анализа). *Гипотеза* — это предположение или предсказание, выдвигаемое для разрешения неопределенной ситуации. Она должна объяснить или систематизировать некоторые факты, относящиеся к данной области знания или за пределами ее, но не должна противоречить уже существующим. С гипотезой имеет сходство *аналогия*. При количественном сопоставлении исследуемых свойств, параметров объектов или явлений, говорят о *методе сравнения*. В некотором смысле метод сравнения противоположен методу аналогии, поскольку выделяет отличия. Метод сравнения составляет основу любых *измерений*, т.е. основу всех экспериментальных исследований и науки в целом.

Гипотеза должна быть подтверждена или опровергнута. Процесс установления истинности гипотезы на опыте называют *верификацией*. Если опыт не опровергает гипотезу, должна быть выдвинута альтернативная. Так, гипотеза Планка о квантовом характере испускания света привела к созданию квантовой механики; гипотезы де Бройля (корпускулярно-волновой дуализм материи) и Бора (модель строения атома) обобщали многие факты и потом были подтверждены. Гипотеза Гельмгольца о дальнедействующем характере электрических явлений была опровергнута экспериментом Герца, обнаружившим ток смещения, отделившийся от источника тока. Это подтвердило введение Максвеллом тока смещения в уравнения поля из соображений симметрии.

Эксперимент, поставленный вслед за наблюдениями, выделяет интересующее явление среди других; предполагает опытное определение параметров исследуемых явлений или объектов. Галилей проверял гипотезы *экспериментом*, произвел *измерения и обработал результаты математически*. Измерения позволяют поставить в соответствие физическим величинам некоторые числа. С той

поры, названной Новым временем, сами эксперименты усложнились технически, измерения проводятся более точно, их результаты обрабатываются специальными вычислительными приемами. И многие науки изменили свой облик. Из предварительной гипотезы путем логики выводят следствия, которые и проверяются с помощью наблюдений и экспериментов. Но все измерения проводятся с определенной точностью, и, как выяснилось в XX в. при изучении микромира, не всегда ее можно повысить и не всегда условия эксперимента можно точно повторить. Меняется и понятие средней величины. Если над телами сложно или невозможно провести эксперимент, все чаще используются *ковенными экспериментами*.

Создание моделей — в основе многих научных концепций, адекватность моделей подтверждается опытом или практикой. Моделирование обычно упрощает изучаемое природное явление, касаясь лишь части его сторон. Иначе, по мнению одного из основоположников кибернетики, английского математика А.Тьюринга, сложность изучения идентичной объекту модели будет соответствовать сложности самого объекта исследования. *Физическое моделирование* опыта широко применяется в гидро- и аэродинамике, где разработаны соотношения подобия для тех или иных потоков. Помимо модельного эксперимента проводят в таких случаях *мысленный эксперимент*. В таких экспериментах оттачивается представление об идеальной модели явления, и они имели место в рассуждениях Галилея, Ньютона, Эйнштейна. Распространено и *математическое моделирование*, предполагающее формирование систем уравнений, описывающих исследуемое природное явление, и их решение при различных начальных или граничных условиях. В последнее время в эти уравнения вводят вероятностные оценки некоторых параметров, изменяемые случайным образом. Такие уравнения решают с помощью компьютерной техники и получают численные результаты. Иногда эти методы называют *вычислительным экспериментом* или *имитационным математическим моделированием*.

Обращение к теории как к более высокому уровню научного исследования завершает научные исследования. На этой стадии прибегают к *формированию понятий и абстракций*, строят теории и новые гипотезы и, проверяя экспериментально выводы из них, приходят к формулировке законов природы. Но не всякое подтверждение гипотезы опытом подтверждает ее истинность. Поэтому необходимо найти много следствий гипотезы или теории, которые подтверждаются опытом (рис.1)*. *В естествознании результаты эксперимента — решающий аргумент признания теории*. В основе методов естествознания — *единство эмпирической и теоретической сторон*. Они взаимно связаны и взаимообусловлены. Методы разделяют на три группы:

1. **Общие методы**, касающиеся любой науки, фактически общеприродные методы познания природы. Эти методы могут связывать все стороны процесса познания (например, единство логического и исторического или восхождения от абстрактного к конкретному).

2. **Особенные методы** связаны лишь с какой-то одной стороной изучаемого предмета (например, анализ, синтез, дедукция, индукция, измерение, сравнение, эксперимент).

3. **Частные методы** — это специальные методы, действующие в определенной области знаний. Но в развитии науки научные методы могут переходить из одной группы методов в другую.

Например, многие частные методы физики перешли к другим областям знаний и привели к созданию биофизики, физической химии, геофизики, астрофизики и др. Многие методы химии используются как в биологии, так и в физике. Законы термодинамики дали основу понимания хода химических реакций. Впоследствии термодинамика охватила теорию упругости, учение об электричестве и магнетизме, возникла теория электролитической диссоциации. Создание молекулярной биологии, изучающей проявление жизни на молекулярном уровне, отражает понимание того, что многие важные процессы, считавшиеся монополией биологии (дыхание, ощущение, раздражение), являются химическими процессами. Химическую природу имеет и процесс деления клетки, но жизнь не сводится к физико-химическим процессам. Физики расшифровали рентгенограммы молекулы ДНК и сумели проникнуть в самые сложные тайны жизни.

Статистические методы, позволяющие получить средние значения измеряемых величин для общей характеристики изучаемых явлений, приобрели большое значение. Изобретение дифференциального и интегрального исчисления Ньютоном и Лейбницем, развитие методов статистической обработки результатов опыта способствовали освоению приложений математики во всех областях естествознания. Была «непостижима» эффективность применения математики, но по ее законам были «на кончике пера» открыты планеты Нептун и Плутон, ток смещения в уравнениях Максвелла, электромагнитная природа света, нестационарность модели Вселенной А.Фридмана и обнаружение красного смещения в спектрах далеких галактик и многое другое. Многочисленные философские дискуссии вызывает природа таких *математических предсказаний реальности*.

Развитие математики и появление ЭВМ позволили решать невероятно сложные нелинейные уравнения теории с огромным числом взаимосвязанных параметров. Такие уравнения описывают *сложные системы*, более реальные, чем идеальные модели классической науки. Созданы совершенно новые разделы математики — кибернетика, теория катастроф и др. И от статических моделей систем, находящихся почти в равновесии, переходят к моделированию сложных систем в далеких от равновесия состояниях. Широко используются понятия случайности, вероятности, выбора варианта развития, эволюции, скачкообразных переходов. Необратимость процессов, существование обратных связей и нелинейность стали главными доминантами современного описания процессов.

Системный метод все шире используется, когда каждое явление или предмет рассматривается как часть целостного организма. Взаимодействие частей друг с другом придает системе свойства, которых нет у ее отдельных элементов. Это свойство систем называют *эмерджентностью*.

* Все рисунки помещены в приложении (с.262).

тностью, и оно фактически является определяющим для системы. Все компоненты системы находятся в тесной взаимосвязи. Совокупность этих взаимосвязей и взаимодействий, обеспечивающая возникновение целостных свойств всей сложной системы называют ее *структурой*. Выделение системы от других, с которыми она взаимодействует непосредственно, приводит к *понятию окружающей среды*. Важное свойство систем — иерархичность любого системного образования, т.е. существование различных взаимосвязанных структурных уровней рассмотрения систем. Строение системы определяется ее компонентами — подсистемами и элементами. Так, живой организм состоит из пищеварительной, нервной, дыхательной и других подсистем; подсистемы — из органов, органы — из тканей, ткани — из клеток, клетки — из молекул. По подобному иерархическому принципу построены многие системы.

Третьим важнейшим свойством систем является их *открытость*, т.е. степень связанности с внешней средой. Все реальные системы в природе являются *открытыми*, т.е. взаимодействующими с окружающей средой путем обмена веществом, энергией или информацией. Последний обмен имеет место в живых, социально-экономических и других системах. При полном отсутствии связей с окружающей средой говорят о том, что система изолирована, и никакое взаимодействие с ней невозможно в принципе. Поскольку это представление абстрактно, можно говорить лишь о степени изолированности системы от окружающей среды. Если внешний мир влияет на систему, но система не откликается на внешнее воздействие, ее называют *закрытой*. Полная определенность и предсказуемость описания и поведения систем характеризуется *детерминированностью*. Это свойство является некоей удобной при расчетах идеализацией, поскольку все явления обладают стохастичностью (вероятностным характером протекающих процессов).

Стационарность — следующее важное свойство систем. Стационарны системы, параметры которых не меняются во времени. Но таких систем в природе тоже не бывает (за исключением внутренних областей звезд типа черных дыр), поэтому определяют интервал времени, в течение которого система может считаться стационарной. Большинство систем являются нестационарными. *Устойчивость* отражает свойство системы возвращаться в равновесное состояние после прекращения внешних воздействий. Это свойство может исчезать при изменении внешних условий или самой системы. Поэтому приобрело большое значение определение границ устойчивости систем. Вблизи этих границ система находится в *неравновесном состоянии*, что может служить одним из условий возникновения в ней перестройки и появления *самоорганизации* и являться, в свою очередь, основой для *системной эволюции*. При различных нестационарных процессах может проявляться свойство систем — колебательность, или способность систем к периодическому изменению своих параметров при приближении к новому состоянию. В некотором роде это свойство связано с консерватизмом систем. Свойство систем сопротивляться воздействию окружающей среды характеризуется *инерционностью*. Инерционность отра-

жает консерватизм природы и присуща всем системам, хотя и в разной степени. Мерой инерционности в механике служит масса, в электродинамике — индуктивность, в биологии — наследственность. Эти последние два свойства выделяются как динамические среди прочих общесистемных свойств.

Фундаментальная роль системного подхода в его *междисциплинарности*, с его помощью единство знания достигается наиболее полно. Системный подход обеспечивает рассмотрение проблемы как бы сверху, с более высокого уровня системной иерархии. Он дает путь решения сложной проблемы исходя из рассмотрения ее как системы в целом во взаимосвязи ее с другими проблемами и большим числом внешних и внутренних связей. Это позволяет выбрать наиболее оптимальный путь решения среди прочих, реализуя общенаучный метод дедукции — от общего рассмотрения сложной проблемы к частному оптимальному ее решению. Возможность использовать общий подход к процессам управления в системах различной природы не нова, этим занимается *кибернетика*. В ней создан мощный аппарат количественного описания процессов, основанный на методах *теории информации, теории динамических систем, теории алгоритмов и теории вероятностей*. Рассмотрение управляемых систем в развитии изменило подходы к их изучению. Управляющие воздействия могут переводить управляемую систему в одно из возможных состояний, появляется выбор возможного изменения, а потенциальной возможностью к управлению обладают организованные системы. Так, на первый план вышли проблемы *устойчивости систем, наличие прямых и обратных связей*. О важности проблем (проблем стратегических), решаемых методами системного анализа, свидетельствует факт организации в РАН специального Института системного анализа. Использование системного подхода не только в естествознании, но и в общественных науках имеет большое *мировоззренческое* значение.

«**Попытка понять Вселенную** — одна из вещей, которые приподнимают человеческую жизнь над уровнем фарса и придают ей черты высокой трагедии», — писал американский физик, лауреат Нобелевской премии Стивен Вайнберг. Потому проблемы мироздания так притягивают к себе, заставляя разбираться в огромном числе разных фактов, наблюдений и связывать их воедино. Фундаментальная наука влечет людей по разным причинам. Это и наслаждение удовлетворением собственного любопытства, и осознание своего вклада в человеческую культуру, и священное чувство приобщения к великому наследию многих поколений великих ученых.

Культурная ценность науки — основной движущий мотив труда ученых. Потребность создать гармоничную картину мира и осознать свое место в нем имеет всеобщий универсальный характер. Ради этой цели общество выбрало путь рационального объяснения природы. Сам процесс научной работы, изучение экзотических и казалось бы далеких от нас областей микро- и макромира отражает рационалистический подход к восприятию мира, присущий обществу. Открываются удивительные взаимосвязи: в далеком космосе найдены органические молекулы, а изучение нейтринных пучков, получаемых на ускорителях,

меняет взгляды на эволюцию Вселенной. Они показывают единство мира природы. Эти представления являются общими для разных культур, основы их идут от философов Древней Греции — Природа экономна, в ней действуют единые законы. Представление об единстве науки способствовало укреплению веры в единство человечества.

Понимания Вселенной мы, возможно, могли бы достичь, если бы сумели свести наблюдаемые факты к простейшим понятиям, пользуясь небольшим числом фундаментальных частиц и фундаментальных взаимодействий, в которые они могли бы вступать.

Глава 2. РАЗВИТИЕ НАУКИ, ПАНОРАМА ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

2.1. НАУЧНЫЕ ПРОГРАММЫ, НАУЧНЫЕ РЕВОЛЮЦИИ И НАУЧНЫЕ КАРТИНЫ МИРА

Понятие «научной программы» сформировалось в методологии науки. Научная программа (НП), включающая в себя систему единых принципов, претендует на всеобщий охват и объяснение всех явлений. В отличие от философской системы она определяет не только характеристику предмета исследования, но и возможность методов проверки заявленных принципов, без чего они не станут теорией. Во всякой теории много допущений, принимаемых на веру, причем их изменения могут вызвать пересмотр или даже отмену теории. Ф.Энгельс писал: «...философия каждой эпохи располагает в качестве предпосылки определенным мыслительным материалом, который передан ей предшественниками». НП связывают *научные картины мира* (НКМ) с умонастроениями в обществе, *задают идеал научного объяснения и организации знания*, положения, которые считают доказанными или достоверными. Связь эволюция науки с материальной и духовной культурой общества отражена в том, что *научные революции* не вытекали из логики развития науки. Изменение НКМ и НП перестраивают весь стиль научного мышления и вызывают изменения в характере научных теорий.

Например, первая теория эволюции была выдвинута Ламарком за 50 лет до Дарвина, но в науке не укрепилась и не потому, что была слабо доказательна. Причина — в неподготовленности умов к ее восприятию. Видимо, по этой же причине трагичны судьбы многих ученых (М.В.Ломоносова, Л.Больцмана, К.Э.Циолковского, Н.И.Вавилова).

Сложившиеся в науке представления оказывают через мировоззрение влияние на жизнь общества. Исследование трансформации НП при смене культур важно для развития и общества, и науки.

Первые научные программы сформировались в Древней Греции с VI по III вв. до н.э. и надолго определили развитие науки. К ним относятся *математическая, континуальная и атомистическая* НП. Каждая программа формировалась в несколько этапов.

Математическая — выросла из философии Пифагора и Платона. Вторая — началась с Аристотеля, с его физической школы перипатетиков и просуществовала до науки Нового Времени, т.е. почти двадцати веков. Атомистическая программа, идущая от представлений Демокрита и Эпикура, стала активно развиваться после XVII в. Но ранние пифагорейские представления отличны от программы Платона. Эти изменения связаны с развитием общества за 300 лет, за это время произошел перелом в мышлении, связанный с философией эгейской школы, когда возникли первые (из

известных нам) попытки *критики оснований знания*. Изменения в социальной жизни Эллады существенно повлияли на общемировоззренческие ориентиры ученого, на его понимание природы и места человека в ней, а отсюда и на научное мышление, на методы исследований и формирование идеалов и норм научного познания. Этический индивидуализм («индивидуум» — латинский перевод греческого «атом») и естественно-научный атомизм в XVII–XVIII в.в. воспринимались как две стороны одного мировосприятия: самостоятельные индивиды (атомы, корпускулы) управляются механическим образом и регулируются жесткими внешними законами. И механическая картина мира с законом тяготения Ньютона рассматривалась экономистами как природное обоснование экономических учений. Так, Адам Смит считал, что частнопредпринимательский интерес соответствует моральной гравитации.

Поскольку материальный мир един и подчиняется простым законам, не имеет цели развития, не способен ставить цели человеку, то и человек обретает свободу выбора цели сам. И наибольшей ценностью данной программы обладало ее нравственное значение, а вовсе не эффективность решения научных или практических задач. В мире атомистической программы человек мог свободно действовать, отвечая за последствия своих деяний, он стал полноправным хозяином вещей. Идея механистичности природы связана у Р.Бойля, Р.Декарта и других мыслителей и ученых XVII в. с признанием уникальности человека и ответственности его как единственного сознательного начала в природе. Именно человеку и вменена «обязанность» заботы о спасении и дано право — познавать природу и господствовать над нею. Эта позиция отвечала потребностям материального производства периода раннего капитализма, она формировала иное поведение и обосновывала его.

Научная картина мира (НКМ) — общая система представлений и понятий в процессе формирования естественно-научных теорий. Наука античности особо ценила математику, но считала ее применимой только к «идеальным» небесным сферам, а для описания земных явлений использовала качественные «правдоподобные» описания. Обращение к опыту подразумевало и иное, более активное отношение к природе. Вселенная классической науки стала объединяться едиными законами движения, к механике сводились все процессы в мире, из научного мирозерцания были изгнаны «цели» и «целеполагания», понятия механики приобрели общезначимость.

Переход к экспериментальному естествознанию и математическая обработка результатов экспериментов позволили Галилею открыть законы падения тел, отличные от аристотелевых. Опора на полученные из наблюдений результаты изменила представления о движении и на небе — Кеплер открыл новые законы движения планет. Создание математического анализа позволило Ньютону сформулировать строго законы механики и закон всемирного тяготения. Он писал: «Как в математике, так и в натуральной философии исследование трудных предметов методом анализа всегда должно предшествовать методу соединения. Такой анализ состоит в производстве опытов и наблюдений, извлечении общих заключений из них посредством индукции и недопущении иных возражений против заключений, кроме полученных из опыта или других достоверных истин. Ибо гипотезы не должны рассматриваться в экспериментальной философии... Путем такого анализа мы можем переходить от соединений к ингредиентам, от движений — к силам, их производящим, и вообще от действий — к их причинам, от частных причин — к более общим, пока аргумент не закончится наиболее общей причиной». И механика стала основной доминантой естествознания.

Механическая картина мира (МКМ) фактически создана трудами Галилея, Кеплера, Гюйгенса, Ньютона. Главной задачей Ньютона и был «синтез системы мира». Положенная в основу его труда механика давала научное объяснение природы. Для Ньютона было важно не только доказать правдоподобность идей Коперника на основе наблюдений, как Гюйгенс и Кеплер, а *математически обосновать предпосылки всей системы*, что делало ее «абсолютно достоверной». В «Началах», как видно уже из названия, Ньютон ориентировался на аксиоматический метод Евклида, только у него вместо аксиом — *принципы, управляющие явлениями природы*. Ньютон уходил от причин тяготения, от гипотез «о скрытых качествах», заменяя эти натурфилософские размышления результатами эксперимента. И описание движения было сведено к математическому: знание координат и скоростей тел в начальный момент по уравнениям движения определяло динамику в последующие моменты. Три закона механики Ньютона управляют движениями объектов, заполняющих пространственно-временную сцену. Пространство трехмерно и евклидово, и траектории тел — элементы геометрии Евклида. Время и пространство у Ньютона — абсолютны, не оказывают влияния на тела, размещенные в них. Сила тяготения распространяется в пространстве с бесконечной скоростью и не меняет ход времени. Можно было предсказать и прошлое, и будущее динамическое состояние системы, так как замена знака времени в уравнениях Ньютона не оказывает влияния на движение. Уравнения динамики Ньютона линейны, действие равно противодействию; интенсивность следствия определяется интенсивностью причины. Поэтому все в мире предопределено, строго *детерминировано*. Когда Ньютон сформулировал свою первую в истории научную картину мира, этого термина еще не существовало, но он имел его в виду,

называя свой труд «натуральная философия». Это была первая научная теория в современном смысле, поэтому 1689 г. часто называют годом рождения современного естествознания*.

В рамках МКМ построена космогония солнечной системы, открыты законы взаимодействия электрических зарядов и взаимодействия точечных магнитных полюсов. Лаплас строил небесную механику и «молекулярную» механику, но при построении последней ему приходилось вводить гипотезы, вводить силы притяжения и отталкивания. Такая универсальная механика присутствовала в курсе физики, написанном Лапласом и Био, продолжал ее строить и Ампер. Ломоносов с помощью кинетической теории объяснял упругие свойства газов. Под влиянием идей Ньютона Адам Смит пришел к научному обоснованию теории стоимости. В течение XVIII в. механика Ньютона была приведена в стройную систему, были разработаны методы вычисления (строгие и приближенные) задач движения. Л.Эйлер, Ж.Даламбер, Ж.Л.Лагранж сделали механику аналитической (1788 г.), обладающей строгостью математического анализа. Понятие МКМ существенно расширилось. Закон сохранения и превращения энергии вышел далеко за пределы механики. Лаплас и Лавуазье считали, что теория теплоты должна строиться на принципе сохранения «живых сил». Концепция Лапласа о полной детерминированности явлений природы — основа мировоззрения многих естествоиспытателей — вызвала впоследствии критику. По мнению Герца, принципы механики дают «простейшую картину». Тенденция свести все виды движения к механическому стала называться механицизмом и привела к метафизическому мышлению.

Электромагнитная картина мира (ЭКМ) основана на идее *динамического атомизма* и континуальном понимании материи и связанным с ним понятием *близкодействия*, которое внес Фарадей. Уравнения Максвелла отразили эти идеи и привели к понятию *поля* без построения механических корпускулярных моделей. Попытку соединить идеи поля и частиц электронов предпринял Лоренц, но возникла проблема эфира. После создания специальной и общей теории относительности (СТО и ОТО) ожидали, что всеобщий охват мира природы способна дать *электродинамическая картина мира*, соединявшая их с теорией Максвелла и механикой. Свойства пространства-времени стали зависеть от распределения и движения масс, т.е. стали относительными. Понятие поля стало универсальным, структуру поля стали отождествлять со структурой Вселенной. На основании понятия поля старались единообразно описать все взаимодействия в природе. Сочетанием непрерывности и дискретности отличалась модель атома Бора (1913 г.).

Квантово-полевая картина мира (КПКМ) отразила открытия, связанные со строением вещества и взаимосвязью вещества и энергии. Изменились представления о причинности, роли наблюдателя, самой материи, времени и пространстве. Во Вселенной, подчиненной законам квантовой гравитации, кривизна пространства-времени и его структура должны флуктуировать, так как квантовый

* Толчком к развитию физики как науки послужило использование законов природы в практической деятельности и технике.

мир никогда не находится в покое. Поэтому понятия прошлого и будущего, последовательность событий в таком мире тоже должны быть иными. Эти изменения пока не все обнаружены, так как квантовые эффекты проявляются в исключительно малых масштабах. Теория квантовой гравитации должна была соединить ОТО и квантовую механику, и хотя такой синтез пока осуществить не удалось, на этом пути было открыто много нового и интересного.

Основная цель картин мира — объяснение и истолкование фактов и теорий, тогда как одной из целей теорий является описание опытных фактов. Планк считал, что НКМ «служит лишь средством связи между реальным миром и чувственными восприятиями естествоиспытателя», большое значение ей придавали А.Эйнштейн, Дм.Менделеев, В.И.Вернадский и другие ученые. Более

широко НКМ понимали как мирозерцание. В этом случае НКМ отождествляли с философскими учениями о мире в целом. До середины XX в. под картиной мира понималось представление о природе в целом, составленное на основании достижений физики.

Современная, эволюционная картина мира отражает появление междисциплинарных подходов и технические возможности описания состояний и движений сложных систем, позволившие рассматривать единообразно явления живой и неживой природы. Синергетический подход ориентируется на исследование процессов изменения и развития. Принцип самоорганизации позволил изучать процессы возникновения и формирования новых, более сложно организованных систем. Современная картина мира включает естественно-научное и гуманитарное знание.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ НАУЧНАЯ ПРОГРАММА В РАЗВИТИИ

Математическая программа выросла из философии Пифагора и Платона, она начала развиваться уже в античные времена. В основе программы лежит представление о Космосе как упорядоченном выражении начальных сущностей, которые могут быть разными. Для Пифагора это были *числа*.

Арифметика трактовалась в раннем пифагореизме как центральное ядро всего космоса, а геометрические задачи — как задачи арифметики целых, рациональных чисел, геометрические величины как соизмеримые. Как заметил Ван дер Верден, «логическая строгость не позволяла им допускать даже дробей, и они заменяли их отношением целых чисел». Постепенно эти представления привели к *возвышению математики как науки высшего ранга*. Поздний пифагорец, Архит писал: «математики прекрасно установили точное познание, и потому вполне естественно, что они правильно мыслят о каждой вещи, какова она в своих свойствах.... Они передали нам ясное и точное познание о скорости (движении) звезд, об их восхождениях и захождениях, а также о геометрии, о числах, о сфере и в особенности о музыке». Картина мира гармонична: протяженные тела подчинены геометрии, небесные тела — арифметике, построение человеческого тела — канону Поликлета.

Переход от наглядного знания к *абстрактным принципам*, вводимым мышлением, связывают с Пифагором. Софисты и элеаты, разработавшие системы доказательств, стали задумываться над проблемами отражения мира в сознании, так как ум человека влияет на его представление о мире. Платон отделил мир вещей от мира идей — мир вещей способен только подражать миру идей, построенному иерархически упорядоченно. Он утверждал: «необходимо класть в основу всего число». Мир идей создается на основе математических закономерностей по божественному плану, и по этому пути математического знания об идеальном мире пойдет наука. Открытие несоизмеримости стороны квадрата и его диагонали, иррациональности чисел нанесло серьезный удар не только античной математике, но и космологии, теории музыки и учению о симметрии живого тела.

Математики стали задумываться над *основаниями своей теории*. Ее основой выбрали *геометрию*, сумевшую представить отношения, невыразимые с помощью арифметических чисел и отношений. Геометрия Платона — «наука о том, как выразить на плоскости числа, по природе своей неподобные. Кто умеет соображать, тому ясно, что речь идет здесь о божественном, а не о человеческом чуде». Евдокс сформулировал *теорию пропорций* и ее приложения к геометрии. Он пришел к изучению сложных форм несоизмеримости с помощью беспредельного уменьшения остатков. Как позже писал Евклид: «Новое, более широкое понимание пропорций означало, что здесь, по сути дела, закладываются новые основания математики, новые представления об ее исходных понятиях, где иррациональные величины уже охвачены ими». Геометрия Евклида определила во многом структуру всей науки. Исходные понятия — точка, прямая, плоскость, на них построены «идеальные объекты второго уровня» — геометрические фигуры. При этом исходные понятия задаются системой аксиом.

Галилей и Ньютон создавали *классическую физику* по образцу «Начал» Евклида. Они сохранили *системность и иерархичность*. Частицы и силы — «первичные идеальные объекты», заданные в рамках определенного раздела науки. С XVII в. утвердился взгляд на научность (достоверность, истинность) знания как на степень его математизации. «Книга природы написана на языке математики», — писал Галилей. Математический анализ, развитие статистических методов анализа, связанных с познанием вероятностного характера протекания природных процессов, способствовали проникновению методов математики в другие естественные науки. И.Кант писал: «в любом частном учении о природе можно найти науки в собственном смысле лишь столько, сколько в ней имеется математики». Уравнения Максвелла оказались «умнее автора», показав, что свет есть волна электромагнитная. Специальная и общая теории относительности Эйнштейна опираются на новое представление о пространстве и времени. Продолжением их являются многочисленные *программы «геометризации»* различных физических полей по образцу гравитационного, по созданию многомерных пространств, в связи с чем появляются и различные обобщения римановой геометрии.

Главное достоинство математики в том, что она может служить как *языком естествознания*, так и *источником моделей* природных процессов. Хотя модели несколько односторонни и упрощены, они способны отразить суть объекта. Одна модель может успешно применяться в разных предметных областях, и потому в наше время эвристические возможности возрастают. А в чем «*непостижимая эффективность математики*» в естественных науках — вопрос дискуссионный. Использование ЭВМ для облегчения умственного труда подняло метод моделирования на уровень наблюдения и эксперимента как основных средств познания. Среди всех преобразователей информации (зеркало, фотоаппарат, поэтический текст...) ЭВМ при работе

с любыми входными воздействиями перед совершением операции приводит их к «одному знаменателю», представляя их в виде конечности последовательности цифр — *информационной модели*. Появились возможности оптимизировать сложные системы и уточнять цели и средства реконструкции действительности. *Кибернетика* дает новое представление о мире, основанное на связи, управлении, информации, вероятности, организованности, целесообразности. Вихрь компьютеризации захватывает все новые территории, но может ли компьютеризация биологии, к примеру, сделать ее дедуктивной наукой (наподобие физики)? Или лишь увеличит информационный шум?

2.3. ПОНЯТИЯ «НАУЧНАЯ ПАРАДИГМА» И «НАУЧНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ»

Научные парадигмы — это совокупность предпосылок, определяющих данное конкретное исследование и признанных на данном этапе развития науки. Они связаны с общепарадигматической направленностью. Понятие парадигмы появилось в работе Т.Куна «Структура научных революций». В переводе оно означает — «образец», совокупность признанных всеми научными достижениями, определяющих в данную эпоху модель постановки научных проблем и их решение. Это — образец создания новых теорий в соответствии с принятыми в данное время. В рамках парадигм формулируются общие базисные положения, используемые в теории, задаются идеалы объяснения и организации научного знания. Работа в рамках парадигмы способствует уточнению понятий, количественных данных, совершенствованию эксперимента, но и позволяет выделить явления или факты, которые не укладываются в данную парадигму и могут послужить основой для новой.

Задачи ученого: наблюдение, фиксация сведений о явлениях или объектах, измерения или сравнение параметров явлений с другими, постановка экспериментов, формализация результатов — до создания соответствующей теории. Ученый собирает новую конкретную информацию, перерабатывает, рационализирует и выдает в виде законов и формул, и это не связано с его личными взглядами по политическим или философским вопросам. Наука решает конкретные проблемы, т.е. претендует на частное познание мира; результаты науки требуют экспериментальной проверки или подвержены строгому логическому выводу. *Научные истины общезначимы*, не зависят от интересов определенных слоев общества. Но парадигмы функционируют в рамках научных программ, а научные программы — в рамках культурно-исторического целого. И это культурно-историческое целое определяет ценность той или иной проблемы, каким способом предпочтительней эти проблемы решать, и какова позиция государства и общества по отношению к запросам ученых.

Научное знание постоянно изменяется по своему содержанию и объему, обнаруживаются новые факты, рождаются новые гипотезы, создаются новые теории, которые приходят на смену старым. Происходит *научная революция* (НР). Существует несколько моделей развития науки:

1. История науки — поступательный, кумулятивный, прогрессивный процесс.

2. История науки как развитие через научные революции.

3. История науки как совокупность частных ситуаций (кейс-стадис).

Первая модель соответствовала процессу накопления знаний, когда предшествующее состояние науки подготавливает последующее состояние; идеи, не соответствующие основным представлениям считались ошибочными. Эта модель была тесно связана с позитивизмом, с работами Э.Маха и П.Дюгема, и она долгое время была ведущей.

Вторая модель основана на идее *абсолютной прерывности* развития науки, т.е. после НР новая теория принципиально отличается от старой и развитие может пойти совсем в ином направлении. Т.Кун отметил, что гуманитарии спорят больше по фундаментальным проблемам, а естественники обсуждают их столь много только в кризисные моменты в своих науках, а в остальное время они спокойно работают в рамках, ограниченных фундаментальными законами, и не раскачивают фундамент науки. Ученые, работающие в одной парадигме, опираются на одни и те же правила и стандарты, тем самым наука — есть комплекс знаний соответствующей эпохи. Парадигму, по его словам, составляют «признанные всеми научные достижения, которые в течение определенного времени дают модель постановки проблем и их решений научному сообществу». Это содержание попадает в учебники, проникает в массовое сознание. *Цель нормального развития науки* — увязать новые факты и их объяснение с парадигмой. Парадигма обуславливает постановку новых опытов, выяснение и уточнение значений конкретных величин, установление конкретных законов. Наука становится более точной, накапливается новая подробная информация, и только выдающийся ученый может распознать какие-то аномалии. Кун и назвал смену парадигмы — «*научной революцией*».

Пример — переход от представлений мира по Аристотелю к представлениям Галилея–Ньютона. Этот скачкообразный переход непредсказуем и неуправляем, рациональная логика не может определить, по какому пути будет далее развиваться наука и когда свершится переход в новое мировоззрение. В книге «Структура научных революций» Т.Кун пишет: «Приходится часто слышать, что сменяющие друг друга теории все более приближаются к истине, все лучше ее аппроксимируют... У меня нет сомнений в том,

что ньютоновская механика усовершенствовала аристотелеву, а эйнштейновская — ньютонову как средство решения конкретных задач. Однако я не могу усмотреть в их чередовании никакого последовательного направления в развитии учения о бытии. Наоборот, в некоторых, хотя, конечно, не во всех отношениях общая теория относительности Эйнштейна ближе к теории Аристотеля, чем любая из них к теории Ньютона».

Третья модель развития науки была предложена британским философом и историком науки И.Лакатосом. Научные программы (НП) имеют некоторую структуру. Неопровержимые положения — «ядро» НП; оно окружено «защитным поясом» из гипотез и допущений, которые позволяют при некотором несоответствии опытных данных теориям из «ядра» сделать ряд предположений, объясняющих это несоответствие, а не подвергать сомнению основные теории. Это «негативная эвристика». Есть и «позитивная эвристика»: набор правил и предположений, которые могут изменять и развивать «опроверженные варианты» программы. Так происходит некоторая модернизация теории, сохраняющая исходные принципы и не меняющая результатов экспериментов, а выбирает путь изменения или корректировки математического аппарата теории, т.е. сохраняет устойчивое развитие науки. Но когда эти защитные функции ослабеют и исчерпают себя, данная научная программа должна будет уступить место другой научной программе, обладающей своей позитивной эвристикой. Произойдет НР. Итак, развитие науки происходит в результате конкуренции НП.

Понятие научной революции (НР) содержат обе концепции развития науки. В приложении к развитию науки оно означает изменение всех ее составляющих — фактов, законов, методов, научной картины мира. Поскольку факты не могут быть изменяемы, то речь идет об изменении их объяснения.

Так, наблюдаемое движение Солнца и планет может быть объяснено и в схеме мира Птолемея, и в схеме Коперника. Объяснение фактов встроено в какую-то систему взглядов, теорий. Множество теорий, описывающих окружающий мир, могут быть собраны в целостную систему представлений об общих принципах и законах устройства мира или в единую научную картину мира. О природе научных революций, меняющих всю научную картину мира, было много дискуссий.

Концепцию перманентной революции выдвинул К.Поппер. В соответствии с его принципом фальсифицируемости только та теория может считаться научной, если ее можно опровергнуть. Фактически это происходит с каждой теорией, но в результате крушения теории возникают новые проблемы, и прогресс науки и составляет движение от одной проблемы к другой. Целостную систему принципов и методов невозможно изменить даже крупным открытием, поэтому за одним таким открытием должна последовать серия других открытий, должны радикально измениться методы получения нового знания и критерии его истин-

ности. Это значит, что в науке важен сам процесс духовного роста, и он важнее его результата (что важно для приложений). Поэтому проверочные эксперименты ставятся так, чтобы они могли опровергнуть ту или иную гипотезу. Как выразился А.Пуанкаре, «если установлено какое-нибудь правило, то прежде всего мы должны исследовать те случаи, в которых это правило имеет больше всего шансов оказаться неверным».

Решающим называют эксперимент, направленный на опровержение гипотезы, поскольку только он может признать эту гипотезу ложной. Может быть, в этом основное отличие закона природы от закона общества. Нормативный закон может быть улучшен по решению людей, и если он не может быть нарушен, то он бессмыслен. Законы природы описывают неизменные регулярности, они, по выражению А.Пуанкаре, — есть наилучшее выражение гармонии мира.

Итак, основные черты научной революции: 1) необходимость теоретического синтеза нового экспериментального материала; 2) коренная ломка существующих представлений о природе в целом; 3) возникновение кризисных ситуаций в объяснении фактов. По своим масштабам научная революция может быть частной, затрагивающей одну область знания; комплексной — затрагивающей несколько областей знаний; глобальной — радикально меняющей все области знания. Глобальных научных революций в развитии науки считают три. Если связывать их с именами ученых, труды которых существенны в этих революциях, то это — аристотелевская, ньютоновская и эйнштейновская.

Некоторые ученые, считающие началом научного познания мира XVII в., выделяют две: 1) научную революцию, связанную с трудами Н.Коперника, Р.Декарта, И.Кеплера, Г.Галилея, И.Ньютона и 2) научно-техническую революцию XX в., связанную с работами А.Эйнштейна, М.Планка, Н.Бора, Э.Резерфорда, Н.Винера, появлением атомной энергии, генетики, кибернетики и космонавтики.

В современном мире прикладная функция науки стала сравнима с познавательной. Практические приложения знаний человек использовал всегда, но они долгое время развивались независимо от науки. Сама наука, даже и возникнув, не была ориентирована на сознательное применение знаний в технической сфере. С Нового Времени в Западной культуре стали развиваться (и все более интенсивно) практические приложения науки. Постепенно естествознание стало сближаться, а затем и преобразовываться в технику, причем стал развиваться систематический подход к объектам с такими же, как и в науке, подходами — математикой и экспериментом. В течение нескольких столетий возникала и потребность специального осмысления роли техники в связи с ростом ее роли в культурном прогрессе человечества в XIX–XX вв. Уже около века существует как самостоятельное научное направление «философия техники». Но не только технику создавал человек, но и техника меняла своего творца.

2.4. ОЦЕНКИ НАУЧНЫХ УСПЕХОВ И ДОСТИЖЕНИЙ

Ученых в служении миру и прогрессу объединяют общие принципы познания законов природы и общества, хотя наука в XX в. сильно дифференцирована. Крупнейшие достижения человеческого разума обусловлены обменом научной информацией, переносом результатов теоретических и экспериментальных исследований из одной области в другую. От сотрудничества ученых разных стран зависит прогресс не только науки и техники, но и человеческой культуры и цивилизации в целом. Феномен XX в. в том, что число ученых за всю предшествующую историю человечества составляет лишь 0,1 от работающих в науке сейчас, т.е. 90% ученых — наши современники. И как оценить их достижения? Различные научные центры, общества и академии, многочисленные научные комитеты разных стран и различные международные организации отмечают научные заслуги ученых, оценивая их личный вклад в развитие науки и значение их научных достижений или открытий. В настоящее время существует множество критериев для оценки важности научных работ. Конкретные работы оценивают по количеству ссылок на них в работах других авторов или по числу переводов на другие языки мира. При таком методе, который имеет много недостатков, существенную помощь оказывает компьютерная программа по «индексам цитируемости». Но такие методы не позволяют увидеть «леса за отдельными деревьями». Существует и система наград — медалей, премий, почетных званий в каждой стране и в мире.

Среди самых престижных научных наград — премия, учрежденная 29 июня 1900 г. Альфредом Нобелем. По условиям его завещания премии должны присуждаться раз в 5 лет лицам, сделавшим в предшествующем году открытия, внесшие принципиальный вклад в прогресс человечества. Но стали награждать за работы или открытия последних лет, важность которых была оценена недавно. Первая премия по физике была присуждена В.Рентгену в 1901 г. за открытие, сделанное 5 лет назад. По химии первым лауреатом стал Я.Вант-Гофф за исследования в области химической кинетики, а по физиологии и медицине — Э.Беринг, ставший широко известным как создатель противодифтерийной антитоксичной сыворотки. Нобелевские премии — одна из самых высоких наград в науке XX в. Крупнейшие научные достижения в разных научных областях отражены в присуждаемых премиях.

Многие и отечественные ученые были удостоены этих престижных премий. В 1904 г. лауреатом Нобелевской премии по физиологии и медицине стал И.П.Павлов, а в 1908 г. — И.И.Мечников. Среди отечественных Нобелевских лауреатов — академик Н.Н.Семенов (совместно с английским ученым С.Хиншельвудом) за исследования механизма цепных химических реакций (1956 г.); физики — И.Е.Тамм, И.М.Франк и П.А.Черенков, за открытие и исследование эффекта сверхсветового электрона (1958 г.). За работы по теории конденсированных сред и жидкого гелия Нобелевская премия по физике была присуждена в 1962 г. академику Л.Д.Ландау. В 1964 г. академикам Н.Г.Басову и А.М.Прохорову (совместно с американцем Ч.Таунсом) — за создание новой области науки — квантовой электроники. В 1978 г. Нобелевским лауреатом стал и

академик П.Л.Капица за открытия и основополагающие изобретения в области низких температур. В 2000 г., как бы завершая век присуждения Нобелевских премий, академик Ж.И.Алферов (из Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия) и Г.Кремер (из Калифорнийского университета, США) стали Нобелевскими лауреатами за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокочастотной электронике и оптоэлектронике.

Присуждение Нобелевской премии осуществляет Нобелевский комитет Шведской Академии наук, и, как правило, это отмечало исторические события в развитии науки. В 60-е годы деятельность этих комитетов была подвергнута критике, поскольку многие ученые, достигшие не менее ценных результатов, но работающие в составе больших коллективов или опубликованные в «непривычном» для членов комитета издании, не стали лауреатами Нобелевской премии. Например, в 1928 г. индийские ученые В.Раман и К.Кришнан исследовали спектральный состав света при прохождении его через различные жидкости и наблюдали новые линии спектра, смещенные в красную и синюю стороны. Несколько раньше и независимо от них аналогичное явление в кристаллах наблюдали советские физики Л.И.Мандельштам и Г.С.Ландсберг, опубликовав свои исследования в печати. Раман же послал короткое сообщение в известный английский журнал, что обеспечило ему известность и Нобелевскую премию в 1930 г. за открытие комбинационного рассеяния света. В течение века исследования становились все более крупными и по количеству участников, потому присуждение индивидуальных премий, как это предусматривалось в завещании Нобеля, стало затруднительным. Кроме того, возникли и развились области знаний, не предусмотренные Нобелем.

Организовались и новые Международные премии. Так, в 1951 г. была учреждена Международная премия А.Галабера, присуждаемая за научные достижения в освоении космоса. Ее лауреатами стали многие советские ученые и космонавты. Среди них главный теоретик космонавтики академик М.В.Келдыш и первый космонавт Земли Ю.А.Гагарин. Международная академия астронавтики учредила свою премию; ею отмечены работы М.В.Келдыша, О.Г.Газенко, Л.И.Седова, космонавтов — А.Г.Николаева и В.И.Севастьянова. В 1969 г., например, Шведский банк учредил Нобелевскую премию по экономическим наукам (в 1975 г. ее получил советский математик Л.В.Канторович). Международный Математический конгресс стал присуждать молодым ученым (до 40 лет) премию имени Дж.Филдса за достижения в области математики. Этой престижной премии, присуждаемой раз в 4 года, были удостоены молодые советские ученые — С.П.Новиков (1970 г.) и Г.А.Маргулис (1978 г.). Многие отличия, присуждаемые различными комитетами, приобрели в конце века статус международных. Например, медаль У.Г.Волластона, присуждаемая Лондонским геологическим обществом с 1831 г., оценила заслуги наших геологов А.П.Карпинского и А.Е.Ферсмана. Кстати, в 1977 г. фонд г.Гамбурга учредил премию А.П.Карпинского, русского и советского геолога, Президента Академии наук СССР с 1917 по 1936 г. Эта премия при-

суждается ежегодно нашим соотечественникам за выдающиеся достижения в области естественных и общественных наук. Лауреатами этой премии стали наши выдающиеся ученые Ю.А.Овчинников, Б.Б.Пиотровский и В.И.Гольданский.

В нашей стране самой высокой формой поощрения и признания научных заслуг являлась Ленинская премия, учрежденная в 1957 г. До нее была премия им.Ленина, просуществовавшая с 1925 по 1935 г. Лауреатами премии им.Ленина стали А.Н.Бах, Л.А.Чугаев, Н.И.Вавилов, Н.С.Курнаков, А.Е.Ферсман, А.Е.Чичибабин, В.Н.Ипатьев и др. Ленинской премии были удостоены многие выдаю-

щиеся ученые: А.Н.Несмеянов, Н.М.Эмануэль, А.И.Опарин, Г.И.Будкер, Р.В.Хохлов, В.П.Чеботаев, В.С.Летохов, А.П.Александров, Ю.А.Овчинников и др. Государственные премии СССР присуждались за исследования, вносящие крупный вклад в развитие науки, и за работы по созданию и внедрению в народное хозяйство наиболее прогрессивных и высокотехнологичных процессов и механизмов. Сейчас в России существуют соответствующие премии Президента и Правительства Российской Федерации. Конечно, присуждение премий не всегда объективно, и для того чтобы оценить какое-то достижение в качестве крупнейшего, необходима проверка временем.

2.5. СОВРЕМЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ, ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

Современную эпоху называют *научно-технической революцией* — НТР. Это значит, что наука превратилась в *ведущий фактор развития общественного производства и всей жизни общества, стала непосредственной производительной силой*. Если обратиться к началу XX в., то можно проследить процесс подготовки НТР. За четверть века в физике был открыт электрон, раскрыта сложная структура атома, установлен корпускулярно-волновой дуализм света и вещества, открыты явления естественной и искусственной радиоактивности, созданы квантовая механика, теория относительности. В жизни стали широко использоваться электричество, механизация и автоматизация производства, развились средства связи, появились радио и телевизор, автомобиль, самолет, электропоезд, развивались новые источники энергии. Успехи в химии и биологии привели в разработке технологий органических веществ, разработке методов управления химическими процессами, в частности синтеза многих лекарств, взрывчатых веществ, красителей, продуктов питания, получение новых веществ с заданными свойствами. Появились новые науки — генетика, молекулярная биология, кибернетика.

В середине XX в. научно-технический прогресс стал оказывать *решающее влияние на мировую политическую жизнь*. Создание атомной бомбы показало, что судьбы стран и человечества определяет овладение передовыми наукой и технологиями. Следующей вехой НТР стало овладение космосом — создание спутников, полет Гагарина, исследование космическими аппаратами других планет, выход человека в открытый космос и на Луну. *Человечество осознало свое единство*. Связь с техникой и выражается в самом термине НТР. Появление и массовое распространение ЭВМ, которым человек может передать свои логические функции и постепенно ряд функций по автоматизации производства, контролю и управлению, привели к впечатляющему рывку вперед во многих областях жизни — в сферах производства, образования, бизнеса, науки и социальной жизни. Резкое изменение всего строя жизни людей во время жизни одного поколения — открываются и используются новые виды энергии, электронное приборостроение, биотехнологии. Перестраивается весь технологический базис производства и управления, меняется отношение человека к ним, создается и укрепляется единая система взаимодействия человека и природы — *наука, техника, производство*.

В конце XX в. *продукция высоких технологий* занимала все большее место в валовом продукте развитых стран, обеспечивая его прирост, и развитость их определяет положение государства в современном мире. Поэтому большинство стран мира прилагают максимум усилий к укреплению научно-технического потенциала, расширению инвестиций в наукоемкие технологии, участию в международном технологическом обмене, ускорению темпов научно-технического развития. Экономический рост отождествляется с научно-техническим прогрессом и интеллектуализацией основных факторов производства. Высокие технологии — передний край современной промышленности, работающей на пределе возможностей человека и техники. Новые производства требуют высочайшей точности, надежности и стабильности. Малое нарушение или оплошность могут вызвать срыв всего производства или катастрофу, потому высоки требования к квалификации и надежности персонала. Много *высокотехнологичных направлений* объединяют микроэлектроника, информационные и биотехнологии. Распространение высоких технологий и резко выросшая доля стоимости научных исследований в цене продукта (наукоемкость) повысили требования к уровню подготовленности участников производства. Несмотря на большую долю риска, высока возможная прибыль. И правительства многих развитых стран, и крупные фирмы вкладывают деньги в научные исследования; создаются венчурные (от *venture* — риск, авантюра) фирмы, привлекающие мелких вкладчиков. Это оказывает пользу развитию науки, так как ей требуется дорогостоящее оборудование, развитая инфраструктура, высокая степень информатизации, высококвалифицированный персонал и пр. Но сращивание науки с бизнесом имеет и негативные последствия — служение Истине отступает на второй план, меняется научная этика. Изменилось и мировоззрение людей.

Информация стала *стратегическим ресурсом* общества (как продукты питания, промышленные или энергоресурсы). Сменился доминирующий вид деятельности в сфере общественного производства (как от аграрного к индустриальному, теперь — к информационному). Роль науки в обществе сильно возросла, оказывая огромное влияние на мировоззрение, на экономику, политику, социальную жизнь. В условиях исчерпания возможностей экстенсивного развития человечество снова осознало свое единство. Нарас-

тают и глобальные проблемы, которые могут быть решены только общими усилиями (ядерное разоружение, экология, безопасность, строительство и поддержание глобальной информационной и коммутационной инфраструктуры). И высокий профессионализм стал неотделим от нравственности, гуманизма, цельного видения единства и взаимосвязи природы и общества, Человека и Космоса.

Меняются отношения человека с природой и людей друг с другом. Жизнь стала продолжительней и комфортней, повсеместны холодильники, телевизоры, стиральные машины, видеотехника, персональные компьютеры. Бытовая техника оснащается микропроцессорами, за счет автоматизации и роботизации деятельности растет доля творческого труда, общество должно непрерывно обучаться. Разработка новых достижений НТР происходит за счет развития узкой специализации; усиливается давление на окружающую среду. Быстрый темп развития и высокая сложность этих отраслей привели к необходимости компьютеризации и автоматизации и самих технологических процессов и их проектирования, хранения и транспортировки сырья и продукции, непрерывного изучения рынка сбыта и т.п. В конкурентной борьбе время стало дефицитным ресурсом и даже решающим фактором. Люди втягиваются в гонку (успеть бы!), должны все время переучиваться, возникают психологические стрессы. Человек стал свободнее, получил возможность выбора, но он не готов с пользой для себя и общества использовать тот материальный достаток и досуг, который дала ему НТР. Удобства жизни отделяют людей друг от друга. Растут неравенство и расслоение внутри общества и между странами.

«Увеличение численности высококвалифицированных специалистов становится главной формой накопления в современной экономике, а люди, их разум — самым ценным стратегическим ресурсом». За эти ресурсы идет конкурентная борьба, не уступающая по накалу борьбе за сырьевые ресурсы. И, если страна не способна финансировать научные исследования, разработку и развитие наукоемких технологий, она рискует «отстать навсегда». Представление

о науке как о непосредственной производительной силе — это дань возрастающей роли научного труда в совокупном общественном продукте. Сейчас доля новых знаний, воплощаемых в технологиях, оборудовании и организации производства в развитых странах, составляет 70–85% прироста ВВП, а на долю семи высокоразвитых стран приходится 80–90% наукоемкой продукции и весь ее экспорт. Правительства не могут принимать важных решений без консультаций со специалистами и, прежде всего, с учеными-естественниками. Наука может дать человеку знания, как осуществить контроль за состоянием окружающей природы, как лучше организовать производство, как обеспечить себя энерго- и ресурсосберегающими технологиями, как обеспечить безопасность народов, но не может ограничить рост потребления одного за счет другого.

Простейший пример — автомобильный транспорт. Автомобильные выхлопы — один из главных источников кислотных дождей. Но переход на иное топливо или даже ограничение скорости движения не поддерживается автомобилистами, и правительства не принимают соответствующих жестких законов. Также не один предприниматель не уменьшит свою прибыль от производства, потратив средства на очистительные сооружения, если власть не разработает соответствующие требования принятием закона.

Поэтому обретают первостепенное значение подготовка общественного сознания к правильному восприятию достижений НТР, разработка грамотных законов, разумно ограничивающих потребление, повышение уровня компетентности управляющих и правящих. *Фундаментальная наука* относится к высшим духовным ценностям человечества и несет в себе объединительное начало. В заключение главы приведу слова Нобелевского лауреата И.П. Павлова, сказанные еще в начале XX в.: «Что нам, русским, нужно сейчас в особенности — это пропаганда научных стремлений, обилие научных средств и страстная научная работа. Очевидно, наука становится главнейшим рычагом жизни народов, без нее нельзя удержать ни самостоятельности, ни тем более достойного положения в мире».

Глава 3. КОНЦЕПЦИИ ПРОСТРАНСТВА–ВРЕМЕНИ И МАТЕРИИ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

3.1. ПОНЯТИЕ «ПРОСТРАНСТВО» В СВОЕМ РАЗВИТИИ

В обыденном восприятии под *пространством* понимают некую протяженную пустоту, в которой могут (но не обязательно) находиться какие-либо предметы. Однако между небесными телами (звездами, планетами, кометами) всегда имеется некоторое количество вещества, да и *физический вакуум* содержит *виртуальные частицы*. В науке пространство рассматривается не как вместительница материи, а как *физическая сущность, обладающая конкретными свойствами и структурой*.

Основные свойства пространства формировались по мере освоения человеком территорий и развития одной из древнейших наук — *геометрии* (от греч. *geometria* — землемерие). Сложившиеся к III в. до н. э. знания система-

тизировал древнегреческий математик Евклид, один из наиболее известных и влиятельных математиков всех времен, работавший в Александрии. В своем знаменитом произведении, состоящем из 13 книг, ставших основой геометрии (школьная геометрия буквально заимствована из первых 6 книг «Начал»), он организовал научное мышление на основе логики. В первой книге он определил идеальные объекты геометрии: *точка, прямая линия, плоскость, поверхность*.

Эти объекты определялись через некоторые характеристики реального окружающего мира или каких-либо предметов, часто для этого использовались представления о луче света или натянутой струне. Например, образ прямой

линии связан с лучом света. Но было известно, что в неоднородных средах световой луч преломляется; и сам же Евклид получил закон равенства углов отражения и падения, а Аристотель рассуждал о кажущемся преломлении палки, погруженной частично в воду. Исходя из наиболее простых свойств линий и углов путем *строгих логических доказательств* Евклид пришел в планиметрии к равенству треугольников, равенству площадей, теореме Пифагора, к золотому сечению, кругу и правильным многоугольникам. В книгах V–VI и X он излагает теорию несоизмеримых Евдокса и правила подобия, в VII–IX — теорию чисел, а в последних трех — геометрию в пространстве. От телесных углов, объемов параллелепипедов, призм, пирамид и шара Евклид переходит к исследованию пяти правильных («платоновых») тел и доказательству, что их существует только пять.

Изложение Евклида построено в виде строго логических выводов теорем из системы аксиом и постулатов (кроме системы определений). На них и основаны представления о пространстве, которые использованы Ньютоном в его «Математических началах натуральной философии» (1687 г.).

1. *Однородность* (нет выделенных точек пространства, параллельный перенос и поворот не изменяет вид законов природы). 2. *Изотропность* (в пространстве нет выделенных направлений, и поворот на любой угол сохраняет неизменными законы природы). 3. *Непрерывность* (между двумя различными точками в пространстве, как близко бы они не находились, всегда есть третья). 4. *Трехмерность* (каждая точка пространства однозначно определяется набором трех действительных чисел — координат). 5. «*Евклидовость*» (описывается геометрией Евклида, в которой, согласно пятому постулату, параллельные прямые не пересекаются и сумма внутренних углов треугольника равна 180°). Этот постулат привлекал к себе особое внимание, и некие его эквиваленты привели в XIX в. к возможности иных геометрий, в которых сумма углов треугольника больше (геометрия Римана — геометрия на сфере) или меньше 180° (геометрии Лобачевского и Больяйи).

Положение тел в окружающем пространстве определяется тремя координатами (долгота, широта, высота), т.е. наглядным представлениям соответствует *трехмерность* пространства. Евклид построил его геометрию, известную как евклидова геометрия. Птолемей в своем труде «Альмагест» утверждал, что в природе не может быть более трех пространственных измерений. Для определения положения в пространстве P . Декарт ввел прямоугольную систему координат («декартовы координаты») — x, y, z . Эти координаты не всегда являются самыми удобными. Для описания орбит планет при их движении вокруг Солнца удобнее сферическая система координат, выделяющая положение Солнца и учитывающая, что гравитационное поле убывает одинаково по всем направлениям. Поэтому выбирают сферические координаты — расстояние до центра и два угла, определяющие направление, в котором нужно двигаться от центра, чтобы достичь нужной точки. Выбор системы координат — это просто выбор способа описания, и он не может влиять на свойства континуума, который нужно описать. Пространства и континуумы независимо от

способа описания обладают своими внутренними геометрическими свойствами (например, кривизной). Пространство называют искривленным, если в нем невозможно ввести координатную систему, которая может считаться прямолинейной. Иначе — оно плоское.

Живя на поверхности почти сферической, мы пользуемся геометрией на плоскости, хотя правильнее говорить, что большие круги (параллели и меридианы) — кратчайшие расстояния (что учитывается при прокладке курса самолетов, например). На геометрии Евклида построена механика Галилея–Ньютона, где тела движутся криволинейно только под действием сил. *Пространство Ньютона* — это модель независимо существующей субстанции, где могут перемещаться материальные тела и частицы света. Каждый объект обладает в пространстве определенным положением и ориентацией, а расстояние между двумя событиями точно определено, даже если они произошли в разные моменты времени.

Положение R тела в пространстве определяется только *относительно системы каких-то объектов*. Так как ощущается лишь неравномерное движение (а не движение с постоянной скоростью), имеет смысл говорить об изменении скорости $v = dR / dt$ тела в пространстве, и движения определяются только $W = dv / dt$ — ускорением. Ньютон перевел эти сугубо обыденные ощущения на математический язык, у него все равномерные движения относительны, а ускоренные — абсолютны. Причины, вызывающие ускоренные движения, он назвал силами. Силы F пропорциональны ускорению тел с коэффициентом M , называемым *инертной массой*: $F = MW$. Если этот закон Ньютона прочесть справа налево, видно, что части системы при равномерном движении не испытывают силового воздействия. Значит, механическими средствами равномерное движение нельзя отличить от другого такого же, и пространство само по себе не оказывает силового воздействия на движущиеся тела. Механика Ньютона позволяет наблюдать только ускоренные движения, а ускорение ведет к возникновению в системе отсчета движущегося тела *сил инерции*. Таковы давление ног человека, направленное вниз при кратковременной остановке лифта, движущегося в направлении вверх, или центробежная сила на вращающейся карусели. Приписывая появление сил инерции пространству, в котором происходит ускорение, Ньютон доказывал *реальность существования его пространства*. Оно — *субстанция, способная динамически действовать на материальные тела*.

Создание *теории электромагнитного поля* дало возможность использовать оптические явления для измерения скорости движения в пространстве: свет должен распространяться в эфире (некоей жидкости, заполняющей пространство) с постоянной скоростью, зависящей от «упругости» эфира, а скорость света, измеренная наблюдателем, должна зависеть от направления распространения света. Но проведенный А. Майкельсоном и Э. Морли опыт показал, что никакого эффекта, связанного с эфиром, нет (1887 г.). Пришлось отказаться от эфира и наглядных представлений Ньютона о пространстве и времени, и А. Эйнштейн предложил (1905 г.) свою *специальную теорию относительности* (СТО).

В основе СТО два постулата: 1) скорость света c в вакууме постоянна и не зависит от движения наблюдателя или источника света; 2) все физические явления (механические и электродинамические) происходят одинаково во всех телах, движущихся относительно друг друга прямолинейно и равномерно. Это означало изменение длин и времен в соответствии с преобразованиями Лоренца для тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света*. «Отныне пространство и время, взятые по отдельности, обречены влачить призрачное существование, и только единство их обоих сохранит реальность и самостоятельность» (Г. Минковский). Изменения длин и времен ощутимы лишь при скоростях, близких к скорости света; при меньших скоростях движение происходит по законам классической механики. В таком пространстве–времени уже удобнее криволинейные координаты. В разных системах координат по-разному будут выглядеть математические записи законов физических явлений. Итак, в СТО *время и пространство объединяются в 4-мерное пространство–время*.

В конце XIX в. появились *неевклидовы теории пространства* — различные варианты геометрии Н.И. Лобачевского, Я. Больяи и Г.Ф.Б. Римана. Они отвергали один из постулатов Евклида — в них через точку можно провести несколько прямых, параллельных заданной. Проверкой новой геометрии было бы измерение суммы внутренних углов треугольника, но измерения Гаусса и Лобачевского не обнаружили отклонений физического пространства от евклидоваго. Пространство Римана, в котором сумма углов меньше 180° , соответствует геометрии на сфере, легло в основу *общей теории относительности* (ОТО) — обобщенной теории тяготения, — разработанной Эйнштейном (1916 г.). При наличии в пространстве тяготеющих масс (т.е.

и поля тяготения) пространство искривляется, становится *неевклидовым*. Движения тел в нем происходят по кратчайшему пути — по *геодезическим*. *Свойства пространства–времени определяются распределением и движением материи в пространстве*.

Чтобы представить кривизну пространства–времени вблизи Земли, подбросим мяч в воздух. Если он будет в полете 2 с и опишет дугу в 5 м, то свет за эти 2 с пройдет расстояние 600 000 км. Если представить дугу высотой 5 м, вытянутую по горизонтали до 600 000 км, то ее кривизна и будет соответствовать кривизне пространства–времени. Вся масса Земли создает кривизну, составляющую порядка 10^{-9} кривизны своей поверхности.

В отличие от теории Ньютона, теория Эйнштейна претендует на теорию пространства–времени, т.е. на теорию Вселенной в целом. Большинство экспериментальных данных о гравитации хорошо описывается в пространстве Евклида или динамике Ньютона, но есть немногочисленные явления (отклонение света в поле тяготения или смещение перигелия Меркурия), которые противоречат теории Ньютона и хорошо объясняются в ОТО.

Характер физических законов существенно зависит от масштаба исследуемых явлений, и принято говорить о микро-, макро- и мегамире. Объектами *микромифа* являются атомные ядра и молекулы, атомы и элементарные частицы. К объектам *макротифа* относят живую клетку, человека и соизмеримые с ним предметы. *Мегамиф* — это планеты, Солнце, звезды, галактики и вся Вселенная в целом. В мегамире существенную роль играют эффекты СТО и ОТО, преобладающим взаимодействием является гравитационное. В макромире законы движения тел определяются классической механикой, а в микромире — квантовой физикой.

3.2. МАСШТАБЫ РАССТОЯНИЙ ВО ВСЕЛЕННОЙ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЙ И РАЗМЕРОВ

Бесконечность и огромность Вселенной вызывает чувство восхищения и трепета. Расстояния в мире звезд измеряют в световых годах (1 св. год $\approx 9,5$ млрд км), а расстояние от Земли до Солнца в 1 а.е. (150 млн км) свет преодолевает за 8,5 мин. Луна находится на расстоянии около 1 св. с, или 384 тыс. км, или 60 радиусов Земли. Поперечник солнечной системы — несколько световых часов, а ближайшая звезда (Проксима созвездия Центавра) находится на расстоянии около 4 св. лет.

В древности у разных народов были и различные представления о Земле и ее форме. Так, индийцы представляли себе Землю в виде плоскости, лежащей на спинах слонов, жители Вавилона — в виде горы, на западном склоне которой находится Вавилония, евреи — в виде равнины и т.д. Но в любом случае считалось, что в некоем месте небесный купол соединяется с земной твердью. Своему появлению и развитию наука о Земле — *география*, или землеописание, во многом обязана древним грекам, представлявшим мир в виде круглой лепешки с Грецией в центре. Гекатей Милетский даже вычислил ее диаметр — 8 000 км. Для наших далеких предков ориентация в прост-

ранстве имела огромное значение. Порядок обеспечивал безопасность.

В Месопотамии и Египте наблюдения за небом составляли прерогативу жрецов и связывались с астрологией. Люди заметили, что планеты перемещаются на фоне звезд (название «планета»: греч. *planetes* означает «блуждающий»). Чтобы представить, как эти перемещения происходят, они стали делать модели устройства окружающего пространства, *модели Мира*. В центр Мира ставился человек, т.е. наша Земля, что соответствовало представлениям наблюдателя. Аристотель дал обоснование такой системы, представив космос как большое число связанных друг с другом материальных сфер, каждая из которых подчиняется своим законам. Видимое движение небесных тел с востока на запад он не мог объяснить и ограничился высказыванием: «природа всегда осуществляет лучшую из возможностей». Другой ученик Платона, Эвдокс, попытался найти кинематику планет исходя из гипотезы движения по идеальной кривой — окружности. Для этого ему пришлось подбирать скорости и направления движений трех (а потом — семи) сфер для описания видимого движения

* Явления, описываемые СТО, называют релятивистскими, и при скоростях, сравнимых со скоростью света, они меняют свойства пространства и времени.

Солнца и Луны, и 26 сфер — для планет. Аристотель использовал уже 56 сфер, и математик Аполлоний предложил теорию эпициклов: планета движется по круговой орбите, центр которой описывает круг вокруг Земли. Эту систему развил знаменитый астроном Гиппарх, которого считают одним из основателей астрономии — он составил первый каталог из 850 звезд, выделил созвездия и открыл прецессию земной оси. У Аристотеля все небесные движения происходили по идеальным траекториям, тогда как на Земле движения отличны от идеальных. Представления Аристотеля были канонизированы церковью и сохранялись почти двадцать веков.

Геоцентрическая система мира (Солнечной системы) связана с александрийским астрономом Птолемеем, который обобщил существовавшие до него представления. Согласно модели Птолемея, изложенной в его сочинении «Альмагест» (Великое построение), вокруг шарообразной и неподвижной Земли движутся Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн и небо неподвижных звезд. Сфера неподвижных звезд окружена жилищем блаженных, где находится и «перводвигатель». Центры подвижных светил движутся по кругам, эксцентричным по отношению к Земле. Для планет пришлось вводить систему окружностей — эпициклов. Система была громоздкой и еще усложнялась по мере накопления материала, но помогла немного разобраться в астрономических явлениях. В течение многих столетий геоцентрическая система считалась единственно верной — она согласовывалась с библейским описанием сотворения мира. И только в период Возрождения началось иное развитие мысли.

Гелиоцентрическая система (греч. *helios* — «солнце») связана с польским ученым Н.Коперником. Он возродил гипотезу пифагорейца Аристарха о строении Мира: Земля уступила место центра Солнцу и оказалась третьей по счету среди вращающихся по круговым орбитам планет. Коперник путем сложных математических расчетов объяснил странные видимые передвижения, разные для внешних (Марс, Юпитер, Сатурн) и внутренних (Меркурий, Венера) планет, их движениями вокруг Солнца. В своей книге «О вращении небесных сфер» (1543 г.) он утверждал, что планеты — спутники Солнца. Когда Земля, двигаясь вокруг Солнца, обгоняет другую планету или отстает от нее, нам кажется, что планеты движутся то назад, то вперед. Учение Коперника нанесло удар по сложившимся представлениям об устройстве мира и имело революционное значение для последующего развития науки в целом. Оно разрушило разницу в законах движения на небе и на Земле и установило идею единства мира. Как выразился А.Эйнштейн, Коперник «призвал человека к скромности». Через 73 года после смерти Коперника и выхода книги церковь запретила ее, и лишь в 1828 г. этот запрет сняли. Коперник считал, что у Вселенной есть центр, в котором находится Солнце, и этот недостаток теории исправили уже другие. Так, одним из первых в защиту учения Коперника (центрального места — Солнца, а не Земли) высказался Дж.Бруно, который считал Вселенную бесконечной с множеством солнц и планет.

Вращение вокруг Солнца доказывается по наличию годичного параллакса звезд, а вращение вокруг своей оси

наиболее убедительно доказывается с помощью сохранения направления колебаний маятника Фуко.

Размеры планет определяют по тщательным наблюдениям за их движениями. Так, Меркурий — ближайшая к Солнцу планета — всегда находится близко к нему, при наблюдениях с Земли его отклонение (наибольшая элонгация) может быть до 23° , тогда как для Венеры (второй от Солнца) — $43\text{--}48^\circ$. Радиус орбиты Меркурия порядка $0,38 a$ — радиуса земной орбиты, где $a = 1$ а.е. (астрономическая единица), а Венеры — $0,7 a$. Имея пропорции, можно построить примерную схему солнечной системы. Для получения абсолютных значений нужно знать хотя бы один радиус орбиты. Его можно определить с помощью радара. Сейчас все расстояния определены достаточно скрупулезно и разными методами.

При **радиолокационном методе** на исследуемый объект посылают мощный кратковременный электромагнитный импульс, а затем принимают отраженный сигнал. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме $c = 299792458$ м/с. Если точно измерить время, которое потребовалось сигналу, чтобы дойти до объекта и обратно, то легко вычислить искомое расстояние. Радиолокационные наблюдения позволяют с большой точностью определить расстояния до небесных тел солнечной системы. Этим методом уточнены расстояния до Луны, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера.

Размеры Земли оценил удивительно точно Эратосфен еще во II в. до н.э., измерив угловое отклонение Солнца от зенита в Александрии в $7,2^\circ$, тогда как в Сиене (современный Асуан) оно было в зените. При этом $7,2^\circ$ составляет такую долю от 360° , какую составляет расстояние между городами 800 км от полной длины окружности Земли. Так он получил эту длину в 40 000 км, точно — 40075,696 км (рис.2).

Параллаксом — величиной углового смещения предмета — можно характеризовать расстояние до него. Из практического опыта на земной поверхности известно, что скорость изменения направления на предмет при движении наблюдателя тем меньше, чем дальше объект находится от наблюдателя. **Метод геометрического параллакса** позволяет измерять расстояние в макром мире, используя теоремы евклидовой геометрии. Явление **геометрического параллакса** — основа стереоскопического зрения человека и животных. **Методом параллакса** определяют расстояние до ближайших планет. Можно обнаружить смещение при перемещении наблюдателя из-за суточного движения Земли, будто он переместился из центра Земли в точку экватора, из которой планета кажется находящейся на горизонте. Угол, под которым со светила виден экваториальный радиус Земли, перпендикулярный лучу зрения, называют **суточным параллаксом**. Средний суточный параллакс Солнца равен $8,794''$, Луны — $57,04''$.

Метод геометрического параллакса также пригоден для определения расстояний до ближайших звезд, если в качестве базиса использовать не радиус Земли, а диаметр земной орбиты. Он позволяет оценить расстояние до 100 св. лет. **Годичный параллакс звезды** — это угол (π), на который изменится направление на звезду, если наблюдатель переместится из центра Солнечной системы на

земную орбиту в направлении, перпендикулярном направлению на звезду. Иначе говоря, это угол, под которым видна со звезды большая полуось земной орбиты, расположенная перпендикулярно лучу зрения (рис.3). С годичным параллаксом связана и основная единица измерения расстояний между звездами — *парсек* (от параллакс и секунда): $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3,263 \text{ св. года} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$. Так, ближайшая к нам звезда Проксима Центавра при $\pi = 0,762''$ находится на расстоянии 1,31 пк. Альфа того же созвездия Центавра чуть дальше — $0,751''$ и 1,33 пк, а известная звезда Сириус (альфа Большого Пса) — $0,375''$ и 2,66 пк.

Диаметр земной орбиты $3 \cdot 10^{11} \text{ м}$, но из-за огромного расстояния до звезд измерение углов достаточно сложно. Небо фотографируют одним телескопом через полгода. При наложении фотографий изображения большинства звезд совпадут друг с другом, но для ближайших звезд окажутся смещенными. Отношение этого малого смещения к фокусному расстоянию телескопа даст тот же угол, что и отношение базиса к расстоянию до звезды. Смещение изображения для ближайшей звезды составляет примерно $1''$ для фокусного расстояния 10 м, это соответствует смещению на фотопластинке $1'' = 5 \cdot 10^{-6} \text{ рад} = \text{смещение} / 10 \text{ м}$. Таким образом, смещение изображения составит $50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, или 50 мк, что можно измерить только под микроскопом. Ближайшая к Солнцу звезда в созвездии Центавра находится на расстоянии в 4,3 св. года, в 272 000 раз дальше, чем от Солнца до Земли.

Когда не было приборов для точного определения углов, использовали простой метод. Если из двух одинаково ярких тел одно находится на расстоянии в n раз больше, чем другое, то близкое тело кажется в n^2 раз ярче. Например, Солнце в 10^6 раз в квадрате ярче Сириуса, следовательно, Сириус в миллион раз дальше от нас, чем Солнце. Яркость других звезд можно сравнить по тому же правилу с яркостью Сириуса и т.д. Сириус отстоит от нас примерно на 10 св. лет. Из распределения звезд по небу следует, что они образуют круговой диск в 10^5 св. лет, так как яркость самых слабых звезд примерно в 10^8 раз меньше яркости Сириуса. Толщина этого диска около 10^4 св. лет. Среднее расстояние между звездами в Галактике примерно 10 св. лет, отсюда среднее число звезд — 50 млрд. Когда мы смотрим в направлении центра Галактики, видим огромное скопление звезд — Млечный Путь. Солнце находится примерно в $2/3$ расстояния от центра до края Галактики в одном из ее рукавов. От слабых звезд Млечного Пути свет идет до Земли десятки тысяч лет — так далеки они от нас. Большинство звезд Млечного Пути не видно невооруженным глазом, хотя многие из них являются белыми и голубовато-белыми гигантскими звездами, излучающими в десятки тысяч раз больше, чем Солнце — типичный желтый карлик с температурой поверхности 6 000 К. Для земного наблюдателя спиральные ветви экваториального пояса Галактики проецируются в виде светлой полосы Млечного Пути, составляющего основу Галактики (греч. *Galaktikos* — «млечный, молочный»).

Другие галактики видны в телескопы как небольшие туманные пятна, их и называли туманностями. Как определить расстояния до них? Полная яркость туманности

Андромеды примерно как и у звезды, расположенной на расстоянии в 10 св. лет. С помощью мощных телескопов выяснено, что в других галактиках примерно столько же звезд, сколько в Млечном Пути. Значит, эта туманность в 50 млрд раз ярче отдельной звезды Галактики, и расстояние до нее должно быть в $50 \cdot 10^9$ раз больше, чем до отдельных звезд, т.е. произведения этого числа на 10 св. лет, или около 2 млн св. лет. Эта грубая оценка примерно соответствует тому, что дают другие методы. Расстояние от Галактики до туманности Андромеды в 20 раз больше диаметра Галактики, т.е. свет, идущий от нее и который мы видим сейчас, покинул эту галактику, когда на Земле еще не было людей, но жизнь уже зародилась.

Расстояния до ближайших галактик определяются *методом измерения сравнительной яркости*, исходя из закона убывания интенсивности точечного источника пропорционально квадрату расстояния. Для больших расстояний подходящего базиса уже не найти, и потому используются свойства света и зависимость частоты света от скорости излучающего объекта (эффект Доплера). Эти далекие галактики представляют из себя островные вселенные, каждая из которых содержит миллиарды звезд.

Так как подавляющее большинство известных нам звезд слишком далеки, чтобы методом параллакса можно было вычислить расстояние до них, пришлось придумать иные методы. Один из них основан на изучении *цефеид*, распространенного и очень важного типа физически переменных звезд. Цефеиды — это нестационарные пульсирующие звезды, которые периодически раздуваются и сжимаются, меняя свой блеск. Между периодом пульсаций цефеид и светимостью этих звезд существует зависимость, получившая название «период-светимость». По ней можно определить светимость и вычислить расстояние до цефеиды, если из наблюдения известны видимый блеск и период изменения блеска цефеиды. Цефеиды видны с больших расстояний и, обнаруживая их в далеких звездных системах, можно определять расстояние до этих систем.

Около века длился спор, являются ли галактиками туманности, описанные французским астрономом Ш.Мессье, автором первого каталога туманностей и звездных скоплений (1781 г.), и английским астрономом У.Гершелем, основоположником звездной астрономии. В 20-е годы американский астроном Э.Хаббл по фотографиям туманности Андромеды, полученным на крупнейшем телескопе того времени, измерил характеристики отдельных звезд и дал несколько независимых оценок расстояния до нее. Так он доказал, что туманность Андромеды находится вне Млечного Пути. Затем Хаббл исследовал Вселенную до огромного расстояния в 500 млн св. лет. Хотя не все открытые туманности оказались галактиками, но в этой области Хаббл выявил до 100 млн других галактик. В настоящее время во Вселенной обнаружены галактики разных типов, и их число примерно около 10 млрд.

В науке производятся *количественные сравнения*, и потому важны *измерения*. Измерение — это определение неизвестной величины известной установленной единицей меры. Однородность и изотропность пространства определяют возможность измерять расстояния с помощью единого эталона длины. *Расстоянием* между двумя точ-

ками принято называть длину отрезка, соединяющего эти точки. Измерения с помощью эталона требуют непосредственного контакта с точками, между которыми измеряется расстояние. За исключением простейших случаев измерений (с помощью линейки или рулетки) такой способ основан на кинематике. *Кинематика* — это раздел механики, дающий математическое описание всевозможных видов механического движения безотносительно к тем причинам, которые обеспечивают осуществление каждого конкретного вида движения.

Для измерений длины в физике пользуются *метрической системой*, которая сложилась исторически и связана с периодом Великой французской революции. Первоначально метр был определен как одна десятиллионная доля расстояния от экватора до Северного полюса вдоль меридиана, проходящего через Париж. В 1889 г. метр был определен официально как расстояние между двумя параллельными метками, нанесенными на платиноиридиевом

3.3. ПОНЯТИЕ «ВРЕМЯ» В СВОЕМ РАЗВИТИИ

Время, как и пространство, имеет *объективный характер*. Они неотделимы от материи, связаны с ее движением и друг с другом. По выражению Нобелевского лауреата (1977 г.) И.Пригожина, «для большинства основателей классической науки (и даже А.Эйнштейна) наука была попыткой выйти за рамки мира наблюдаемого, достичь вневременного мира высшей рациональности — мира Спинозы». Фактически все картины мира, рожденные точной наукой, освобождены от развития, «отрицают время».

Понимание времени, увлекающего мир в непрерывное движение, наиболее ярко выразил Гераклит: «В одну реку нельзя войти дважды», «Все течет, все изменяется», «Мир является совокупностью событий, а не вещей». Законы природы неизменны, они сохраняются в любом месте и в любое время. У Прокла для большей строгости к понятию времени применены геометрические рассуждения: «Время не подобно прямой линии, безгранично продолжающейся в обоих направлениях. Оно ограничено и описывает окружность. Движение времени соединяет конец с началом, и это происходит бесчисленное число раз. Благодаря этому время бесконечно». Платон писал: «Поскольку день и ночь, круговороты месяцев и лет, равноденствия и солнцестояния зримы, глаза открыли нам число, дали понятие о времени и побудили исследовать природу Вселенной». Архимед в трактате «О спирали» показывал, что спираль соединяет цикличность с поступательным движением. Может быть, спираль подойдет для наглядного образа времени, соединив поток и окружность?! Узор из спирали с солнцами был найден на остатках кувшинов неолита и на древнем календаре-железе из бивня мамонта, найденном недавно в Восточной Сибири. Археологи истолковывают эти узоры как отображение идеи Времени.

Первую физическую теорию времени дал Ньютон: «*Абсолютное*, истинное математическое время, само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью». Ньютон ставил время первым среди основных понятий — пространства, массы и движения.

брусе. Он хранится в строго определенных условиях в Международном бюро мер и весов в Севре, пригороде Парижа. Сравнение длины тела с эталонным метром может быть произведено с точностью до $2 \cdot 10^{-7}$ с помощью прецизионного микроскопа. Эта точность определяется толщиной меток. В 1961 г. в качестве эталона длины была принята длина волны в вакууме оранжевого света, испускаемого изотопом криптона-86. В точности 1 м составляет 1 650 763,73 длины волны Kr-86. В 1983 г. на XVII Генуэзской конференции по мерам и весам было принято новое определение метра: «метр — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1 / 299\,792\,458$ долю секунды».

В микромире измерение расстояний осуществляют при помощи явлений дифракции пучков фотонов или других элементарных частиц на кристаллических решетках. В качестве эталона длины в этом случае выступает длина волны, которая в соответствии с положениями корпускулярно-волнового дуализма описывает поведение частиц в пучке.

Абсолютное время — идеальная мера длительности всех механических процессов. Как не наблюдаемо истинно равномерное движение, так и измерять время можно, только приближаясь к истинному, математическому, входящему в уравнения. Абсолютное время *однородно*, это означает симметрию относительно сдвигов. Значит, и точка отсчета времени не имеет значения, она не меняет длительность. То же можно сказать и о пространственных симметриях классической механики. В пространстве нет выделенных ни точек, ни направлений, т.е. *оно однородно и изотропно*. Ньютон не только исключил время из своей картины Вселенной, но и утвердил его в сознании как *внешний параметр*. Стало возможным рассматривать непрерывные периодические процессы равной длительности для построения модели, легко вводить метрику времени. Это позволило построить всю систему мира, подтвердить впечатляющие предсказания теории Ньютона для Вселенной.

Непрерывность времени означает, что между двумя моментами времени, как близко бы они не располагались, всегда можно выделить третий. (Сегодня у науки пока нет достаточных оснований, чтобы говорить о дискретности времени.) Особым свойством времени является его *однонаправленность*, или *необратимость*. Это свойство времени рассматривают как следствие второго начала термодинамики или Закона возрастания энтропии. В классической физике существует абсолютное, «вселенское время». Г.Лейбниц считал время относительным, «порядком последовательностей». Но в современной физике не существует единого «всемирного» хода времени. В биологии и геологии время рассматривали иначе. Так, основоположник геологии датчанин Н.Стенсен строил пространственные отношения на основе не движения или перемещения тел в нем, а с точки зрения временной последовательности «раньше — позже». Этот подход естествен для геолога, рассматривающего историю планеты через наслоения в камне.

Пространственно-временной континуум — это новое средство характеристики физических явлений, используя которое «для описания событий в природе нужно

применять не два, а четыре числа, дала СТО. С точки зрения Эйнштейна, физическое пространство, постигаемое через объекты и их движения, имеет три измерения, и положение объектов характеризуется тремя числами. Момент события — четвертое число. Потому мир событий есть четырехмерный континуум». У Эйнштейна не имеет смысла деление этого мира на время и пространство, поскольку описание мира событий «посредством статической картины на фоне четырехмерного пространственно-временного континуума» более удобно и объективно. Измеренное значение времени оказалось зависимым от движения наблюдателей.

Время для движущегося наблюдателя течет медленнее, чем для неподвижного: $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Этот эффект замедления может быть замечен лишь для скоростей, сравнимых с c (скоростью света в вакууме). По выражению Вернадского, СТО «отрицала только независимое от пространства, абсолютное время, но не придавала ему никаких новых свойств — принимала его тем же изотропным, аморфным временем, каким понимал его Ньютон». Таким образом, традиция классической физики сохранена.

Обсудим явление, известное как «парадокс близнецов». Пусть, например, A и B — близнецы. B улетает с большой скоростью в далекое космическое путешествие, A остается на Земле. Через какое-то время B возвращается и оказывается моложе A . Если v — скорость, с которой путешествовал B , а t_0 — время, которое прошло на Земле за время его путешествия, то время, которое прошло на борту его корабля $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. И чем больше скорость v , тем значительнее будет разница. Причем тот, кто почувствовал ускорение, тот и окажется моложе. Например, собственное время жизни π^+ -мезона составляет $2,5 \cdot 10^{-8}$ с. Если бы не было релятивистского замедления времени, то до распада такая частица проходила бы в среднем расстояние $(2,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}) \times (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) \approx 7$ м. Но, как показывает опыт, проведенный на ускорителях, эти частицы способны проходить значительно большие расстояния, если их скорость сравнима со скоростью света. Поэтому всегда необходимо уточнять, относительно какого тела и связанной с ним системы координат оно рассматривается.

Задержка времени, предсказанная СТО, подтверждается мю-мезонами, распадающимися во время полета к Земле от места возникновения в верхних слоях атмосферы. Это показывают детекторы, установленные на воздушных шарах, на поверхности Земли и в шахтах. Согласно СТО, с увеличением относительной скорости кроме замедления времени, уменьшаются линейные размеры тел вдоль направления движения и увеличивается масса по законам (L_0 и

M_0 — линейные размеры и масса тела в состоянии покоя):

$$L = L_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}; M = M_0 \cdot (\sqrt{1 - v^2/c^2})^{-1}.$$

Свойства пространства-времени в ОТО зависят от распределения тяготеющих масс, и движение тел определяется *кривизной* пространства-времени. Но влияние масс сказывается только на метрических свойствах часов, так как меняется лишь частота при переходе между точками с разными гравитационными потенциалами. Иллюстрацией *относительного хода* времени, по мнению Эйнштейна, могло бы стать обнаружение процессов вблизи предсказанных им черных дыр.

Эйнштейн в фундаментальных законах физики не допускал необратимости, его беспокоила *направленность времени*, связанная со вторым началом термодинамики. Хотя решение, соответствующее нестационарной Вселенной, полученное А.А.Фридманом из его космологических уравнений, позднее было подтверждено наличием красного смещения в спектрах далеких галактик, установленного Э.Хабблом, Эйнштейн считал гипотезу взрывающейся Вселенной временной и относился к ней с недоверием. В 60–80-е годы XX в. отношение к эволюционным процессам стало меняться, мир предстал существенно нелинейным с необратимыми процессами в своей основе. Поэтому и времени в новой эволюционной картине мира уготована иная роль.

Для определения момента произошедшего события обычно достаточно одного измерения, указания только одного числа. Такое восприятие времени настолько привычно, что большее число измерений для времени трудно вообразить. Но наблюдаемые события происходят от прошлого к будущему. И это качественно отличает временное измерение от пространственного, причем для любого наблюдателя в данной точке пространства последовательность событий сохраняется. Можно сказать, что понятия «*прошлое*» и «*будущее*» в данной точке пространства есть понятия абсолютные. Для пространственных осей нет такого выделения направлений, и поворот на 180° вокруг оси, перпендикулярной линии, соединяющей два одновременных события, переводит происходящее слева от наблюдателя событие в правое. То есть, понятия «*правое*» и «*левое*» относительны для одновременных событий. Направленность времени тесно связана с пониманием *причинности*: причина должна предшествовать следствию. Это свойство времени относится к классу нерешенных проблем в физике и во всем естествознании, в дальнейшем мы убедимся, что по этой причине в науке существует ряд парадоксальных ситуаций.

3.4. ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

История человечества — от появления первобытного человека до наших дней — кажется (весьма и весьма условно) точкой на фоне мировой эволюции. Очевидно, что вопрос «когда?» связан с вопросом «где?». По Платону, мир совершенен и потому должен быть неизменным. Тогда вопрос о времени не имел бы смысла, так как не было бы начала отсчета. На современном уровне развития науки представляется, что счет времени Вселенной начал с

события, произошедшего почти 15 млрд лет назад, после которого Вселенная расширяется. Время измеряют путем наблюдения периодически повторяющихся процессов.

Сутки были первой естественной единицей меры времени, регулировавшие труд и отдых. Сначала сутки делили на ночь и день, и только много позже — на 24 часа. Сейчас понятно, что периодическая смена дня и ночи происходит из-за вращения Земли вокруг своей оси. Есть

два вида солнечного времени — истинное и среднее солнечное время. Промежутки времени между двумя последовательными кульминациями центра Солнца на одном и том же меридиане, равный периоду вращения Земли, называют *истинными солнечными сутками*. Но измерять ими время тоже неудобно, они летом короче, чем зимой, на 51 с. Дело в том, что Земля движется по орбите вокруг Солнца неравномерно: вблизи перигелия (в январе) ее скорость наибольшая, а вблизи афелия (летом) — наименьшая (второй закон Кеплера). Потому и истинные солнечные сутки непостоянны, и вместо них используют сутки, равные средней длине истинных солнечных суток за год. Кроме того, из-за движения Солнца по эклиптике происходит видимое годичное движение Солнца с запада на восток, т.е. в направлении против вращения. Ввели понятие *среднего Солнца, звездных суток и звездного времени*.

Звездные сутки определяются периодом вращения Земли вокруг своей оси относительно любой звезды. Но звезды тоже имеют собственные движения. Условились определять длительность звездных суток как промежуток времени между двумя последовательными кульминациями точки весеннего равноденствия, находящейся на одном и том же меридиане. Оказалось, что из-за прецессии средние звездные сутки уменьшаются на 0,0084 с, и они на 3 мин 56 с короче средних солнечных. Звездное время очень важно в астрономии, оно определяет положение светил, а в обычной жизни используется солнечное время. И за среднюю единицу солнечных суток приняли 24 ч 3 мин 56,5554 с звездного времени. Измерение солнечного времени основано на видимом суточном движении Солнца.

Истинный полдень наступает на разных меридианах Земли в разное время, и для удобства принято соглашение (по идее канадского ученого С.Флешинга) о делении земного шара на *часовые пояса*, которые проходят через 15 градусов по долготе, начиная с меридиана Гринвича. Это — Лондонский меридиан 0 градусов долготы, и пояс назван нулевым (западноевропейским). Время 1-го часового пояса (Рим, Берлин, Осло) — средневропейским, а 2-го — восточноевропейским. Всего часовых поясов — 24, внутри каждого пояса время принимается одинаковым — *среднепоясным*. Но территориальное деление не совпадает с делением на часовые пояса, и часто их проводят приблизительно по рекам или административным границам. Примерно на 180-градусном меридиане происходит по договору линия перемены дат, т.е. день начинается в Японии и на Камчатке, потом в Сибири, Китае и Австралии, затем в Европе и Африке, потом — в Америке и заканчивается на Аляске. При пересечении линии изменения дат на самолете в восточном направлении одно и то же число приписывается двум дням, а в западном — один день теряется. Кроме того, в ряде стран указами вводят часовой сдвиг — переход на зимнее или летнее время. Согласованное решение о введении поясного времени приняли на Международной конференции в 1883 г. В нашей стране, простирающейся на 11 часовых поясов, поясное время ввели в 1919 г., взяв за основу международную систему часовых поясов и существовавшие тогда административные границы. Затем были некоторые изменения.

Секунда — общепринятая единица времени, примерно с периодом 1 с бьется сердце человека. Исторически эта единица связана с делением суток на 24 ч., 1 ч — на 60 мин, 1 мин — на 60 с. До 1964 г. международная единица времени была основана на суточном вращении Земли. Но продолжительность суток оказалась подверженной разным вариациям и зависящей от положения Земли на орбите при ее движении вокруг Солнца. Изменения скорости вращения на протяжении года примерно около 10^{-8} с. Поэтому за стандарт были выбраны средние солнечные сутки 1900 года. Но солнечные сутки примерно на 4 мин длиннее звездных, т.е. времени поворота на 360° . Соответствующие поправки должны быть внесены в единицу измерения времени. Точность эфемеридной секунды, составляющей $1/31\,556\,925,9747$ от продолжительности 1900 г. в тропиках, равна $2 \cdot 10^{-9}$. К 1971 г. в результате накопления отклонений разница между всемирным и эфемеридным временем достигла полминуты.

Но есть и другие *устойчивые источники колебаний*, способные длительное время поддерживать определенную частоту колебаний. Развитие радиочастотной спектроскопии и электроники обеспечило создание *атомных часов*. И перешли к измерению с помощью *атомных стандартов*, основанных на колебаниях определенного типа в атоме цезия, что позволило замечать отклонение от равномерности хода с точностью до 10^{-10} . *Атомная секунда* — интервал времени, в течение которого совершается почти 10 млрд колебаний атома Cs — (9 192 631 830). Это число согласуется с наилучшими астрономическими определениями секунды. В 1967 г. в качестве эталона был выбран изотоп Cs-133. В настоящее время эталоном времени является водородный лазер, изготовленный в Швейцарии, с шириной спектра 1 Гц, стабильность которого доведена до 10^{-12} . С 1 января 1971 г. все страны мира перешли на отсчет микровремени с помощью атомных часов. Существуют уже и более стабильные стандарты времени (и частоты) — система «оптические часы», созданная из цепочки сверхстабильных лазеров в Новосибирске, обеспечивает стабильность на два порядка лучшую. Это даст погрешность хода 1 с в 1 млн лет! Развитие полупроводниковых радиоэлектронных приборов открыло перспективы в создании электронных и электронно-механических наручных часов с высокой точностью хода.

Календарем называется система отсчета длительных промежутков времени, в которой установлен определенный порядок счета дней в году и указано начало отсчета. Основной предпосылкой появления календаря в древности было развитие связи трудовых процессов с ритмикой природы — сменой дня и ночи, фаз Луны, времен года и т.п., отсюда и необходимости измерять время. Еще древние заметили неукоснительную периодичность передвижения по небосводу Солнца, Луны и звезд. И эти первые наблюдения предшествовали зарождению одной из самых древних наук — астрономии. Астрономия и положила в основу измерения времени три фактора, характеризующие движения небесных тел: вращение Земли вокруг своей оси, обращение Луны вокруг Земли и движение Земли вокруг Солнца. Трудности календаря связаны с тем, что не удается найти простое соотношение между временем оборота

Земли вокруг оси и вокруг Солнца. То же относится и к счету дней в лунном месяце. В западных странах наибольшее распространение получили *солнечные и лунные календары*. В восточных странах, где проживает более половины человечества, в календарные циклы включены астрономические явления, связанные с крупными планетами — Юпитером и Сатурном. Поэтому при составлении календарей в странах Восточной Азии выделен период в 12 лет, связанный с периодом обращения Юпитера вокруг Солнца, при этом год в таких календарях может содержать разное число суток — 353, 354, 355, 383, 385. При этом выделен также 19-летний лунно-солнечный и 30-летний сатурновый циклы, входящие в 60-летний циклический календарь. Существуют календари, построенные и на движении других планет. С календарем — системой упорядоченного счета времени — связана история человеческой культуры.

Известно много календарных сооружений и устройств, оставшихся от древних цивилизаций. Среди них *Перуанский календарь*, открытый в 1939 г. с борта самолета: это огромные четкие рисунки протяженностью в десятки километров. Радиоуглеродный анализ определил возраст находки в 525 лет. Древнейший каменный календарь — *английский Стоунхендж* — относится к началу бронзового периода (III–II тыс. лет до н.э.). Это огромные каменные монолиты высотой более 5 м, стоящие в строгом порядке, причем центральный камень ориентирован точно на положение восхода Солнца в день летнего солнцестояния, а четыре опорных камня — на точки равноденствий. Интересны передвижные календари: *персидский, вавилонский, греческий*.

Внешняя проблема календаря связана с необходимостью согласования *длины года с длиной суток*. Разрабатывались разные варианты поправок, но существенную реформу календаря провел Юлий Цезарь, изучивший во время пребывания в Египте солнечный календарь. Годовой путь Солнца в Древнем Вавилоне делили на 12 частей по 30 градусов с созвездиями, большинство которых назывались именами животных (пояс Зодиака). В этом делении — влияние *вавилонской* системы счисления, от которой осталось деление окружности на 360 градусов, градуса — на 60 мин, минуты — на 60 с. Во II веке до н.э. александрийский астроном Гипсарх ввел понятие о начале весны, лета, осени и зимы как о моментах вступления Солнца в соответствующий знак Зодиака Овна, Рака, Весов и Козерога. Но из-за прецессии (медленной — по 50 угловых секунд в год) точка весеннего равноденствия вскоре перешла в созвездие Рыб, а в течение ближайших 150 лет переместится в зону следующего созвездия Водолея. Кроме того, сейчас годовой путь Солнца по эклиптике проходит уже через 13 созвездий, но для сохранения традиции деления на 12 равных зон часто созвездие Змееносца объединяют с созвездием Скорпиона.

В Италии 3000 лет назад был распространен сельскохозяйственный календарь, в котором год длился 295 суток (период активной жизнедеятельности растительного мира на широтах Италии 300 дней) и начинался с весеннего месяца, в котором день становился равным ночи (сейчас это 21 марта). Год делили на 10 лунных месяцев, отличающихся по номерам. Несовершенство этого солнечно-

лунного календаря накапливало ошибки, и в начале VII в. до н.э. была проведена реформа — добавили еще 2 месяца, т.е. продолжительность года стала не 295, а 354. Кроме того, были введены названия некоторых месяцев. Так, первый месяц назвали мартом в честь Марса — бога войны, культ которого тоже был связан с земледелием. Второй — назвали апрелисом, что означает «согретый солнцем» и «раскрывать», «расцветать» — время раскрытия почек и расцветания первых цветов. В календарях и традициях многих народов отражены особенности римского календаря, связанные с месяцами и толкованием их названий. В апреле в Японии красочно отмечают день цветения сакуры, древнерусское название этого месяца — цветень. Месяц майнус (май) был назван в честь богини гор и плодородия Майи, в Древней Руси он — травень. Четвертый месяц — юниус (июнь) — получил свое название в честь древнеримской богини плодородия Юноны, жены Юпитера. Как и в римском календаре, он связан с богом света — Юпитером, в древнерусском календаре — это светозар, т.е. озаренный светом. Многие названия месяцев древнеримского календаря (сентябрь — декабрь) вошли в европейские календари. Существует во всех странах и деление года не только на месяцы и сутки, но и на недели.

Внутренняя структура календаря связана с соотношением месяцев и дней недели с числами месяцев. Семидневная неделя — период, примерно соответствующий длительности между четырьмя фазами Луны. Лунный месяц (синодический) в среднем равен 29,53 средних суток. Древним людям были известны 7 планет — Солнце, Луна, Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн. Каждой из них посвящали один день недели, что в традициях шумерской астрологии и отражено в культе числа «семь». Поэтому система условных астрономических знаков, изображающих небесные светила и дни недели, одинакова.

Недельный подсчет времени зародился в странах Восточной Азии — Китае, Японии, Вьетнаме. В этих странах после дней Солнца и Луны (воскресенья и понедельника) в соответствии с древнекитайской натурфилософией, по которой все сущее связывалось с пятью стихиями или элементами природы (огнем, водой, деревом, металлом, землей) следуют дни этих стихий. Известны также недели, состоящие из 5 (пятнадцатидневки) и из 10 (декады) суток.

Относительно совершенная система счета времени уже была в Египте 5 тысяч лет назад: год имел 12 месяцев по 30 сут., и еще 5 дней, т.е. 365 дней. Такой счет времени как-то устранял недостатки солнечно-лунного римского календаря. Но так как продолжительность года — промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия — равна 365 сут. 5 ч 46 с, начало года смещалось ко все более ранней дате. Юлий Цезарь пригласил в Рим александрийского астронома и математика Созигена и с его помощью ввел *правило високосов*, добавляющее 1 сут. за 4 года. Этот введенный Цезарем в 46 г. до н.э. календарь (*юлианский или старый стиль*) получил преобладающее значение в странах Европы. Начало было определено с 1 января, а год насчитывал 365,25 сут., что несколько превысило их продолжительность. В результате разница (11 мин 23,9 с) накапливалась и составила ошибку в 1 сут. за 128 лет.

Никейский церковный собор 325 г. принял юлианский календарь и установил единые для всей империи христианские праздничные дни. Задача реформы календаря состояла в исправлении накопившейся ошибки в равноденствиях, и в 1514 г. в связи с этим календарная коллегия запрашивала мнение польского астронома Н.Коперника, но он ответил, что пока длина года известна недостаточно точно. В 1581 г. ватиканский астроном Игнатий Данти убедил Римского папу Григория XIII воспользоваться проектом итальянского врача, астронома и математика Алоизия Лилио. Так был введен *григорианский календарь* (новый стиль) с 15 октября 1582 г., т.е. после 4 октября наступило 15, а не 5-е. Уточнение юлианского календаря касалось только улучшения его внешней структуры — приближения к значению 365,2422 сут. — вводилось 97 високосных лет в каждый 400 лет. Годы столетий, число сотен которых не делится на 4, считаются простыми (1700, 1800, 1900), а годы, у которых число сотен делится на 4 — високосными (1600, 2000 и т.д.) Ошибка в 1 сут. в этом календаре накапливается лишь за 3323 года. Подобную систему счета времен (с правилом високосов) предлагал еще в XI в. иранский ученый и поэт Омар Хайям. Григорианский календарь в течение XVI века постепенно принимался: сначала в странах католических, в XVIII — странах протестантских; в 1873 г. — в Японии, в 1911 — Китае, 1918 — Советской России, 1924 — Греции и Югославии, 1925 — Иране, 1926 — Турции, 1928 — Египте, в 1949 г. — Китае. В зависимости от времени введения приходилось добавлять к дате 10, 11, 12 или 13 суток.

Но проблема улучшения календаря все-таки стоит. Она связана с несоизмеримостью трех основных промежутков времени, заимствованных у природы: средних солнечных суток, лунного месяца и солнечного (тропического) года. Недостатки современного григорианского календаря именно в несовершенстве его внутренней структуры: дни недели не согласованы с числами месяцев в разных годах и даже в одном; полугодия, кварталы и месяцы содержат разное число суток, и начала разных месяцев приходятся на разные дни недели. Отсюда неудобства планирования и учета.

Эрой (в буквальном переводе — исходное число) называется начальная дата системы летосчисления и последующая система. У многих народов эры связывали с временем царствования какой-либо династии: династии фараонов (3100–3066 гг. до н.э., в Египте), династии императоров (в Китае или Японии). Эра греческих олимпиад была рассчитана с 1 января 776 г. до н.э., причем было принято два цикла: по 235 лунных месяцев (19 лет) и по 940 — (около 76 лет). В Италии эра основания города Рима начинается с 22 апреля 753 г. до н.э. Народы Востока, исповедующие ислам, начинают отсчет от хиджры («переселение»), момента переселения мифического Мухаммеда (Магомета) из Мекки в Медину, которое произошло 16 июня 622 г. н.э., в пятницу, если считать по первому вечернему восходу серпа молодой Луны после новолуния. Современное летосчисление в Европе и Америке ведется от мифической даты «рождения Христа», которое произошло в 753 г. после основания Рима (как считал христианский монах Ексигуус в 525 г.). В большинстве стран она известна под названием А.Д. (Anno Domini), что значит «год

господа». В допетровской России годы считались от сотворения мира (как в Византии — с началом 1 сентября 5508 г. до н.э.), а в 1700 г. перешли на начало года с 1 января и на счет от рождества Христова (Р.Х., или новая эра). Проблема реформы календаря уже столетие обсуждается, предлагаются разные варианты, но сделать выбор весьма сложно, так как необходимо *согласие всех народов разных культур*.

Так, 2000 г. — это 2754 г. от основания Рима, мусульманский — 1378 г. хиджры, иудейский — 5760 г., буддистский — 2544, китайский — 4697 г. Новый год во многих календарях приходится на разные даты. В лунно-солнечно-юпитерном календаре Вьетнама, Китая и Японии он наступает от 13 января до 24 февраля, в Израиле — между 6 сентября и 5 октября, в Иране — в день весеннего равноденствия (20–22 марта). В лунных календарях стран мусульманского новогония дата может приходиться на любой день года. К примеру, в Афганистане и Иране 21 марта 1980 г. отмечался Новый, 1359 г. В Японии фиксация дат такова: порядковый номер дня и номер лунного месяца, затем порядковый номер эры (года правления императора) и порядковый номер года девиза. Есть правила и таблицы перевода дат на григорианский календарь, уже принятый во многих странах.

Возраст Вселенной всего лишь в 2,5 раза превышает возраст Солнца. Как можно измерить такие огромные времена, не сопоставимые с жизнью не только человечества, но и всего живого на Земле?

Метод радиоактивного распада — важнейший метод определения больших временных диапазонов в последние полвека. Известно, что все живое получает двуокись углерода из воздуха. Некоторая часть углерода — радиоактивна, и любой образец вещества, приготовленный из живого, содержит эту же долю радиоактивного углерода. Измеряя скорость отсчетов для какого-то образца, можно вычислить, сколько лет прошло с того времени, когда данный кусок доски был живым деревом. В детекторе «свежее» вещество даст 16 отсч./мин на каждый грамм углерода, а за 5 600 лет оно даст только 8 отсч./мин на 1 г и т.д. Многие археологические находки «датированы» определенным количеством оставшегося в их веществе радиоактивного углерода. По нему можно определить возраст до 25 000 лет.

По *периоду полураспада элементов* можно заглянуть в прошлое: за это время половина вещества превращается в другой элемент, за следующий период полураспада — еще половина и т.д. Так как нет радиоактивных элементов с периодом полураспада в 10^{6-8} лет, то возраст Солнечной системы — около 10^8 лет. Из соотношения других изотопов U-235 и U-238 возраст Солнечной системы был уточнен и составил $5 \cdot 10^9$ лет. Оценка возраста Вселенной, связанная с моделями эволюции, позволяет заключить, что Солнечная система образована в результате взрыва звезды, по меньшей мере, второго поколения. Пыль после взрыва скучивалась в вихри, группировалась под действием гравитации. Нашему Солнцу подобный взрыв уже не грозит — согласно моделям развития звезд такого типа примерно через 5 млрд лет оно расширится, потом сожмется вновь и превратится в остывающего карлика. Существующая ныне Вселенная образовалась примерно 15 млрд лет назад и с тех пор расширяется.

Приведем следующие временные интервалы: сутки — $8,64 \cdot 10^4$ с; год — $3 \cdot 10^7$ с; средняя жизнь человека — $2 \cdot 10^9$ с; средний возраст египетских пирамид — $1 \cdot 10^{12}$ с; зарождение жизни на Земле — $7,5 \cdot 10^{16}$ с; время появления первобытного человека — $5 \cdot 10^{13}$ с; млекопитающих — $5 \cdot 10^{15}$ с; земноводных — $7,5 \cdot 10^{15}$ с; время существования человечества — $1 \cdot 10^{14}$ с; возраст Земли — $1,5 \cdot 10^{17}$ с; возраст Вселенной — $5 \cdot 10^{17}$ с.

Обратимся к временным интервалам, меньшим 1 с. Период колебаний звуковой волны достигает 0,001 с, радиоволны — 10^{-6} с. Меньшие промежутки времени связаны с расстояниями в микромире, и их можно измерять через скорость света. За 10^{-9} с — свет проходит расстояние в 30 см, соответственно, можно рассчитать, что расстояние, равное размеру атома, свет проходит за 10^{-18} с, атомного ядра — за 10^{-24} с. Колебания молекул совершаются за период в 10^{-12} с, атома — 10^{-15} с, ядра — 10^{-21} с.

Глава 4. МИРОЗДАНИЕ В СВЕТЕ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМЫ. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ

4.1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ МАКРОМИРА. МОДЕЛЬ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И ЗАКОНЫ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Движением называется любое изменение материи; это — основное, неотъемлемое и всеобщее свойство материи; оно так же многообразно, как и явления природы. Существуют различные виды движения — механическое, тепловое, химическое и т.д. Под механическим движением понимается изменение положения тел относительно друг друга за время наблюдения. Характер движения зависит от того, относительно какого тела рассматривается движение. Движущееся тело имеет некоторые размеры в пространстве, но и пространство, в котором происходит движение, обладает протяженностью.

Процесс абстрагирования позволяет отвлечься от несущественных для данного движения свойств тел — изменения строения, внутреннего состояния и др. Если размеры тела много меньше размеров той области пространства, где оно происходит, а его форма несущественна, то тело можно считать *материальной точкой*. Используется и другая абстрактная модель — *система материальных точек*, соответствующая протяженным телам. Если важна связь точек между собой, то получаем *модель абсолютно твердого тела*; если же точки слегка подвижны в этой системе, удобнее *модель упругого тела*. Оказалось, что движение происходит в микро-, макро- и мегамире по различающимся законам. Эти законы изучаются наукой — механикой: квантовой, теоретической и релятивистской, соответственно.

Механика изучает перемещение материальных точек или тел, т.е. изменение их положения с течением времени. Механика макроскопических тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света, называется *классической*, она состоит из кинематики и кинетики. В кинематике игнорируются причины движения. Основу кинематики составляет геометрия (координаты) и время; вводятся понятия траектории, скорости, ускорения, системы отсчета, угловой скорости и углового ускорения. Она возникла из практики пользования простыми механизмами (рычагом, наклонной плоскостью и пр.). При этом законы равновесия изучались путем рассмотрения того, что приводит к нарушению равновесия. Система Коперника (1543 г.) — чисто кинематическая.

Кинетика — это статика и динамика. **Статика** развивалась в связи с расчетом равновесия архитектурных

конструкций: балок, плит и т.п., которые подпирались в нескольких точках или подвешивались. Основные понятия статики сложились еще в древности из наблюдений, практического опыта и геометрических методов. Это — *сила, пара сил, центр тяжести, момент силы, условие равновесия*. **Сила** — это векторная величина, являющаяся мерой механического взаимодействия тел, которое может происходить как через прямой контакт, так и через пространство. Статика принадлежала к тем наукам, которые в античности подвергались наибольшей математизации. Архимед — подлинный создатель статики и гидростатики, его статика построена по образцу геометрии Евклида. При этом задачу стремились свести к схеме неподвижного и уравновешенного рычага. Леонардо да Винчи, опираясь на свои опыты с полиспастами и другими сочетаниями подвижных и неподвижных блоков, пытался сформулировать правила соотношения сил и скоростей перемещения грузов и точки приложения силы тяги, т.е. некий вариант «золотого правила механики». В XVI в. эти исследования продолжили Тарталья, Бенедетти и Кардано. В статику вошел принцип моментов сил. С.Стевин, изучая равновесие на наклонной плоскости, использовал разложение сил на составляющие или закон параллелограмма сил. Ему принадлежит и изящнейшее доказательство закона Архимеда о плавании тел. Галилей обосновал закон рычага, опираясь фактически на принцип возможных перемещений.

Динамика использует понятия кинематики и статики, добавляя к ним понятия *массы, момента инерции, количества движения или импульса, работы силы, кинетической энергии, момента количества движения или момента импульса*. Основные представления динамики сложились и развиваются на базе многовекового опыта человечества, производственной практики и наблюдений за движением тел, а также в процессе поставленных специально экспериментов.

Чтобы понять, как будет двигаться тело под действием приложенных сил, нужно найти закон движения. Галилей в начале XVII в. сформулировал законы падения тел и качания маятника. У него появились прямые ссылки на эмпирическую основу механики, фактически он обосновал динамику в своем главном произведении «Беседы...» (1638 г.) Как выразился Галилей, — «Кто не знаком с законами

движения, тот не может понять природы». И.Ньютон придал динамике законченную форму, его «Начала...» появились в 1687 г. и содержали закон всемирного тяготения и три закона движения. Первая книга «Начал» Ньютона начинается с определений исходных понятий и в первую очередь — массы. «Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее». У него масса — это «количество материи» в теле. Далее даются определения количества движения mv , приложенной и центростремительной силы, абсолютного и относительного времени и пространства, места тела и абсолютного и относительного движений. Затем следуют три закона движения: 1) закон инерции; 2) $\Delta(mv) = F\Delta t$; 3) закон равенства действия и противодействия. Ньютон указывает, что на основании этих трех законов Рен, Уоллис и Гюйгенс, «величайшие геометры нашего времени», вывели законы удара и отражения тел, «причем выводы их во всем, касающемся этих законов, между собой согласны». Ньютон показывает, используя мысленный эксперимент и ссылаясь на реальный опыт, что третий закон годится не только для столкновения тел, но и для притяжения.

Основой динамики являются причинные законы, в макромире это — законы Ньютона. Хотя Галилей уже исследовал понятие изменяющейся скорости и объяснил, что такое ускорение, Ньютон определил ускорение как изменение скорости в единицу времени, как вторую производную от радиус-вектора, проведенного к материальной точке. *Основной закон динамики — это дифференциальное уравнение второго порядка для координат точки как функции времени; интегрирование этого уравнения дает и скорость, и пройденный путь. В отсутствие сил имеет место закон инерции, ускорение равно нулю.*

Первый закон утверждает, что в отсутствии сил тела не меняют своего движения, т.е. при отсутствии действующих на тело сил существует система отсчета, где это тело покоится. Если оно покоится в одной системе отсчета, то существует множество систем отсчета, где это тело движется с постоянной скоростью. Такие системы и называются *инерциальными*, и в них выполняется первый закон Ньютона. Это закон инерции, фактически сформулированный Галилеем; с ним связано существование инерциальных систем отсчета. Для всех инерциальных систем существует *принцип относительности*, согласно которому во всех инерциальных системах законы физики одинаковы. Существует как частный случай — принцип относительности Галилея, сформулированный им еще в 1636 г. Он утверждает, что никакими механическими опытами в такой системе нельзя определить, движется ли система равномерно и прямолинейно или покоится. Инерциальные системы отсчета — это абстрактные системы. Так, Земля движется по эллипсу вокруг Солнца, да и само Солнце движется по криволинейной траектории вокруг центра Галактики и т.д. Было установлено, что система отсчета, центр которой находится в центре Солнца, а оси координат направлены на выделенные звезды, является инерциальной. Эту систему называют гелиоцентрической. Любая система отсчета, которая движется прямолинейно и равномерно относительно гелиоцентрической системы, будет инерциальной.

Второй закон утверждает, что произведение массы тела на ускорение равно действующей силе. Поскольку сила и ускорение — векторы, то утверждается одинаковое направление для обоих. Динамическое воздействие на тело других тел приводит к изменению его скорости, т.е. к ускорению. Статическое воздействие силы приводит к деформации твердых тел, к сжатию газов и т.п. Второй закон Ньютона выражает принцип причинности в классической механике: по начальному состоянию (положение и скорость тела) и действующей силе можно определить состояние тела в любой последующий момент времени.

Для решения задач механики важны меры движения (*импульс, момент импульса и кинетическая энергия*) и меры действия силы (*импульс силы и работа*). Соотношения между этими мерами составляют общие теоремы механики. Из них и вытекают *фундаментальные законы сохранения*.

Динамическое свойство тел, описываемых первым законом, называется *инертностью*. Физической величиной, характеризующей инертность тела, является его *масса*. По Ньютону, масса — это количество вещества в теле. Для определения массы тела, ее нужно сравнить с массой тела, принятого за эталон. И при этом следует отвлекаться от всех других воздействий тел, т.е. считать систему двух тел изолированной. Для системы материальных точек вводят понятие *центра масс системы*. Он движется как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и на которую действует результирующая всех внешних сил, приложенных к системе. В динамике Ньютона масса не меняется с изменением скорости, что выполняется при движении со скоростями, много меньшими, чем скорость света. Поскольку произведение массы на скорость есть импульс P , второй закон может быть переформулирован (и этим пользовался сам Ньютон) — сила равна изменению импульса в единицу времени; в изолированной системе импульс не меняется (сохраняется).

Третий закон связывает равенством действие и противодействие. Он утверждает, что силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению. Это означает, что силы возникают попарно, и на каждое действие возникает противодействие. Характер взаимодействия не оговаривается, силы могут действовать на расстоянии между телами — быть гравитационными, электромагнитными или контактными.

Примером контактных сил, т.е. действующих при соприкосновении тел, являются силы реакции. Эти силы действуют перпендикулярно к поверхности контакта между телами. Примером контактных сил, направленных по поверхности соприкосновения, служат силы трения.

Момент силы и момент импульса широко используются при изучении вращений тел. Они определены через операцию, называемую векторным произведением. В отличие от скалярного произведения двух векторов, величина которого равна $(AB) = AB \cos a$, векторное произведение учитывает и направление, определяемое по правилу правой руки, когда пальцы согнуты в направлении от первого вектора A ко второму B , тогда большой палец укажет направление самого произведения, величина которого

равна: $[AB] \sin a$. Обычно для обозначения скалярного произведения векторов используют либо круглые скобки, либо точку между векторами, а для векторного — либо квадратные скобки, либо крестик.

Момент импульса тела по величине равен произведению импульса тела на расстояние до оси вращения, его может иметь тело даже при движении по прямой. Он определяется выражением:

$$L = [r mv].$$

Понятие *момента силы* используется для сил, способных вызвать вращение тел. Если сила F приложена к точке A , расположенной на расстоянии r от оси вращения, а вектор силы перпендикулярен линии AB , создается момент силы $r \times F$. Когда же направление приложенной силы проходит через центр вращения, она не создает момента силы. Пример: приложенная к ручке двери сила приводит дверь во вращение относительно линии косяка или дверных петель, но вращения не будет в случае приложения силы вдоль линии петель. Вращение вызывает только перпендикулярная составляющая силы, и момент силы есть векторное произведение: $T = [rF] = rF \sin \varphi$, здесь φ — угол между векторами r и F .

4.2. МАССА ИНЕРТНАЯ И ГРАВИТАЦИОННАЯ. ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Галилей на опытах с использованием наклонной плоскости открыл явление падения всех тел на Земле с одинаковым ускорением. Масса m связана с весом тела, но вес зависит от массы того тела, к которому притягивается масса m . Поэтому вес не может служить коэффициентом пропорциональности между силой и ускорением, и вводят понятие инертной массы M , которая характеризует «нежелание» тела сдвинуться с места. Масса не зависит от направления движения (это многократно проверялось экспериментально) и с точностью до 10^{-9} является скалярной (лат. *scalaris* «ступенчатый») величиной. (В отличие от векторной величины, каждое значение скалярной величины можно выразить одним, действительным, числом, а совокупность значений изобразить на линейной шкале — таковы длина, площадь, время и т.д.)

Широко известна легенда об открытии Ньютоном закона всемирного тяготения. Но не есть ли движение Луны — явление аналогичное падению хотя бы яблока? Ньютон записал уравнение движения под действием силы тяжести и проверил решение в виде эллиптических траекторий для большого класса начальных условий и не очень больших скоростей. Говоря математическим языком, он доказал не теорему единственности такого решения (это впоследствии сделал И.Бернулли), а подтвердил предложенную Гуком гипотезу обратно пропорциональной зависимости силы тяготения от квадрата расстояний. На камень внутри Земли внешние слои не действуют или поле внутри однородной сферы равно нулю, поэтому однородный шар (или шаровой слой) притягивает точки внешней области так же, как если бы вся его масса была сосредоточена в центре.

Ньютон связал понятия массы и веса тела. Размышляя о движении Луны, он предположил, что Луна падает на Землю так же, как камень или яблоко, но с ускорением во столько

При отсутствии действия внешних сил (система изолирована) действует закон сохранения импульса для поступательного движения и момента импульса для вращения.

Момент силы и момент импульса связаны по второму закону Ньютона: $T = dL / dt$.

Значение построения механики Ньютона становится ощутимым при сопоставлении «Начал» с «Вопросами» в его «Оптике», где он говорит о силах инерции, создающих сопротивление движению. В законах движения Ньютона нет идеи сохранения количества движения (как в механике Декарта), по его словам, «причины таких принципов движения» он «оставляет для дальнейшего исследования». Поскольку в природе существует строгий порядок, мир не мог возникнуть из хаоса, но создан «по замыслу разумного существа». «Но, будучи раз созданным, мир может существовать по этим законам многие века».

Использование законов Ньютона для решения инженерных задач было весьма громоздко, а в решении таких задач уже нуждалась развивающаяся техника. Поэтому в следующем столетии ньютонова динамика интенсивно углублялась, разрабатывалась и совершенствовалась. Судьба закона всемирного тяготения сложилась иначе.

раз меньшим, во сколько квадрат земного радиуса меньше квадрата расстояния между центрами Земли и Луны. «Луна тяготеет к Земле и силою тяготения отклоняется от прямолинейного движения и удерживается на орбите». Гипотеза зависимости притяжения между точечными массами от квадрата расстояний возникла из геометрической аналогии.

Так как расстояние r от Земли до Луны составляет 60 земных радиусов R , а $T = 27,3$ сут. = $2,36 \cdot 10^6$ с, Ньютон оценил отношение ускорений Луны и камня как $1/3600$. В самом деле, ускорение свободного падения тела у поверхности $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, а центростремительное ускорение Луны:

$$W_c = \frac{(2\pi / T)^2}{r} = \frac{(2\pi 60R / 2,3610^6)^2}{60R} = \frac{(1,02)^2}{60} = 0,0027 \text{ м/с}^2,$$

т.е. g примерно в 60^2 раз больше ускорения Луны W . Следовательно, сила тяготения, действующая со стороны Земли на яблоко (или камень), находящееся на орбите Луны, уменьшится в 3600 раз, что и соответствует отношению квадратов расстояний. Значит, сила тяготения между двумя телами должна убывать обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, и гипотеза Ньютона верна.

При таких расчетах Ньютон считал, что небесные тела взаимодействуют так, как будто вся их масса сосредоточена в центре. Доказать это строго он сумел только через 20 лет, но для этого ему пришлось создать *интегральное исчисление*. Если же интересоваться силой, которая действует внутри Земли или другого тела с распределенной массой, то зависимость от расстояния будет иной.

Чтобы проверить выводы Галилея, Ньютон провел серию опытов с маятниками и убедился, что свинцовый и деревянный шары падают с одинаковыми ускорениями. Значит, Земля в этом случае одинаково действует на оба шара. Но если действие измерять не ускорением, а силой, с которой приходится удерживать шары в равновесии на весах, то ее влияние на свинцовый шар будет больше, чем

на деревянный. Такое влияние Земли на каждый шар (или каждое тело) можно выражать тяжестью, измеренной на весах путем сравнения с тяжестью тела, принятой за единицу. Развивая мысль Галилея, Ньютон вводит понятие силы $F = MW$ как меру действия одного тела на другое, отождествляя вес с силой действия, оказываемого на него Землей.

Далее Ньютон указывает, что, если бы вокруг Земли вращалось несколько лун, то все они двигались бы под действием аналогичной силы, и их движение определялось бы законами Кеплера. (Его предсказание подтвердилось через два с половиной столетия, когда были запущены искусственные спутники Земли.) Впоследствии Ньютон перешел к изучению других планет и планетных систем (это определение он вводит после открытия спутников у Юпитера и Сатурна), считая, что силы тяготения должны иметь одну природу — и у поверхности Земли, и в космосе.

По Копернику, пространство однородно и изотропно, в нем нет выделенных направлений и точек. В пространстве работает евклидова геометрия, и физическим действием обладают только те точки, в которых сосредоточена материя. Поэтому на Земле тела падают в направлении не геометрического центра мира (у него — это центр Солнца), а материального центра Земли. Это утверждение справедливо и для других небесных тел — в этом коперниканский принцип универсальной гравитации как функции массы тел.

Признание идей *материального единства мира* — результат коперниканской революции. Если нет различия между земным и небесным, и законы едины для всей Вселенной, то их можно изучать и на Земле. Квадрат расстояния в знаменателе отражает евклидову метрику пространства. То есть, в трехмерном пространстве поверхность сферы пропорциональна квадрату радиуса.

Инертная масса определена динамически: прикладывается известная сила, измеряется ускорение, и из формулы $F = MW$ выводится масса M . В законе тяготения масса определяется статически: измеряют силу взаимодействия между двумя телами, расположенными на определенном расстоянии.

4.3. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА. ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ СИЛА И ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

Вокруг Солнца вращается девять крупных планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. Последние три планеты не видны невооруженным глазом, и они были открыты недавно — в 1783, 1846 и 1930 гг. соответственно. Недавно было сообщение об открытии десятой планеты, еще не получившей имени, которая находится между Нептуном и Плутоном. Все планеты шарообразны, они светят отраженным светом Солнца. Земля расположена от Солнца на расстоянии 149,6 млн км, принимаемом за 1 а.е., а самая далекая из этих планет, Плутон, — на расстоянии в 30 а.е. Таковы размеры солнечной системы. Солнце — одна из огромного числа звезд, которые украшают небосвод. Свет от Солнца доходит до нас за 8,3 с.

И.Кеплер — великий немецкий астроном и математик, открыл три закона движения планет. Первые два были получены на основе исследования движения Марса по

Галилей пришел к выводу о пропорциональности гравитационной m и инертной M масс, сбрасывая тела с высоты. В то время он не мог бы обнаружить это, поэтому он использовал наклонную плоскость, как бы замедлил вертикальную составляющую. Нетрудно заметить, что металлический шарик скатывается с нее с возрастающей скоростью.

Пусть бросили вниз одновременно два тела, отличающиеся весом, — m_1g и m_2g . По второму закону Ньютона, их ускорения соответственно определяются из соотношений: $F_1 = M_1W_1$ и $F_2 = M_2W_2$. Сила, действующая на каждое тело, равна его весу: $m_1g = M_1W_1$ и $m_2g = M_2W_2$. Ускорение каждого тела при падении равно: $W_1 = (m_1 / M_1)g$ и $W_2 = (m_2 / M_2)g$. Эксперимент Галилея показал, что все тела при отсутствии сопротивления падают с одинаковым ускорением, т.е. отношение ускорений равно единице, или $(W_1 / W_2) = (m_1 / M_1) (M_2 / m_2) = 1$. Это возможно только при пропорциональности инертной и гравитационной масс.

Последние эксперименты подтверждают равенство $m = M$ с точностью до 10^{-11} . Опыты венгерского физика барона Лоранда фон Этвеша (1848–1919) показали универсальный характер пропорциональности гравитационной и инертной масс, т.е. при соответствующем выборе единиц измерения коэффициент пропорциональности можно сделать равным единице. Универсальность означает пропорциональность масс для всех веществ, поэтому они измеряются в граммах.

Теория Ньютона не объясняет причину этой пропорциональности, она следует из опытов Галилея: все тела падают с одинаковым ускорением в поле тяжести Земли. Эйнштейн истолковал этот эффект как истинную природу тяготения и положил его в основу общей теории относительности, возведя равенство инертной и гравитационной масс в *принцип эквивалентности*.

Масса отражает то, что сохраняется при превращении тел из одного агрегатного состояния в другое. В современной физике этот закон уточняется и показано, что масса эквивалентна другому физическому свойству энергии. Поэтому соответствующий закон сохранения относится к массе-энергии.

наблюдениям Тихо Браге и опубликованы в 1609 г. Он установил, что орбита Марса — не окружность, а *эллипс*, в одном из фокусов которого находится Солнце. Такая же закономерность оказалась и для движения других планет, только вытянутость эллипса отличалась. Наиболее вытянутую орбиту имеет Меркурий (его эксцентриситет 0,21) и Плутон ($e = 0,25$). Это — *первый закон Кеплера*.

Второй закон: каждая планета движется по своей орбите так, что ее радиус-вектор описывает за равные промежутки времени равные площади. Это значит, что чем ближе планета к Солнцу, тем больше скорость движения по орбите.

Так, Марс вблизи перигелия движется со скоростью 26,5 км/с, а вблизи афелия — 22 км/с. У комет орбиты более вытянуты, чем у планет, поэтому их скорости меняются от 500 до 1 км/с. У Земли эксцентриситет очень мал (0,017), поэтому орбита Земли — почти окружность, по которой

наша планета движется со скоростью 29 км/с. Но в январе она на 2,5 млн км ближе к Солнцу и движется несколько быстрее, чем в июле, когда расстояние на 2,5 млн км дальше, чем 149,6 млн км. В книге «Новая астрономия» (1607 г.) он излагает первые два закона: «планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце» и «каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причём линия, соединяющая Солнце с планетой, за равные промежутки времени проходит равные площади» (рис.4).

Третий закон движения планет Кеплер установил через 10 лет. Он гласит: отношение кубов больших полуосей орбит двух планет Солнечной системы равно отношению квадратов периодов их обращения вокруг Солнца. Большая полуось — это половина максимального расстояния между двумя точками эллипса. Этот закон позволил оценить размеры солнечной системы. Для круговых орбит это означало, что $R_1^3 / R_2^3 = T_1^2 / T_2^2$.

Ньютон использовал эти законы, выведенные из наблюдений и вычислений, при формулировке закона всемирного тяготения. Он сумел показать, что только в случае, если силы, действующие между тяготеющими телами, пропорциональны закону обратных квадратов, то все три закона Кеплера выполняются.

Третий закон (1618 г.) — «квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит» — соответствовал представлениям Кеплера о гармонии и физической причинности, выражая связь между мгновенными значениями меняющихся величин. Так в XVII столетии фактически был сделан первый шаг к математическому анализу. Кеплер понимал, что открытые им численные закономерности могут стать основой новой небесной механики, но не знал действительной причины именно такого движения планет: считая очевидным, что сила, действующая на планеты, должна меняться по закону обратных квадратов, он исходил из внешней аналогии со светом, интенсивность которого меняется как $1/r^2$. Законы Кеплера подходят и для окружностей, поскольку орбиты очень мало вытянуты (рис.25).

Вращение — одно из основных видов движения в поле тяготения, и ему также соответствует определенная энергия. При равномерном движении по окружности скорость равна длине окружности $2\pi r$, деленной на период T , т.е. на время одного оборота. Отсюда для кинетической энергии получим:

$$E_{к. вр} = \frac{mV^2}{2} = \frac{m(2\pi r / T)^2}{2}$$

По Ньютоу, источник центростремительной силы для небесных тел — гравитация. Приравнивая эти две силы, можно получить важные соотношения между периодом T

и радиусом вращения r планеты или спутника: $-GmM / r^2 = -4\pi^2 mr / T^2$. Разделив обе части на $-m$, получим: $GM / r^2 = 4\pi^2 r / T^2$. Перенесем зависимость от r в левую часть: $GM / r^3 = 4\pi^2 / T^2$ и избавимся от дробей: $4\pi^2 r^3 = GMT^2$. Отсюда: $r^3 = (GM / 4\pi^2) T^2$.

Таким образом, мы пришли к третьему закону Кеплера для движения планет: $r^3 \sim T^2$ — кубы радиусов (или больших полуосей) орбит относятся как квадраты периодов.

Получив в свое распоряжение завещанные ему Т.Браге уникальные материалы наблюдений, Кеплер приступил к их обработке и в 1627 г. издал результаты 22-летнего титанического труда — так называемые «рудольфовы» таблицы (в честь императора Рудольфа II), служившие человечеству почти 200 лет. В процессе работы над таблицами Кеплер обнаружил некоторые закономерности в движении планет (сначала для Марса), приведшие его к открытию законов, получивших его имя. Второй закон Кеплера следует непосредственно из закона сохранения момента импульса. Момент импульса планеты дается выражением $L = r m V_{\text{вр}}$, т.е. $L / 2m = (1/2) r V_{\text{вр}}$, но последняя величина равна площади, покрываемой за 1 с. Следовательно, она равна скорости, с которой покрывает площадь прямая, соединяющая Солнце и планету, или $dA / dt, L / 2v = dA / dt$. Но по закону сохранения момента импульса левая часть этого равенства является постоянной, т.е. $dA / dt = \text{const}$.

Итак, закон тяготения связан с законами Кеплера, полученными из наблюдений за движением планет. Закон тяготения и законы Кеплера пригодны для движений под действием тяготения в задаче двух тел, где одно является центральным, а второе вращается вокруг него по эллипсу или окружности.

Гравитация служит источником центростремительной силы для планет, поэтому условием для отрыва ракеты от Земли может служить равенство кинетической и потенциальной энергий гравитации.

Условием движения спутника по круговой орбите является **равенство силы тяготения и центростремительной силы**. Это правило входит в законы планетных движений: квадраты периодов относятся как кубы больших полуосей (радиусов). Если речь идет о притяжении тела Землей, то $g = Gm_3 / r_3^2$ и $F = Gm_3 m / R^2$, где G — универсальная гравитационная постоянная.

В 1798 г. английский физик и химик Генри Кавендиш (1731–1810) измерил G с помощью точных крутильных весов (притяжение двух тел измерялось по углу закручивания нити, который регистрировался с помощью отраженного светового луча) и получил значение $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$.

4.4. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Многие не приняли теорию Ньютона как *теорию действия на расстоянии*. Гюйгенс стал развивать теорию близкого действия, используя гидродинамическую модель вращающейся жидкости, наподобие вихрей Декарта. Лейбниц также придерживался вихревой модели, которая была наглядна в объяснении воздействия тел. Но простой меха-

низм закона очаровал П.Мопертюи, он говорил всем, что Ньютон просто описал факт притяжения, а не объяснял его. Сторонником и пропагандистом теории тяготения Ньютона стал Вольтер. В 1738 г. он издал популярную книгу «Элементы учения Ньютона», сыгравшую большую роль в изменении общественного и научного мировоззрения во Фран-

ции. Была предпринята попытка проверки закона тяготения на Земле, и *критерием стала форма Земли*. По вихревой модели наша планета должна была быть вытянута у полюсов, а по теории Ньютона — сплюснута.

Были организованы специальные экспедиции в Перу и Лапландию (1735, 1736–1737 гг.) для уточнения фигуры Земли. Мопертюи руководил экспедицией на север, которая показала сплюснутость нашей планеты у полюса, а сам Мопертюи получил известность как «великий сплюсциватель», поскольку было установлено, что Земля сплюснута, и экваториальный радиус больше полярного на 21 км. В этой экспедиции принимал участие А.Клеро. После возвращения он обработал полученные результаты и опубликовал книгу «Теория фигуры Земли», построенную на основе гидростатической модели эллипсоида вращения. Клеро предположил, что Земля ранее была жидкой, ее частицы взаимодействовали друг с другом по закону всемирного тяготения, и вся масса медленно вращалась вокруг неподвижной оси. Эта работа имела огромное значение для геодезии и теории Земли. Тем самым теория тяготения Ньютона получила подтверждение на Земле. Это нанесло удар по взглядам ученых, которые считали, что все процессы физического мира можно представить наглядно.

Солнечную систему, согласно закону Ньютона, можно представить в виде гигантского механизма, в котором движением всех его элементов управляет сила притяжения. Однако, изучая движение конкретной планеты, например, Марса, нельзя не учитывать воздействие на координаты его орбиты других планет и их спутников, хотя оно и мало по сравнению с притяжением Солнца и сводится к так называемым *возмущениям*, или пертурбациям (лат. *perturbatio* «расстройство, смятение»). Английский астроном и геофизик Э.Галлей, изучая материалы астрономических наблюдений, обратил внимание на сходство орбит комет 1456, 1531, 1607, 1682 гг. и периодичность их появления (около 76 лет). Он пришел к выводу, что во всех этих случаях была одна и та же комета, и предсказал ее возвращение в 1758 г. Однако из-за возмущающего действия Юпитера и Сатурна, комета Галлея несколько запоздала и появилась только в следующем, 1759 году почти в точном соответствии с расчетами Клеро — он ошибся только на 19 дней! *Предсказание возвращения кометы стало первой убедительной победой теории Ньютона*.

Клеро проверял теорию Ньютона и по *движениям Луны*. Он составил точные лунные таблицы и по своим разработкам написал книгу «Теория движения Луны», изданную в Петербурге в 1751 г. За теорию движения Луны и предсказание появления кометы Галлея Клеро получил премию Петербургской Академии наук. Близость Луны к Земле позволяла провести измерения достаточно точно. Еще в 1693 г. Галлей заметил, что современные ему данные по орбите Луны расходятся с древними наблюдениями так, будто орбита уменьшается за столетие на 10". Объяснения этому явлению давали Эйлер и Лаплас (1787 г.), но они верны только отчасти. Эйлер связывал ускорение с торможением в окружающей среде, а не с тяготением. По Лапласу, оно определяется малыми изменениями вытянутости земной орбиты из-за планетных возмущений. Такие колебания существуют, они вызывают наступления ледников,

поскольку за десятки тысяч лет широта местности может измениться на 35°. Но кроме этого фактора есть еще ускорение Луны, вызванное приливами. Этот эффект кажущийся, по-тому что причина — замедление вращения Земли из-за *приливного трения*. Если дать оценку влияния за миллиард лет, то сутки удвоятся, а Луна удалится от Земли до 600 тыс. км.

Другим явлением, которое вроде бы позволяло усомниться в пригодности закона тяготения Ньютона, было замеченное ранее *некоторое ускорение Юпитера и замедление Сатурна* (Кеплер, 1625 г. и Галлей, 1695 г.). Такой процесс должен был бы за долгие миллионы лет разрушить солнечную систему, но этого не произошло. Анализ планетных возмущений привел Лагранжа (1776 г.) и Лапласа (1784 г.) к так называемой *теореме устойчивости* солнечной системы: взаимные возмущения планет, движущихся по почти круговым орбитам примерно в одной плоскости и в одну сторону, приводят лишь к почти периодическим колебаниям эксцентриситетов и наклонов вблизи нуля, тогда как расстояния до Солнца колеблются вблизи своих начальных значений. Или — большие оси эллипсов не испытывают вековых возмущений. И эта теорема была доказана Лапласом совершенно строго для первых членов ряда возмущений. Взаимные возмущения Юпитера и Сатурна существуют, и их величина колеблется с периодом в 900 лет. За 450 лет накопления возмущений эта величина составляет меньше одного градуса.

Самым убедительным подтверждением ньютонова закона тяготения явилось открытие «на кончике пера» еще одной планеты, названной Нептуном. В марте 1781 г. У.Гершель открыл новую планету Уран. Для нее были вычислены элементы орбиты и составлены таблицы движения по закону Ньютона. Но через некоторое время заметили, что Уран в своем движении отклоняется от рассчитанного: за 3 года отклонение составило 2', при точности измерений в доли секунды. Молодой французский астроном-теоретик У.Лeverье предположил, что это отклонение вызвано влиянием неизвестной планеты, находящейся дальше Урана, и сделал расчет ее орбиты. Leverье сообщил о результатах в письме от 18 сентября 1846 г. берлинскому астроному Галле, который имел звездные карты, содержавшие слабые звезды. Галле сразу же обнаружил в указанном месте слабую звездочку 8-й величины, которой на картах не было. На следующий день звездочка переместилась относительно ближайших звезд, а в более сильный телескоп удалось разглядеть маленький диск. Несомненно, это была новая планета солнечной системы, предвычисленная по закону всемирного тяготения. При этом ее положение на небе отличалось от предсказанного расчетом Leverье всего на 52". В это же время молодой английский студент, впоследствии известный астроном, Дж.Адамс независимо от Leverье проделал нужные расчеты, поэтому у математического предсказания два автора, но официально признан первый. Позже было обнаружено, что в зарисовках Галилеем видимого в его телескоп участка неба есть слабенькая звездочка, которую он не догадался принять за планету.

Открытие новой планеты «на кончике пера» явилось величайшим триумфом науки и, конечно, закона всемир-

ного тяготения. Границы солнечной системы расширились почти вдвое.

Планета солнечной системы, Плутон, была открыта 21 января 1930 г. Еще в 1915 г. П.Ловелл решил задачу об орбите новой планеты за Нептуном, которую назвал «планетой X». Поиски ее были вызваны необъяснимыми неправильностями в движении Урана, а не Нептуна, как можно было подумать. Со времени первых наблюдений Нептуна не прошло еще и его «года» (на один оборот вокруг Солнца Нептун затрачивает 165 лет, ведь он удален от Солнца на 4,5 млрд км, или на 30 а.е.). Как уже указывалось, для Нептуна правило Бодэ-Титиуса не выполнялось, планета должна быть несколько дальше, и потому время ее обращения вокруг Солнца должно бы приближаться к 300 земных лет. Поэтому выделить смещение столь неяркой звездочки среди звезд было невероятно трудно. Ловелл выделил все ошибки и неточности в расчетах движения Урана, но открыть новую планету не успел. Удача открытия Плутона выпала на долю молодого К.Томбо. Ему было 23 года, когда он почти случайно обнаружил звездочку слабее 17-й величины на снимке среди тысяч других, так как расчеты Ловелла оказались неточными. Орбита новой планеты оказалась вытянутой столь сильно, что она заходит даже внутрь орбиты Нептуна, как и с 1979 по 1999 г.

Смещение перигелия Меркурия, обнаруженное около ста лет назад, не удавалось объяснить. По Ньютону, если сила тяготения точно соответствует закону обратных квадратов, то эллиптические орбиты планет не должны меняться со временем, т.е. и ближайшая к Солнцу точка орбиты — *перигелий* — не должна смещаться по отношению к неподвижным звездам. Не учитываемый ньютоновской теорией эффект составлял 43" в столетие, перигелий прецессировал, и орбита напоминала поворачивающийся эллипс. Само измерение столь малой величины с такой точностью представляет собой большое достижение (погрешность менее 1%). Подозревали, что есть еще одна планета, возмущающая орбиту Меркурия, ее даже условно назвали Вулканом, но не нашли. Возмущения от планет поддаются расчетам, но все иные отклонения требовали бы в законе иную степень. Появилось мнение, что закон всемирного тяготения неточен. Поправил закон Ньютона в 1915 г. А.Эйнштейн: смещение перигелия планеты Меркурий удалось объяснить только в рамках общей теории относительности (ОТО). Эти поправки для закона Ньютона могут играть роль только вблизи больших тяготеющих масс (например, черных дыр).

По ОТО, перигелий орбит при каждом обороте планеты вокруг Солнца должны перемещаться на долю оборота, равную $3(v/c)^2$. Для Меркурия угол поворота перигелия за сто лет составляет 42,91". Эта величина соответствует обработке наблюдений Меркурия с 1765 по 1937 гг. Так была объяснена прецессия перигелия орбиты Меркурия. Было показано, что для практических задач закон Ньютона дает хорошие результаты, но для больших скоростей и вблизи больших масс нужны иные законы (рис.5).

У.Гершель, открывший планету Уран и два ее спутника и измеривший звездный параллакс, хотел доказать, что острова во Вселенной существуют в самом деле, каждый из них состоит из миллионов звезд, которые удерживаются

вместе в динамической системе за счет взаимного притяжения. Подобно Гюйгенсу и Ньютону, он считал, что все звезды имеют одинаковую светимость. В таком случае яркая звезда в паре со слабой должна находиться к нам ближе, чем слабая, и тогда ее смещение за год будет больше. За 1782–1784 гг. Гершель измерил угловые расстояния примерно 700 звезд, но смещения были не те, что он ожидал. И только в 1803 г. он понял, что открыл *орбитальные движения звезд*, которые образуют физические пары и компоненты которых движутся вокруг общего центра масс в соответствии с законом Ньютона. Значит, этот закон всемирный. На основе ньютонова закона тяготения У.Гершель, Кант и Ламберт стали объяснять видимые явления во Вселенной. У.Гершель открыл *двойные звезды*, составив к 1784 г. каталог из семисот двойных и кратных звезд. Он впервые применил закон всемирного тяготения вне пределов солнечной системы и установил **наличие орбитального движения** (вокруг общего центра тяжести) для двойных звезд. Впоследствии эти звезды были названы *визуально-двойными*.

Кроме того, Гершель пришел к выводу, что звезды в некоторых парах имеют разную светимость, а таких пар, где яркость одной превышала яркость другой в сотни раз, оказалось множество, что не могло быть объяснено разной удаленностью звезд в каждой паре. По Гершелю, все наблюдаемые в телескоп звезды образуют вместе с Млечным Путем тот остров, к которому принадлежит и наше Солнце, а далекие «мировые острова» представляются нам туманностями, как считал еще Кант. Гершель считал, что планетарные туманности — это звездные системы в последней стадии гравитационного коллапса, и потому «звезды, их образующие в результате некоторых нарушений или утраты энергии, уже не могут больше поддерживать своего первоначального положения... и, наконец, собираются вместе и вследствие соударений объединяются в новое тело». Это объясняло природу «новой» звезды, которую видел Тихо Браге в 1572 г. Гершель столкнулся в 1790 г. с новым явлением — «звездой примерно 8-й величины со слабо-светящейся атмосферой!» Это была *планетарная туманность* NGC 1514. И он нашел объяснение — это звезда, конденсирующаяся из облака светящегося вещества под действием гравитации. Так У.Гершель все более подчеркивал единство Вселенной и роль в этом закона всемирного тяготения.

Таким образом, к триумфам закона всемирного тяготения можно отнести в Солнечной системе: предсказание возвращения кометы Галлея, объяснение движений Луны, оценки планетных возмущений, обнаружение планеты Нептун по возмущениям планеты Уран, а затем планеты Плутон, сплюснутость Земли у полюсов, траектории астероидов, полеты космических аппаратов и т.п.

Вне Солнечной системы — движение звезд в системе двойных звезд и звездных систем. Но и вне Солнечной системы использование закона тяготения привело к появлению ряда парадоксов (фотометрическому, космологическому и др.), которые были разрешены только в ОТО.

В закон Ньютона входит универсальная гравитационная постоянная G , определенная в опытах Кавендиша. Знание ее позволило «взвесить» нашу планету. **Средняя плот-**

ность Земли оказалась больше плотности вблизи ее поверхности, и пришлось признать, что Земля неоднородна, а ее плотность растет с глубиной. Это подтверждают и другие исследования, в частности сейсмические.

На земной поверхности ускорение свободного падения примерно постоянно. Оно отличается из-за сплюснутости у полюсов на 0,18% и из-за центробежных сил при перемещении от экватора к полюсу — на 0,34%. Уровень земных морей и океанов, испытывающий периодические изменения, связанные с лунными сутками, зависит от *приливного* (или *дифференциального*) *гравитационного притяжения*.

С ним же связаны и другие эффекты, которые (хотя и малы) заметны: так, лунные сутки примерно на час длиннее, ось вращения Земли испытывает прецессию с периодом примерно 26 000 лет, большая ось лунной орбиты вращается

в прямом направлении (в направлении ее орбитального движения) с периодом почти 9 лет, точки пересечения лунной орбиты с земной (узлы лунной орбиты) движутся несколько назад вдоль орбиты с периодом 18,6 лет и т.д. При этом **приливообразующая сила** Луны более чем в 2 раза больше, чем Солнца, поскольку эта сила пропорциональна кубу расстояний (что следует из расчета с использованием закона тяготения Ньютона).

Точное и устойчивое решение задачи трех тел, как было показано позднее Лагранжем, возможно только в том случае, когда три тела лежат в вершинах равностороннего треугольника, вращающегося вокруг центра масс данной системы с постоянной угловой скоростью $2\pi/T$. Эти точки устойчивости определяют оптимальные условия работы космических станций.

4.5. СВЯЗЬ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ СО СВОЙСТВАМИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Закон всемирного тяготения определяет притяжение *двух точечных масс*. Для *двух точечных неподвижных зарядов* сила электростатического взаимодействия (*закон Кулона*) имеет такой же вид, как и в поле гравитации, только вместо масс будут стоять заряды q и Q . Знак зарядов может быть разным в отличие от масс, которые всегда положительны. Поэтому сила может быть притягивающей (-) или отталкивающей (+).

Если тело не подвергается никакому воздействию, его состояние движения (скорость) остается постоянной. При взаимодействии двух тел сохраняется импульс $P = Mv$. *Инертная масса* M определяется так, чтобы импульс при столкновении двух тел оставался неизменным. При упругом столкновении тел сохраняется еще одна величина — $(1/2)Mv^2$, или *кинетическая энергия* (раньше ее называли *живой силой*). Эта величина всегда положительна. При неупругих и прочих взаимодействиях изолированных двух тел сохраняется сумма кинетической и *потенциальной энергий*, или *полная энергия системы*.

В изолированной системе сохраняется и момент импульса, который часто называют кинетическим моментом. Он равен векторному произведению расстояния r от оси вращения и импульса Mv .

Реакция вращающейся системы на внешнее воздействие проявляется в *гироскопических эффектах*. Земля — большой волчок, и ось ее вращения сохраняет свой наклон по отношению к горизонтالي практически неизменным, но испытывает прецессию относительно вертикальной оси.

Потенциальную энергию считали равной «ушедшей» на время кинетической энергии. Выделим три случая:

а) в поле гравитации потенциальная энергия пропорциональна вертикальному смещению тела и его инертной массе $E_{\text{п.гр}} = Mgh$. Более точным является выражение $G(mM/r)$, в которое входят расстояние до центра Земли r и универсальная постоянная G . По мере удаления от центра Земли потенциальная энергия начинает убывать скорее, и в знаменателе этой формулы будет стоять r^2 . При малых перемещениях вблизи поверхности сохраняется Mgh ;

б) потенциальная энергия пружины пропорциональна квадрату ее деформации $E_{\text{п.пр}} = (1/2)kx^2$;

в) магнитная потенциальная энергия в грубом приближении обратно пропорциональна первой степени расстояния между магнитами: $E_{\text{п. магн}} = K/x$.

Наклон графика зависимости потенциальных энергий от расстояния отражает тенденции изменения.

Сила, которую развивает система при убывании ее потенциальной энергии, выражается через наклон кривой потенциальной энергии, взятой со знаком «минус»: $F = -(\partial E / \partial x)$. Сила измеряется соответственно в Дж/м. В честь Ньютона эту единицу назвали ньютоном: 1 Дж/м = 1 Н.

Для указанных выше значений потенциальных энергий получим значения силы по записанной выше формуле. Поскольку для потенциальной энергии гравитации, равной Mgh , график — прямая с постоянным наклоном, то и сила гравитации равна Mg . Она представляет вес тела и направлена вертикально вниз. Для сжатой пружины потенциальная энергия пропорциональна квадрату сжатия, поэтому сила пропорциональна величине сжатия и направлена в противоположную сторону: $F = -kx$. Для отталкивания цилиндрических магнитов потенциальная энергия пропорциональна обратной величине расстояния между полюсами магнитов, поэтому сила пропорциональна обратной величине квадрата расстояния, т.е. $1/x^2$.

Работа есть скалярное произведение силы на перемещение, на протяжении которого она действует, можно записать: $A = F \cdot x$. Но работа равна изменению потенциальной энергии той системы, на которую сила воздействует. А сила может увеличить и скорость тела (кинетическую энергию), и его потенциальную энергию, связанную с его положением. Отсюда иное определение силы:

Сила — это изменение потенциальной энергии системы, отнесенное к тому расстоянию, на котором оно произошло, равно изменению импульса системы, отнесенному к тому времени, за которое оно произошло. Это понятие наглядно, оно сохранилось с древних времен, а в современной науке оно является производным от энергии, сохраняющейся величины.

В *изолированных системах* при движении сохраняется **полная энергия** системы. Кроме того, для поступательного

движения сохраняется **импульс**, а для вращательного — **момент импульса**. Поскольку последние две величины — векторные, и каждой из них соответствует по три сохраняющихся компоненты импульса и момента импульса. Таким образом, при взаимодействиях в изолированных системах имеют место **семь сохраняющихся величин**.

Установленные связи между свойствами пространства и времени и законами сохранения содержались в скрытой форме в *принципах классической механики* Галилея–Ньютона. Галилей рассматривал пространство и время как реальности, существующие вне нашего сознания. Открытый им принцип относительности отражал *однородность* и *изотропность* пространства. У Ньютона пространство и время абсолютны в том смысле, что свойства пространства не зависят от движущихся в нем тел и протекающих механических явлений, а свойства времени — от движущейся материи. Пространство и время не связаны между собой, они как бы арена, где происходят события. Однородность и изотропность пространства и времени необходимо следуют из законов Ньютона.

Впоследствии оказалось, что законы Ньютона можно заменить единым постулатом — *вариационным принципом*, который был удобнее во многих отношениях, в частности, в том, что его можно использовать при формулировке сложных задач. В механике материальной точки этот постулат равноценен законам Ньютона. Схему, основанную на законах Ньютона, иногда называют *векторной механикой*, поскольку она имеет дело с векторными величинами, например, скоростью, силой, ускорением.

Аналитическая механика — другая схема построения механики, введенная Лейбницем и развивавшаяся Эйлером, Лагранжем, Гамильтоном. Ее величинами были скаляры, и динамические соотношения получались через операции дифференцирования. Методы аналитической механики позволили решать более сложные задачи, причем оказалось, что их можно распространить на теорию поля или квантовую механику, где ньютонова механика не применима. В аналитической механике для замкнутых систем существуют такие функции координат и скоростей образующих систему N материальных точек, которые при движении не меняются. Если в системе N материальных точек, то таких сохраняющихся величин, называемых интегралами движения, будет $N - 1$. Среди них есть такие, которые обладают свойством *аддитивности*. Это свойство можно охарактеризовать так: значение интеграла движения для системы, состоящей из невзаимодействующих частей, равно сумме значений для каждой из частей в отдельности. Все эти три сохраняющихся величины (или семь скалярных) и являются интегралами движения.

Эстетически вернее было бы постулировать законы механики в аналитической форме, а потом показать, что в некоторых ограниченных простейших случаях можно получить законы Ньютона. Но векторная форма проще и нагляднее, поэтому решение — какой путь избрать при обучении — неоднозначно. В аналитической механике показывается, что состояние любой системы можно описать введением функции Лагранжа, зависящей от координат и скоростей. И если известно, что в моменты времени t_1 и t_2 система занимает определенные положения, характе-

ризуемые наборами координат, то среди возможных движений между этими положениями реальным будет то, вдоль которого действие будет иметь минимум. Действием называется интеграл от функции Лагранжа от t_1 до t_2 :

$$S = \delta L(q, \dot{q}, t) dt.$$

Для сложных систем, которые имеют N степеней свободы, оказываются N сохраняющихся величин. Но не все они одинаково важны, некоторые имеют общее значение, связанное со свойствами симметрии пространства и времени. *С однородностью времени оказался связан закон сохранения энергии, с однородностью пространства — закон сохранения импульса, с изотропией — закон сохранения момента импульса*. Мы не имеем возможности получить здесь эти законы из свойств симметрии из-за необходимости использовать математический анализ. С этим, безусловно, увлекательным выводом можно познакомиться в более специальной литературе. Но общий вывод аналитической механики приводит к мысли, что перечисленные законы сохранения потому и стали великими, что связаны и определяются свойствами *симметрии* пространства и времени.

«*Симметричное* обозначает нечто, обладающее хорошим соотношением пропорций, а симметрия — тот вид согласованности отдельных частей, который объединяет их в целое. Красота тесно связана с симметрией», — писал Г.Вейль. При этом он ссылается не только на пространственные соотношения, но также синонимом симметрии считает гармонию, указывающую на акустические и музыкальные приложения идеи симметрии. Многим творениям человеческих рук симметричная форма придается как из эстетических, так и практических соображений. Симметрия широко распространена в природе (вспомним причудливую симметрию снежинок).

Зеркальная симметрия в геометрии относится к операциям отражения или вращения. Она была особо почитаема на древнем Востоке, что отражено в орнаментах и скульптурах той эпохи. Западное искусство, напротив, смягчало и даже слегка нарушало строгую симметрию. Мелкие организмы, взвешенные в воде, имеют почти шарообразную форму. У организмов, живущих в морских глубинах и подверженных давлению тяжести, множество поворотов вокруг центра (т.е. вращательная способность) свелось к отдельным поворотам вокруг некоторой оси. Действие факторов филогенетической эволюции, стремившейся вызвать наследственное различие между правым и левым, тормозилось теми преимуществами, которые животное извлекало из зеркально-симметричного расположения своих органов. Этим можно объяснить, почему наши конечности более подчиняются симметрии, чем внутренние органы. Возможно, это связано и с онтогенезом левого и правого, с плоскостью первого деления клетки.

Наибольшей симметрией обладают кристаллы, но не у всех из них наблюдается зеркальная симметрия. Существование оптически активных кристаллов, т.е. поворачивающих плоскость поляризации падающего на них света, долгое время казалось удивительным. Было установлено, что большинство соединений углерода в природе встречается и в той, и в другой форме. Расположение сердца и закручивание кишечника у человека почти всегда (99,98%)

левостороннее. В нашем теле у глюкозы правовращающая форма, у фруктозы — левовращающая.

В пространстве различие между правым и левым связано с ориентацией винта, т.е. структура пространства не позволяет отличить их иначе, как с помощью договоренности или произвольного выбора, на что указывал еще Лейбниц. В физике правое и левое — эквивалентны, а в мифологических представлениях символизируют соответ-

ственно добро и зло. Люди при встрече пожимают друг другу правую руку, в живописи правое создает иное настроение, чем левое.

Понятие симметрии играет в жизни человека важную роль. Природа красива и требует для своего описания красивых уравнений. Возможность записать законы природы с помощью математического кода — величайшее открытие человечества.

Глава 5. КОНТИНУАЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОПИСАНИЯ ПРИРОДЫ

5.1. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В ПРИРОДЕ И ИХ ОПИСАНИЕ. ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР

Современный мир полон волн: волны звука, распространяющиеся в воздухе и других веществах; переменный ток, используемый в быту и технике; волны механических колебаний в струнах или кристаллах кварца, используемые для стабилизации частот радиопередатчика или в часах; волнение и зыбь в озерах, прудах и океанах; волны землетрясений, изучаемые сейсмологами; электромагнитные волны, которые образуют свет и передают информацию по теле- и радиоканалам; волны вероятности, используемые в мире квантов для предсказания поведения микрочастиц и более сложных форм вещества; волны гравитационные, которые хотят поймать из дальнего космоса, и т.д.

Механические колебания — это движения, которые (точно или почти точно) повторяются через определенные промежутки времени. Чаще всего они возникают при нарушении устойчивого состояния равновесия системы, при выведении системы из этого состояния равнодействующая сил не равна нулю. При этом одна из сил должна зависеть от времени, и система должна обладать избыточной энергией. Если трением пренебречь, за полное колебание выполняется закон сохранения и превращения энергии. Колебания могут происходить при наличии упругих сил, силы тяжести; электрические колебания (напряжений и сил токов) происходят в электрических цепях, вокруг которых колеблются напряженности электрического и магнитного полей. Несмотря на разную природу колебаний, в них обнаруживаются общие закономерности. Система, совершающая колебания, называется *осциллятором*.

Волны — это изменение состояния среды, распространяющееся в ней без переноса вещества и несущее с собой энергию и импульс. Энергия, импульс и скорость — важнейшие характеристики волн. Процесс распространения колебаний (волна) может быть описан в общем виде математически и применим ко многим системам. Основные свойства волн можно изучить на простых примерах и сформулировать общие положения, которые будут справедливы для любого типа волн.

Электромагнитные волны, приходящие на Землю от Солнца, в широком диапазоне длин волн несут энергию порядка 1 кВт/м^2 ; эта энергия преобразуется зелеными растениями в химическую. При сжигании дерева или угля мы вновь высвобождаем эту энергию и используем ее. Наличие импульса у электромагнитных волн менее заметно, но оно было даже измерено в 1912 г. П.Н.Лебедевым. Существуют даже проекты использования светового давления на огромные паруса для передвижения в Солнечной

системе. Морские волны бьются о берега, при штормах ворочают огромные камни и переворачивают гигантские корабли. Телецентр излучает волны мощностью в десятки тысяч ватт, малую долю которых улавливают наши телевизоры. Во всех этих ситуациях волны переносят энергию любой величины от одной точки к другой. Волны распространяются в пространстве с конечной скоростью, зависящей от среды их распространения: так, световые волны распространяются со скоростью $300\,000 \text{ км/с}$, звуковые (в воздухе) — 344 м/с .

На языке колебаний и волн наиболее ясно предстает единство природы. *Гармонические колебания* описываются функцией: $A = A_0 + A \sin(kt + \varphi_0)$, где A_0 , A , k , φ_0 — постоянные величины: A — амплитуда колебаний, $(kt + \varphi_0)$ — фаза, A_0 — центр гармонического колебания, k — круговая частота, $(2\pi/k) = T$ — период колебаний, $(1/T) = \nu$ — частота. Если амплитуда убывает со временем, то колебания являются *затухающими*; если они происходят под действием внешней, периодически повторяющейся силы, их называют *вынужденными*; если же — за счет внутренних сил системы после выведения системы из состояния равновесия, то это — *свободные колебания*. Колебательные явления могут иметь разную природу, но обладают общими чертами и даже подчиняются общим закономерностям, что позволяет единым образом рассматривать механические, электрические и другие колебания. Поэтому их классифицируют и по способу возбуждения, по зависимости какой-то изменяющейся величины от времени и пр. По способу возбуждения различают колебания *собственные, вынужденные, параметрические и автоколебания*. С точки зрения кинематики различают периодические и непериодические колебания.

Всякая система, совершающая колебания, обладает своим способом колебательного движения, которому соответствуют *собственные колебания*, а им, в свою очередь, *собственные частоты*. В любом колебании можно выделить собственные колебания системы. Если на систему подействовать периодически меняющейся силой, то система откликнется малыми колебаниями, частота которых будет совпадать с частотой вынуждающей силы. Если частота внешней силы совпадет с одной из собственных частот системы, то развивающиеся колебания будут иметь большую амплитуду. Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частот вынуждающей внешней силы с собственной частотой системы называется *резонансом*. Резонанс имеет место при

настройке радиоприемника на частоту передающей станции. В нелинейных системах, содержащих источник энергии, могут возникать незатухающие колебания и без внешнего воздействия — это *автоколебания*. А при внешнем воздействии в таких системах могут возникать *автопараметрические колебания*. Любое повторяющееся движение можно рассматривать как результат сложения простых гармонических колебаний, а любое волновое движение — как сумму простых гармонических волн.

Этот тезис, доказанный (1822 г.) французским математиком и физиком Ж.Б.Фурье, служит основой для изучения повторяющихся явлений в самых разных областях. Волновые свойства света и микрочастиц лежат в основе современной картины мира. Гармоническое колебание играет значительную роль при изучении колебаний, отличающихся от гармонических (особенно в акустике и оптике).

Гармонический осциллятор, определяемый колебаниями массы, прикрепленной одним концом к пружине, является самым простым примером гармонического движения. Если сместить массу, а затем это воздействие устранить, то со стороны пружины на массу будет действовать *возвращающая сила*, направленная в сторону, противоположную силе, вызвавшей смещение (будем считать, что трение отсутствует). Для небольших смещений x возвращающая сила $F = -kx$. Используя второй закон Ньютона, можно записать: $F = MW = -kx$, откуда ускорение равно: $W = -(k / M)x$.

Это выражение — *основной закон простого гармонического колебания* — ускорение материальной точки математического маятника пропорционально смещению. Под *математическим маятником* понимают маятник, состоящий из точечной массы, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити. При малой амплитуде почти каждый колебательный процесс можно считать гармоническим.

Период колебаний маятника при малых амплитудах, как еще Галилей установил, определяется его длиной и не зависит от массы маятника. Период колебания маятников разной длины пропорционален квадратному корню из их длин $T_m = 2\pi \sqrt{(L/g)}$; пружины — обратно пропорционален собственной частоте колебаний $\omega = 1 / \sqrt{(M/k)}$. Это свойство *изохронности* колебаний маятника использовалось в XVII в. для отсчета равных промежутков времени, но колебания затухали, приходилось маятник подталкивать, и не было автоматического счета числа колебаний. Гюйгенс применил маятник в своих часах в качестве регулятора и довел их до практического применения и коммерческого успеха. Восемнадцатое столетие даже получило наименование века часов, хотя тогда они использовались, в основном для определения долготы места.

Монохроматической называется волна, возбуждаемая гармоническим источником. Если колебания происходят по гармоническому закону, то при распространении волны от источника до точки, отстоящей на расстоянии z , волна приходит с некоторым запаздыванием (связанным с конечной скоростью распространения волны: $x(t, z) = A \cos(t - z/u)$, где u — скорость распространения волны). В плоской волне амплитуда одинакова везде, а в сферической — убывает обратно пропорционально квадрату радиуса.

Волновой фронт — это геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени. Волновой фронт отделяет область пространства, вовлеченную в волновой процесс, от той, где колебания еще не возникли. Геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе, называют *волновой поверхностью волны*. В зависимости от волновой поверхности волны могут быть *плоскими* или *сферическими*. Выделяют и волны, которые распространяются по поверхности раздела двух сред. Если длина волны меньше глубины водоема, то каждая частица воды на поверхности и вблизи нее движется по эллипсу — комбинация колебаний в продольном и поперечном направлениях. Вблизи дна — чисто продольное движение. Такие волны называют *поверхностными*.

Если тело участвует в нескольких волновых движениях, то эти движения складываются в одно. Волновое движение образуется, если колеблющихся частиц много, и они связаны между собой. Каждая из колеблющихся частиц испытывает влияние сил, стремящихся вернуть их в первоначальное положение. Поэтому сами частицы или части пружины, например, больших перемещений не совершают, но вдоль пружины распространяется импульс. Если следить за перемещением импульса, проходящего расстояние dx за время dt , то можно ввести его *скорость* как $v = dx/dt$. При не очень больших возмущениях среды волновое движение подчиняется *принципу суперпозиции*, т.е. два импульса могут распространяться в разных направлениях совершенно независимо. Если два импульса проходят через пружину и друг через друга, смещение пружины оказывается равным сумме отдельных смещений. Импульсы, равные во всех отношениях, гасят друг друга в момент встречи (если имеют противоположные знаки) или складываются (при одинаковом направлении распространения).

Бегущая волна образуется следующим образом. Пусть один конец пружины или струны закреплен и ни одна точка не испытывает смещений, а ко второму концу приложена сила, которая начинает в момент времени $t = 0$ поднимать и опускать его. При распространении этого воздействия на соседние участки по струне или пружине побегит волна со скоростью $v = dx/dt$. Расстояние x , которое данный участок волны проходит за время t , равно $x = vt$. Период T возбуждающего колебания будет и *периодом волны*, за время T волна распространяется на расстояние, называемое *длиной волны*. Тогда скорость волны $v = (\lambda/T) = \lambda\nu$. Отсюда и $x = vt = (\lambda t/T)$.

Амплитуда волны меняется как: $y(t) = y_0 \cos(2\pi/T)t$. Из выражения для скорости волны получаем: $t/T = x/\lambda$. Тогда зависимость амплитуды волны от координаты в любой момент времени: $y(x) = y_0 \cos(2\pi/\lambda)x$.

В **поперечных волнах** частицы перемещаются перпендикулярно направлению распространения волны. Таковы электромагнитные волны: направления электрического и магнитного полей перпендикулярны направлению распространения. Поперечные волны распространяются в твердых материалах, даже звук в твердых телах распространяется в виде поперечных волн. Из-за большой плотности среды скорость распространения звука в них выше, чем в газе. Смещение среды может также вызвать импульс, распространяющийся перпендикулярно к смещению. Этот вид волн

соответствует деформации сдвига в твердых телах, но в них возможно распространение и волн типа сжатие-растяжение. Такой эффект мы наблюдали, когда резким боковым движением посылали импульс вдоль веревки.

В **продольных волнах** частицы перемещаются вдоль направления распространения волны «взад — вперед». Пример — распространение звука или волн сжатия — растяжения в самой пружине, и эти колебания происходят по гармоническому закону. В звуковых волнах плотность газа, где распространяется звуковая волна, меняется по синусоидальному закону. При забивании гвоздя молотком продольный импульс высокой плотности пронесется вдоль гвоздя, загоняя его конец все глубже. Продольную волну можно легко изобразить, начертив сначала поперечную волну и затем повернув ее отдельные смещения на 90° , например, так, чтобы смещению вверх соответствовало смещение в продольной волне направо. Если проследить за направлением движения начерченных поперечной и продольной волн, равно как и за направлением движения отдельных частиц, то на основании следующего рисунка можно заключить, что в местах сгущения частицы движутся в направлении распространения волны, а в местах разрежения — в противоположном. В газах и жидкостях возникают волны сжатия, но никогда — при сдвиге.

Стоячая волна возникает следующим образом. Если у струны закрепить оба конца, импульс будет отражаться от обоих концов и бегать по струне. Поскольку расстояния между импульсами одинаковы, то процесс на выбранном участке будет тоже повторяться. Если первоначальный импульс — синусоидальный и оба импульса равны по амплитуде, распространяются в разные стороны, и смещение в точке поворота меняет знак, можно получить также синусоидальную волну, форма которой между двумя закрепленными точками остается неизменной, а амплитуда меняется в зависимости от времени. Точки, в которых смещений нет, называют *узлами* стоячей волны. На струне длиной L можно возбудить стоячие волны, и, если ее длина такова, что узлы приходятся на точки закрепления струны: $n(\lambda/2) = L$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Точки максимального отклонения вниз или вверх, называются *пучностями* стоячей волны. На соседних участках колебания противоположны по фазе. Стоячие волны на струне можно представить и как результат сложения двух бегущих волн. При наложении друг на друга они создадут весьма устойчивую картину. Если мы уловим момент, когда бегущие волны будут в противофазе, то струна (или веревка) в этот момент будет совершенно прямой.

Понятие стоячих волн, зародившееся в науке о звуковых колебаниях, сыграло большую роль в других областях физики. Оно было распространено на другие колебательные системы, благодаря чему была решена задача теплового излучения, приведшая к созданию квантовой гипотезы. С использованием этой модели и волновой механики сумели описать строение атома. В современной теории атом рассматривается как система, обладающая определенными формами стоячих волн с характеристическими частотами. Вместо орбит в модели атома Бора теперь вводят замкнутые кольца стоячих волн. Чем дальше орбита, тем большее число пучностей должно войти в это кольцо.

По тому же принципу строятся модели для атомного ядра. Волны — это не просто участки струны, отклоняющиеся вверх и вниз, и даже не колеблющиеся электроны, а *мера вероятности* того, что частица находится в данном месте.

Волны на поверхности воды являются важным типом волн. Они давно привлекали исследователей, поскольку сопровождают перемещение судов. Если создать возмущение на поверхности воды в глубоком бассейне, то возникнут волны. Частицы жидкости, находящиеся вблизи впадины, при создании возмущения будут стремиться заполнить ее под действием тяжести, создавая волны в воде. Частицы возникшей волны будут двигаться почти по окружностям, т.е. как бы совмещая свойства продольных и поперечных волн, но отличаясь от них обеих. С глубиной радиусы окружностей будут уменьшаться до нуля. Скорость распространения волны C зависит от λ : для длинных волн — пропорциональна $\sqrt{g\lambda}$, для коротких — $\sqrt{\sigma/\lambda\rho}$, а для средней длины — от всех перечисленных параметров. Здесь ρ — плотность жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения. Значит, длинные волны вызваны силой тяжести (g), а для коротких — силой поверхностного натяжения.

Необычную волну — уединенную — наблюдал в 1834 г. шотландский ученый Дж. Рассел. Баржу тянули по каналу; после неожиданной остановки приведенная ею в движение масса воды остановилась около носа баржи, а затем оторвалась от него. И это уединенное возмущение покатило по каналу с большой скоростью, не меняя формы. Рассел заметил, что не меняется и скорость C этой уединенной волны, она зависит от глубины канала h и высоты волны a :

$C = \sqrt{g(a+h)}$, $a < h$. Кроме того, одна большая волна может распадаться на несколько, и эти волны проходят одна через другую, подобно малым волнам на поверхности. Многие ученые отнеслись критически к открытым Расселом свойствам уединенной волны.

Уравнение для описания длинных волн на воде вывели в 1895 г. датские ученые Д.Д. Кортевег и Г. де Фрис. Они предположили, что при распространении волны выполнены условия, означающие много меньшую амплитуду волны по сравнению с глубиной бассейна: $(a/h) \ll 1$, но длину волны много большую этой глубины: $h/\lambda \ll 1$. Они рассматривали $u(x, t)$ как отклонение от положения равновесия на поверхности воды (форма волны), зависящее от координаты x и времени t . Их уравнение, известное по имени авторов как уравнение КдФ, дифференциальное в частных производных $du/dt + 6u(du/dx) + \alpha^2 u/dx^2 = 0$. Изучаемая характеристика u зависит от пространственной координаты x и времени t . Само уравнение прожило яркую жизнь, когда стали разрабатывать методы его решения на ЭВМ. Оно используется для ионно-звуковых волн в плазме, волн возбуждения в живой материи, описания дислокаций в кристалле, распространении сверхкоротких световых импульсов в оптических средах и др.; на его основе были разработаны методы решения дифференциальных уравнений в частных производных (так называемый метод обратной задачи рассеяния). При исследовании сложения двух уединенных волн оказалось, что высокие уединенные волны движутся скорее. Поскольку после взаимодействия волн сохраняется форма волны и скорость, процесс напоминает упругое

столкновение двух частиц. Такую волну и назвали *солитон* (от англ. *solitary* — уединенный). И солитоны, в самом деле, ведут себя как частицы. При соприкосновении таких волн большая замедляется и уменьшается, а малая — ускоряется и замедляется. И далее — по циклу, подобно упругим мячам.

Солитон — нелинейная уединенная волна, сохраняющая свою форму и скорость при собственном движении и столкновении с себе подобными волнами, т.е. образование устойчивое. Результатом взаимодействия солитонов может быть лишь сдвиг фаз.

Модель гармонического осциллятора используется как в классической, так и в квантовой механике.

5.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В СРЕДАХ. РЕАКЦИЯ ОРГАНИЗМА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЧАСТОТЫ ЗВУКОВЫХ ВОЛН. МОДУЛЯЦИЯ ЗВУКА

Упругие волны, вызывающие у человека ощущение звука, называют *звуковыми*. Принято различать тоны или музыкальные звуки; шумы; звуковые удары. Гармонический процесс называют *чистым или простым тоном*, а ангармонический — *сложным тоном*. Сложный тон раскладывается на простые, при этом наименьшая частота — основной тон, а *обертоны* или *гармоники* имеют частоты, кратные основному. Набор частот с указанием интенсивностей компонент называется *акустическим спектром*. Шум — это звук, отличающийся сложной неповторяющейся временной зависимостью. Например, вибрации машин, скрип, шорох, согласные звуки речи. Звуковой удар — это кратковременное звуковое воздействие: взрыв, хлопок и др.

Колеблющаяся плоская пластинка возбуждает в среде бегущую волну с амплитудой x_0 и частотой $\omega/2\pi$, которая будет распространяться от источника. Эта волна звуковая, и пластинка передает слою воздуха массой Δm некоторую энергию.

Максимальная кинетическая энергия этого слоя $I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 x_0^2 u$. $\frac{1}{2} \Delta m V_0^2 = \frac{1}{2} \Delta m \omega^2 x_0^2$, $\Delta E = \frac{1}{2} (\rho A \Delta x) \omega^2 x_0^2$, ρ — плотность слоя воздуха. Но при простом гармоническом движении средняя потенциальная энергия равна средней кинетической, то это выражение описывает запас энергии в слое площадью A и толщиной Δx . Пусть колебания начинаются при $t = 0$ и распространяются в воздухе со скоростью $u = \Delta x / \Delta t$, где Δx — расстояние, на которое распространится возмущение за время Δt . Разделив выражение для энергии на Δx , получим:

$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A \frac{\Delta x}{\Delta t} \omega^2 x_0^2$, $P = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 x_0^2 u$, P — мощность, излучаемая колеблющейся пластинкой в направлении x . Тогда мощность, приходящаяся на единицу площади, даст интенсивность любой бегущей волны, т.е. и звука. Получим это выражение для интенсивности звука, разделив обе части полученного выражения для мощности на A .

Итак, . Интенсивность звуковой волны пропорциональна квадрату амплитуды и определяется как скорость потока энергии через единичное поперечное сечение. В системе СИ интенсивность измеряется в Вт/м². Наименьшая интенсивность звука, которую слышит человеческое ухо, порядка $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², ее называют *порогом слышимости*.

Реактивный самолет, набирающий высоту недалеко от человека, создает интенсивность звука в 10^{15} раз, а поезд метро — в 10^{10} раз большую. Болевой порог интенсивности — 10^{12} I_0 , это значение может достигаться на концертах рок-музыки. Приведенные показатели степени,

умноженные на 10, определяют децибельную шкалу интенсивности звука, названную в честь Генриха Белла. Интенсивность звука в децибелах $\beta = 10 \lg (I/I_0)$ и обозначается дБ. Тогда порог слышимости составляет 0 дБ, а концерт рок-музыки — 120 дБ. Санитарная норма соответствует 30–40 дБ.

Шумовая болезнь проявляется в повышенном артериальном давлении, быстрой утомляемости, плохом сне и ослаблении слуха. Тембр звука при одинаковых громкости и высоте тона определяется спектральным составом звука, испускаемого разными источниками. Звуковые волны распространяются в воздухе со скоростью 330 м/с при нормальных условиях, причем их скорость не зависит от частоты.

Человеческое ухо способно воспринимать только часть звуковых колебаний, которые, попадая на барабанную перепонку, возбуждают нервную реакцию. Для оценки интенсивности звука удобнее использовать звуковое давление, возникающее в среде при прохождении звука.

Интенсивность звука I связана с давлением p , плотностью среды ρ и скоростью звука c соотношением: $I = p^2 / (2\rho c^2)$. Высота звука определяется частотой колебаний, она тем выше, чем больше частота. Интервалу волн от 20 м до 1,6 см, воспринимаемых ухом, соответствует диапазон частот между 16 и 20 000 Гц, соответственно. Диапазон звуковых частот и соответствующих им длин волн (Гц/м) приведен ниже.

Нижний предел слышимых звуков	16/21,5
Самая низкая нота рояля	27,5/12,4
Фон сети переменного тока	60/5,7
Нижний предел для радиоприемников	100/3,4
Среднее «фа» для настройки оркестра	440/78 · 10 ⁻²
Верхнее «си»	1048/33 · 10 ⁻²
Самая высокая нота рояля	4186/8,2 · 10 ⁻²

Указанные пределы слышимости относятся к молодым людям. С возрастом диапазон сокращается, мужчины начинают утрачивать чувствительность к высоким нотам раньше, чем женщины. В среднем возрасте они уже не воспринимают звуки выше 12 000 Гц. Обычно после 50 лет верхняя часть спектра звуков оказывается недоступна. Обращает на себя внимание тот факт, что воспринимаемый нами диапазон звуков шире того, который используется для речи или пения (100–1000 Гц). Но когда высокие звуки урезаны (как правило, в недорогих акустических системах), то теряются яркость и красота звучания. Если урезаны низкие частоты, звук кажется монотонным, хотя высота тона воспринимается верно.

С XVII в. начались попытки определения *скорости звука*.

Еще Ф.Бэкон (1620 г.) указал на возможность определения скорости звука путем сравнения промежутков времени между вспышкой света и звуком при выстреле. Ньютон, давший в своих «Началах» значение скорости звука 350 м/с, писал: «Когда по жидкости (имея в виду упругие жидкости, т.е. газы) распространяются сотрясения, то ее отдельные частички, совершая взад и вперед весьма малые колебания, ускоряются и замедляются по закону качания маятника». Его расчет показал, что скорость звука пропорциональна корню из давления газа, деленного на его плотность, т.е. равнялась 290 м/с. С.Пуассон (1781–1840) ввел поправочный коэффициент из теплоемкостей при постоянном объеме — c_v и давлении c_p . Скорость по формуле Ньютона должна быть умножена на $\sqrt{c_p/c_v}$. Для воздуха c_p/c_v — $\sqrt{3/2}$, тогда скорость звука получалась 345,55 м/с. Отсюда и приложение — измеряя скорость звука в газе, можно определить отношение c_p/c_v и тем самым узнать, состоит ли молекула из одного или нескольких атомов. Надо отметить, что именно таким путем была установлена одноатомность благородных газов.

Скорость распространения упругих продольных волн совпадает со скоростью распространения импульса, сообщенного одному концу упругого стержня. Для продольных волн в стальной проволоке с плотностью 8 г/см³ и модулем упругости $2,06 \cdot 10^{12}$ дин/м² получим скорость распространения 5 · 100 м/с. При этом она не зависит ни от амплитуды, ни от частоты колебаний, пока упругие деформации подчиняются закону Гука.

Громким пением какой-либо ноты над открытым музыкальным инструментом можно возбудить стоячую волну основной моды в струне, частота которой соответствует взятой высоте тона, и затем услышать, как струна звучанием отзывается на голос, пока в ней не затухла стоячая волна.

Замечательную связь между числами и законами музыкальной гармонии открыл еще Пифагор (ок. 571–497 гг. до н.э.). Он использовал монохорд — струну, закрепленную на одном конце и перекинутую через острие ножа так, что к ней можно было подвешивать гири, создавая различные натяжения. В те времена было известно и об ощущениях, вызываемых разными комбинациями тонов: одни были

приятными, другие — диссонансными. Пифагор доказал, что особенно гармоничные сочетания создают струны с одинаковым натяжением, длины которых находятся в отношении 2:1, два таких тона отличаются на интервал в одну октаву. Интервал 3:2 получил название квинты. Он отметил, что приятные сочетания связаны с простыми числами, характеризующими отношение длин.

Таким образом, высота тона закрепленной струны связана с ее длиной. Для одной и той же струны, колеблющейся с 1, 2, 3... пучностями, частоты колебаний находятся в пропорции 1:2:3... Уменьшение длины струны в 2 раза приводит к повышению тона рождаемого ею звука на октаву и т.д. На основании подобных закономерностей Пифагор разработал теорию музыкальной гаммы и гармонии. Пифагор и его последователи — пифагорейцы — верили, что в основе природы лежат математические закономерности. По законам гармонии строилась и их космологическая система.

Понятие о стоячих волнах ввел в 1701 г. Совер. Идею о выделении в любом сложном колебании основного и гармоник выдвинул Г.Гельмгольц (1862 г.). Звучание любого инструмента определяется пропорциями гармоник. Из-за гармоник звук флейты отличен от звука скрипки, хотя колебания воздуха в трубе, флейте или органе одни и те же. Правда, колокольчики не образуют простой ряд целых чисел, поэтому их звучание не столь мелодично. Еще из опытов с маятниками поняли, что сущность музыкального звука в его периодичности. Галилей заметил, что груз резонирует на действие периодической силы, когда ее частота совпадает с собственной частотой маятника, определяемой его длиной. Он соорудил простую систему — погрузил бокал почти по самый край в сосуд с водой и, слегка ударя по краю, извлекал из бокала звуки различной тональности. Вокруг бокала появлялась радиальная рябь. Галилей отметил, что при изменении высоты тона на октаву рябь усиливается. Чтобы сделать количественную оценку, он сопоставил массу единице длины и подсчитал, что частота тона зависит от корня квадратного из «размера» струны. Впоследствии Галилей сформулировал правило для определения частот колебаний струн, сделанных из разных материалов.

5.3. СВОЙСТВА ВОЛН: ДИСПЕРСИЯ, ДИФРАКЦИЯ, ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Волны могут *отражаться* (звук от стены, свет от зеркала, водяные волны от преграды) и *преломляться* (когда ход луча изгибается из-за попадания в среду с другой скоростью распространения). Для понимания волновых свойств необходимо расстаться с представлением об одномерной волне и перейти к более реальным волнам — плоским и трехмерным, встречаемым в природе. Звук в воздухе распространяется во все стороны от сферического источника. При опускании в воду плоской доски, когда один ее конец погружен и приводится в движение в вертикальном направлении, получаются волны, бегущие по поверхности (двухмерные плоские волны). Электромагнитные волны, сохраняющие движение электрической и магнитной компонент в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны, тоже являются плоскими.

Дисперсией называется зависимость показателя преломления n света от частоты колебаний ν (или длины волны λ). Ньютон отметил, что разложение белого света в спектр — проявление дисперсии. Направив разложенный на составляющие свет на вторую призму, он получил вновь белый свет, значит, белый свет есть набор цветов с разным n . Показатель преломления n связан со скоростью V распространения света в этой среде:

$$n = c/V, \text{ и } n_\phi = c/V_\phi, n_{кр} = c/V_{кр}, (n_\phi/n_{кр}) = (V_{кр}/V_\phi).$$

Поскольку $V_\phi < V_{кр}$, $n_\phi > n_{кр}$ для той же среды, то и $n_\phi > n_{кр}$.

Таким образом, в одном и том же веществе скорости света для разных частот различны, различны и показатели преломления n , причем n зависит от ν . На основе явления дисперсии света построена наука — *спектроскопия* и приборы: спектроскоп и спектрограф.

Явление дифракции возникает, если плоская волна длиной волны λ попадает на преграду со щелью шириной s , (лат. *diffRACTus* «разломанный»).

Явление интерференции (или сложение когерентных волн) происходит, если щелей на пути волны несколько или при распространении волны от нескольких источников. Рассмотрим два источника. При размере щели $s > \lambda$ никаких искажений практически не наблюдается. Если $s < \lambda$, наблюдается картина, существенно зависящая от того, в какой фазе каждая из волн подошла к щели. Явление интерференции наблюдается и для поперечных, и для продольных волн.

Принцип Гюйгенса, объясняющий явление отражения, преломления и *двойного лучепреломления* света с позиций волновой теории, сформулирован в «Трактате о свете» (1678 г.). Суть принципа в следующем. *Когда волновой фронт проходит через отверстия, каждый элемент фронта ведет себя так, как если бы стал источником излучения.*

Приняв существование эфира (исходя из аналогии с распространением звука: среда нужна, но свет распространяется и без воздуха, значит, среда должна быть невесомой, разреженной, проникающей во все поры и в то же время жесткой и упругой), Гюйгенс за механизм распространения выбрал аналогию с пламенем. Каждая точка пламени сообщает движение частицам окружающего эфира, т.е. создает собственную волну, а каждая частичка эфира, которой достигла волна, становится, в свою очередь, центром новой волны. Так движение и распространяется от точки к точке через вторичные сферические волны, как распространяется пожар. Поэтому каждая точка волнового фронта становится источником новых волн, огибающая которых станет волновым фронтом в следующий момент и так далее. Для наблюдения интерференционных эффектов не обязательно иметь отдельные источники света.

Как объясняет принцип Гюйгенса и принцип суперпозиции картину *интерференции*? Если две щели являются источниками волн, то какова картина интерференции в точке P , не погасят ли волны друг друга? Волна 2 должна пройти до этой точки большее расстояние, чем волна 1, и разность хода получится $(L_2 - L_1)$. Если в $(L_2 - L_1)$ точно укладывается целое число λ , то в точке P одновременно окажутся максимумы обеих волн (волны придут в фазе), и амплитуды возрастут. Это условие конструктивной интерференции запишется так: $(L_2 - L_1)/\lambda = N$, где $N = 0, 1, 2, 3 \dots$. Если же разность хода составляет нецелое число полуволен, то максимумы одной волны окажутся в точке P смещенными на $(\lambda/2)$ относительно максимумов другой волны, т.е. окажутся в противофазе. Условием этого является равенство: $(L_2 - L_1)/\lambda = N + (1/2)$, где $N = 0, 1, 2, 3 \dots$. В точках, где разность фаз волн находится между этими значениями, будет промежуточная картина.

Волновую природу света впервые показал экспериментально английский ученый, врач по профессии, человек с очень разносторонними интересами, известный как египтолог, расшифровавший древние иероглифы, первоклассный музыкант Томас Юнг.

Юнг стал заниматься волновыми движениями в связи с изучением человеческого голоса (периодических изме-

нений усиления и ослабления звука, воспринимаемого ухом). В 1801–1803 гг. Юнг представил Королевскому обществу материалы своих исследований по свету и звуку. Они содержали его формулировку *принципа интерференции*: для получения интерференции нужно, чтобы обе волны были из одного источника (должен быть одинаковый период), чтобы они прошли различный путь до исследуемой точки и, попав в эту точку, шли почти параллельно. Юнг продемонстрировал *эффект интерференции*, проколов булавкой два отверстия в прозрачном экране и направив на него свет от Солнца, проходящий через маленькое отверстие в окне: темные полосы отмечали провалы волн, светлые — сложение максимумов волн. Ему же принадлежит и термин «*физическая оптика*». Из полученной в опыте интерференционной картины Юнг первым (и с удивительной точностью) измерил длины волн всех цветов, составляющих белый свет. Так, он получил $1/36\,000$ дюйма ($0,7$ мкм) для красного цвета и $1/60\,000$ дюйма ($0,42$ мкм) — для крайнего фиолетового.

Интерференция волн с близкими частотами, распространяющимися с одной скоростью и в одном направлении, приводит к *биениям*. Явление биений свойственно также обоим видам волн. В точках, где фазы одинаковы, результирующая амплитуда максимальна, а где противоположны — минимальна. Сумма волн есть синусоидальная волна с колеблющейся амплитудой, причем изменение амплитуды происходит по гармоническому закону, а частота биений равна разности частот отдельных волн. Чтобы получить биения для звуковых волн, можно провести простой опыт с двумя аналогичными музыкальными, например, струнными, инструментами. Возьмите две струны, звучащие на одной ноте, и, чуть-чуть изменив высоту тона одной из них, услышите, как быстро возрастает и уменьшается интенсивность звучания, как бы пульсирует. Если пульсация происходит медленно, попробуйте подсчитать количество биений в секунду.

Если между щелями расстояния небольшие — порядка $1/300$ мм вместо 1 мм, то при демонстрации полос интерференции получается широкая дифракционная картина. Такая система щелей называется *дифракционной решеткой*. Пучок белого света при попадании на нее разбрасывается достаточно широко, так что по обеим сторонам от узкой белой центральной полосы становятся видны широкие цветные полосы — спектры. Зная длину волны λ , можно определить и частоту, которая равна скорости волны, деленной на λ . Изучением и измерением спектров занимается специальная наука — *спектроскопия*. С ее помощью был определен состав и земной атмосферы, и небесных тел. Длины волн измеряются с точностью до 10^{-10} , а смещения — с еще большей точностью. Исключительная узость спектральных линий, строгая закономерность распределения их по шкале частот и смещение спектральных линий в электрическом и магнитном полях дали много сведений о строении атомов и привели к разнообразным моделям строения атома.

Явление поляризации, свойственное только *поперечным волнам*, состоит в следующем: луч света, проходя через два кристалла исландского шпата, подвергался двойному лучепреломлению в зависимости от взаимной ориентации осей кристаллов.

В начале XIX в. французский физик Э.Малюс обнаружил, что поляризованным оказывается луч света, отраженный от поверхности воды под углом $52^\circ 45'$. Позднее оказалось, что двойное лучепреломление всегда возникает при отражении луча от поверхности, только угол зависит от коэффициента преломления вещества. Он объяснил явление полярированностью световых корпускул, ориентирующихся в кристалле или при отражении (*закон Малюса*). Закономерности поляризации были изучены до 1815 г., но были объяснены О.Френелем в свете волновых представлений только через семь лет, когда пришлось отказаться от ньютоновых корпускул и признать свет *поперечной волной*. *Продольные волны не поляризуются*. Обычно направление поляризации связывают с направлением вектора E , плоскость поляризации — это плоскость, содержащая вектор E и направление распространения волны. Тогда вектор H будет перпендикулярным плоскости поляризации. Если направление E остается у электромагнитной волны неизменным, волна называется *плоско-* или *линейно-поляризованной*.

Большинство источников испускает некогерентный и неполяризованный свет, когда направление вектора E непрерывно меняется в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Но при пропускании неполяризованного света через поляризатор можно сделать его

поляризованным. В качестве поляризатора может служить экран из ряда тонких параллельных проволок для микро-волнового излучения или фильтр из кристаллической пластинки (турмалина, исландского шпата, кварца или пленки кристаллов герпатита, нанесенной на стекло). Известно, что неполяризованный солнечный свет приобретает поляризацию при отражении от поверхностей воды, песка, дороги и т.д. При этом, если ось поляроида перпендикулярна плоскости поляризации отраженного света, отражение гаснет. Среди применений поляризованного света: гашение зеркальных бликов при фотографировании, предупреждение ослепления водителя встречным транспортом, регулировка освещенности и др. Сегодня механизм возникновения поперечных волн и связанного с ним явления поляризации совершенно ясны.

После создания теории электромагнитного поля Максвеллом и установления электромагнитной природы световых волн Герцем, излучаемый каждым атомом свет строго поляризован. Но направления векторов поляризации света от всех атомов определяются чисто случайными причинами и не имеют определенной ориентации в пространстве. И световой луч можно уподобить нити, состоящей из множества свитых волнистых волокон. Для поляризации луча надо привести этот хаос в порядок, что и делают те или иные поляризационные фильтры.

5.4. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА, ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ НАУКИ. КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В АСТРОФИЗИКЕ

В 1842 г. австрийский физик и астроном К.Доплер обнаружил зависимость частоты волнового импульса от скорости при движении источника волн относительно наблюдателя, названную эффектом Доплера. Многие не раз сталкивались с ним, когда слышали, как меняется звук предупреждающего свистка проносщегося мимо платформы поезда. Но эффект Доплера можно не только «слышать», но и «видеть», хотя бы в ванне или пруду. Периодически погружая палец в воду, чтобы на поверхности образовались волны, равномерно перемещайте его в одном направлении. Следуя друг за другом, гребни волн будут сгущаться в направлении движения пальца и станут более разреженными с другой стороны. Значит, длина волны в направлении вперед станет меньше обычной, в направлении назад — больше (рис.6).

Пусть в системе отсчета источника звуковые волны имеют частоту ν , тогда за время t источник испустит νt волн. Выберем интервал времени от 0 до t . Волна, испущенная в $t = 0$, пройдет за это время расстояние ut , где u — скорость волны. К моменту испускания последней из волн источник пройдет расстояние νt . Все волны займут в пространстве область длиной $(ut - \nu t)$, а с точки зрения наблюдателя их длина будет равна:

$$\lambda = (ut - \nu t) / \nu t = (u - \nu) / \nu.$$

Тогда изменится и частота звука, слышимого наблюдателем:

$$\nu = u / \lambda = \nu u / (u - \nu) = \nu u / (u - \nu) = \nu / [1 - (\nu / u)].$$

Здесь наблюдатель движется к источнику, частота звука увеличивается. При удалении источника от наблюдателя меняется знак u , и отрицательный знак в знаменателе

становится положительным, и частота понижается. Эффект Доплера имеет место для всех типов волн — звуковых в атмосфере, упругих в твердом теле, волн на воде, световых волн. Измерение доплеровского смещения в спектрах позволяет с большой точностью, не возмущая измерением движение, определить *скорости движущихся объектов*.

Первое подтверждение эффекта Доплера было получено для *акустических волн* в опытах голландского физика с группой музыкантов на железной дороге (1845 г.). Часть группы разместились на платформе, двигавшейся с известной скоростью вдоль перрона, где находились остальные, воспринимая их музыку. Затем музыканты поменялись ролями. Данные, полученные от непосредственных впечатлений участников опыта, хорошо укладывались в формулу Доплера.

Французский физик А.Физо предложил (1848 г.) использовать эффект Доплера *для измерения радиальной составляющей скорости звезд* по смещению спектральных линий (поэтому многие называют его эффектом Доплера–Физо). Он заметил, что в линейчатых спектрах можно измерять смещение (отсюда термин — *доплеровское смещение*). В 1867 г. английский астроном У.Хеггинс обнаружил смещение водородной линии в спектре Сириуса по сравнению с той же линией в спектре, полученном в лаборатории, и заключил, что скорость звезды относительно Земли равна 66,6 км/с, а по отношению к Солнцу — 47,3 км/с.

Но пока эти результаты еще не доказывали применимость эффекта Доплера к свету. Нужно было найти объект, скорость которого можно было бы измерить для проверки и другим способом. В качестве такого объекта

было выбрано Солнце — его скорость вращения определялась по движению солнечных пятен. В 1871 г. немецкий астроном Г.Фогель измерил доплеровские смещения для двух точек солнечного экватора, находящихся на краях диска, и определил их линейную скорость — 2 км/с, что совпадало с результатом, полученным другим методом. Затем были определены скорости вращения планет, колец Сатурна, звезд вокруг своей оси, ядер и хвостов комет.

Академик А.А.Белопольский считал, что нужно провести проверку в земных условиях, поскольку неизвестны условия излучения в космосе. В 1894 г. он разработал установку, состоявшую из двух колес, к каждому из них в виде лопастей прикреплялись 8 плоских зеркал. Зеркала обоих колес были строго параллельны и вращались с постоянной скоростью. Съёмки проводились при неподвижных зеркалах и при вращающихся с частотой 32–44 об./с (это соответствовало перемещению изображения 240–330 м/с, или общему смещению от скорости 500–700 м/с). Обработка результатов дала хорошее совпадение по числу оборотов колес и доплеровскому смещению. Опыт длился всего 1 ч., но он был наиболее убедительным в применении эффекта Доплера к свету. Впоследствии метод Белопольского усовершенствовал другой петербургский академик Б.Б.Голицын.

Эффект Доплера, как основной в оптике движущихся сред, сыграл решающую роль в экспериментальном обосновании специальной теории относительности. Физо поставил классический эксперимент (1851 г.) по определению увлечения эфира движущейся Землей. Он заставил интерферировать два луча света, один из которых проходил столб воды в направлении течения, а другой — против. Если эфир увлекается, то интерференционные полосы должны смещаться по отношению к тому положению, которое соответствовало неподвижной воде. К тому же результату пришли Э.Кеттлер (1871 г.) и Майкельсон и Морли (1886 г.) — эфир движется вместе с Землей. За 5 лет ранее Майкельсон пытался обнаружить «эфирный ветер» при движении Земли в эфире, посылая световые лучи по взаимно перпендикулярным путям и заставляя их интерферировать. Хотя линейная скорость Земли (29,7 км/с) много меньше скорости света, и установка позволяла засечь и в 100 раз меньший эффект, опыт дал отрицательный результат. опыты, показывавшие увлечение эфира, противоречили объяснению явления аберрации (лат. *aberratio* «отклонение, заблуждение»), требовавшей неподвижности эфира. Это противоречие было разрешено отказом от эфира и созданием теории относительности.

Когда картина мира стала меняться на квантовую, в 1922 г. один из ее создателей австрийский физик-теоретик Э.Шредингер дал обобщение формулы Доплера для частоты на случай больших скоростей, но пока эти малые изменения частоты при переходе атома с одной боровской орбиты на другую на опыте не обнаружили.

Метод для измерений скоростей звезд и галактик, основанный на эффекте Доплера, получил в астрономии наиболее впечатляющее применение.

Спектры галактик слабы, измерения достаточно трудны. В 1912 г. американский астроном В.Слайфер с помощью мощного спектрографа измерил доплеровский сдвиг в спектре самой яркой из галактик — Туманности Андромеды. За два года он измерил лучевые скорости 13 спиральных галактик, причем скорости большинства из них были направлены в сторону от Солнца, а нескольких — превосходили все измеренные ранее. Это означало, что галактики удаляются от нашей солнечной системы с фантастически большими скоростями — до 1800 км/с. К 1925 г. Слайфер измерил лучевые скорости еще 45 спиральных галактик, и все они, кроме нескольких ближайших, удалялись от Солнца, а скорость их удаления почему-то явно возрастала по мере уменьшения их яркости, как будто они разбегались от Млечного Пути во всех направлениях, и по мере удаления скорость убегания росла. Но это нарушало бы однородное распределение галактик в пространстве, поэтому пришлось считать, что это однородное расширение, но тогда их лучевая скорость (проекция скорости на луч зрения) должна быть пропорциональна расстоянию до них. Так, если галактика выглядит в 100 раз слабее, значит, расположена в 10 раз дальше. Галактики из списка Слайфера имели лучевую скорость 18000 км/с, а расположенные в 10 раз дальше — 180000 км/с.

Для формулирования закона пришлось искать *возможность определения расстояния до галактик* независимым образом. Параллакс для ближних звезд можно измерить по методу, предложенному еще Фалесом (см. рис.3), для далеких — искать некий индикатор расстояний. Американский астроном Г.Левитт обратила внимание на четкую *зависимость периода цефеид от яркости*. Цефеиды — наиболее яркие звезды в Малом Магеллановом Облаке — небольшой галактике, частично заходящей в Млечный Путь. Название получили от типичной цефеиды — дельта звезды созвездия Цефея. Датский астроном Э.Герцшпрунг сразу оценил идею Левитт и откалибровал выведенную ею зависимость период-яркость в период-светимость, что позволило ему определить расстояние до этой галактики в 200 тыс. световых лет. Он убедился, что за пределами Млечного Пути есть другие галактики, другие «островные вселенные», как выражался Кант. Хаббл с помощью 100-дюймового телескопа обнаружил цефеиды в нескольких галактиках и смог оценить расстояние до них. После полученных Хьюмасоном с большой точностью красных смещений и его оценок Хаббл в 1929 г. вывел прямую линию на графике зависимости скоростей далеких галактик от расстояния до них.

Итак, *скорости удаления галактик возрастают пропорционально расстоянию до них*.

Расширение Вселенной — самое грандиозное из известных в настоящее время явлений природы. Если допустить, что оно и раньше происходило теми же темпами, то можно оценить, когда же началось расширение. Этот промежуток времени составляет 13–20 млрд лет. Таким образом, смещение спектральных линий из-за эффекта Доплера привело к новой картине расширяющейся Вселенной.

Глава 6. КОНЦЕПЦИЯ АТОМИЗМА. СТРУКТУРНЫЕ ФОРМЫ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ В МИКРОМИРЕ

6.1. КОНЦЕПЦИЯ АТОМИЗМА В СВОЕМ РАЗВИТИИ

Атомистика — учение о дискретном строении материи. До конца XIX в. считалось, что материя состоит из «неделимых кирпичиков» — атомов, различными комбинациями которых образованы все видимые тела. Сейчас известно, что атом не является неделимым и имеет сложное строение. Сама же тенденция к поиску «элементарных кирпичиков» мироздания порождена атомистической концепцией. Эта концепция дала огромные возможности объяснения свойств сложных тел. Такое объяснение *путем редукции*, т.е. сведением сложного к простому, не описывает многообразие мира, но оказалось плодотворным. *Делимость веществ* породила идеи дробления *целого на части*.

В основе взглядов древних индийцев (VI–V вв. до н.э.) лежит *учение о пяти элементах* (земле, воде, огне, воздухе и эфире), соответствующих в какой-то степени пяти чувствам («подобное познает подобное») — зрению, вкусу, обонянию, осязанию, слуху. Каждый может быть в двух видах — вечном (атом неделим, безразмерен и сферичен) и преходящем. *Мир единым и развивающимся* считал Фалес из Милета, основатель *ионийской школы*. В качестве праматерии он выбрал воду, его преемник, Анаксимандр, — «айперон», а впоследствии другие мыслители выделяли уже *четыре первоэлемента*. Эти первоэлементы, оставаясь в количественном отношении постоянными, могут образовывать друг с другом различные по форме и составу комбинации. Анаксагор ввел представление о бесконечной Вселенной, заполненной бесконечным множеством частиц, или «*атомов*». Он, кроме того, предполагал, что небесные тела состоят из таких же веществ, что и Земля (за эту «ересь» он едва не поплатился жизнью и был изгнан из Афин по обвинению в безбожии).

Левкипп и его ученик Демокрит считали, что реальны *атомы и пустота*, причем пустое пространство — это место атомов, которые могли бы находиться здесь в другое время. Четыре стихии — земля, вода, воздух, огонь — первичные группировки бескачественных атомов. Атомизм отвергался такими великими философами, как Платон, Сократ и Аристотель, и он был возрожден через два с половиной века Эпикуром, чье учение изложил еще через 2,5 века в своей философской поэме «О природе вещей» великий римский поэт-мыслитель Тит Лукреций Кар. На протяжении столетий в качестве альтернативы атомизму выдвигались представления об отсутствии пустоты и бесконечной делимости материи. Атомизм долго рассматривался католической церковью как ересь, так как ассоциировался с эпикурейским атеизмом.

Концепция атомизма вновь возродилось в XVII в. Р.Бойль показал, что свойства тел зависят от того, из каких атомов тела состоят. Формирование представления о химическом элементе явилось первым этапом знания о составе веществ. И.Ньютон, опираясь на эмпирико-математический подход Галилея, разработал строгую теорию движения земных и небесных объектов, в которой природа рассматривалась как сложный механизм. Тела представ-

лялись материальными точками или системой точек, которые взаимодействовали попарно. Им соответствовали частицы — атомы или молекулы. Атомы непроницаемы, неделимы, они определены массой и находятся в независимых от их свойств пространстве и времени. Движение — перемещение в пространстве по непрерывным траекториям с течением времени. Все физические процессы могут быть сведены к механическим перемещениям. Свет, по Ньютону, тоже есть поток корпускул, которые испускают светящиеся тела и которые движутся по законам механики. Так были объяснены законы отражения и преломления света.

В XVIII в. любое природное явление приписывали действию каких-то не познанных пока сил. Блестящие успехи небесной механики способствовали вере в то, что ее уравнения годятся для любого уровня организации материи. Эта идея принадлежит Ньютону, писавшему в предисловии к своим «Началам»: «Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел вследствие причин, покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга». Эту программу начал осуществлять Лаплас вместе со своим помощником Лавуазье, однако этим планам не суждено было осуществиться в полной мере (в 1794 г. по приговору революционного трибунала генеральный откупщик А.Лавуазье был отправлен на гильотину). Лаплас в своей пяти-томной «Небесной механике» построил грандиозную *модель Вселенной*, опирающуюся на закон всемирного тяготения Ньютона, но в силу того, что гравитационные силы между телами незначительных размеров слишком малы, не позволил стать ей всеобщей моделью Вселенной.

От Ньютона и Лапласа шло рассмотрение механики как универсальной физической теории. В XIX в. ее место заняла уже *механистическая картина мира*, включающая в себя механику, термодинамику и кинетическую теорию материи, упругую теорию света и электромагнетизм. Молекулярно-кинетическая теория сумела объяснить многие явления в области физики и химии, но мало кто из ученых верил в реальность существования атомов и молекул.

В конце XVIII в. не было данных ни о числе атомов в молекулярных соединениях, ни о числе частиц в единице объема, но признавалось, что существуют чистые, простые, неразложимые далее вещества (по определению Лавуазье), названные *элементами* (в то время их было около 30). Лавуазье и Ж.Пруст установили, что элементы всегда входят в соединения в точно определенных пропорциях. Эту закономерность французский химик К.Бертолле записал в виде *закона кратных отношений*, отметив, что относительные весовые содержания элементов не остаются в соединениях неизменными (например, продукты окисления некоторых металлов при разных значениях температуры и давления). Английский химик Дж.Дальтон привел доказательства в пользу того, что атомы имеют разные веса и,

комбинируясь в определенных соотношениях, образуют *соединения*. Дальтон фактически осуществил новый подход к атомистике: он попытался продвинуться в вопросе об относительных весах атомов, т.е. об их физических свойствах, опираясь на данные *химических исследований*. Дальтон выработал основу для понимания закона кратных отношений и из соображений простоты сформулировал правила — «закон постоянства состава» и «закон простых кратных отношений», благодаря которым атом впервые приобрел физико-химические свойства и массу.

Закон объемных отношений — объемы газов, реагирующих друг с другом, соотносятся как небольшие целые числа (1:1; 1:2; 1:3...) открыл Гей-Люссак (1808 г.). Дальтон увидел в нем угрозу своей атомистической теории: ведь плотность паров воды оказывалась меньше плотности кислорода. Но ни тот, ни другой не смогли избавиться от противоречий между газовыми законами и атомистической гипотезой. Правильную оценку объемных отношений дал Авогадро. В 1811 г. он высказал *гипотезу о равенстве числа молекул в одинаковых объемах любых газов при постоянных условиях*. Пересмотрев атомную систему Дальтона, он исправил некоторые значения атомных весов. Свойства наблюдаемых тел и законы их поведения стали объяснять с помощью поведения невидимых атомов и молекул.

Эмпирические законы Бойля–Мариотта и Гей-Люссака для идеальных газов и другие тепловые и химические законы нашли объяснение в молекулярно-кинетической теории, основанной на идее атомизма. Наблюдаемые свойства тел и законы поведения объяснены с помощью невидимых частиц — атомов и молекул. Атомистическая гипотеза позволила использовать некоторые идеи «молекулярной динамики» Лапласа, она явилась предпосылкой кинетической теории материи и статистической механики. Применение редукции дало много науки.

Диаметр молекул вычислил И. Лошмидт из средних длин свободного пробега и объема одного моля газа в жидком состоянии. Он нашел число молекул в моле — 10^{23} , а для радиусов молекул — 10^{-8} см. Независимо от газов атомистика распространилась на учение об электричестве. Упорядочение химических элементов по их химическим свойствам привело к созданию периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева. Но смысл этой классификации был осознан много позже, уже после смерти автора этой таблицы. Для дискретных зарядов, «атомов

электричества», Г. Лоренц создал *электронную теорию*, в которой синтезировал идеи атомистики и теории поля. Нельзя в развитии атомистики не упомянуть имена Пуанкаре, Планка, Эйнштейна, П. и Т. Эренфестов.

Проблема электрического заряда, связанная с дискретностью заряда и непрерывностью поля, и проблемы в теории излучения, известные как «ультрафиолетовая катастрофа» конца XIX в., привели к созданию *квантово-полевой картины мира* и квантовой механики.

Реальность существования атомов и молекул была подтверждена только в 1906 г., когда Ж. Перрен исследовал закономерности *броуновского движения*. Это движение было обнаружено английским ботаником Р. Броуном (1827 г.) и заключалось в том, что взвешенные в жидкости мельчайшие частички (споры) находились в непрерывном хаотическом движении. Установили, что оно вызвано тепловым движением частичек жидкости, в которой были взвешены более крупные частицы — споры. Число ударов с разных сторон в среднем одинаково, и большая частица не реагирует на эти удары. Но если размеры частицы порядка 10^{-4} – 10^{-5} см, то число испытываемых ею ударов не столь велико и появляются отклонения скоростей отдельных молекул от средних значений. Эти отклонения, называемые *флуктуациями*, приводят к тому, что отдельные удары для частицы указанных размеров не компенсируются, наблюдаемая частица начинает совершать беспорядочные движения с меняющейся скоростью. Ж. Перрен определил на опыте все величины, нужные для определения постоянной Авогадро, связал *радиусы частиц и вязкость среды*.

В конце XIX в. были сделаны открытия, приведшие к отказу от представления о неделимом атоме, были открыты частички, много меньшие атома. Потом оказалось, что микрочастицы двигаются и взаимодействуют по иным законам, по квантовой механике. После открытия элементарных частиц — электрона, протона, нейтрона и других и их античастиц — когда число их перевалило за три сотни, появилась в рамках атомистической программы *гипотеза кварков*. Из кварков состоят адроны, т.е. частицы, участвующие в сильном взаимодействии. В настоящее время здесь много нерешенных проблем, связанных с ограниченностью редукционного подхода. Поиск элементарных частиц, элементарных «кирпичиков» мироздания продолжается.

6.2. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА И РОЖДЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СЛОЖНОМ СТРОЕНИИ АТОМА

Открытие электрона, изучение его уникальных свойств стимулировали интенсивные поиски в исследовании и понимании строения атома. Оказалось, что с поведением электронов связаны процессы поглощения и испускания электромагнитной энергии веществом. Были поняты сходства и отличия химических элементов, их химическая активность и инертность. Обрела внутренний смысл Периодическая таблица химических элементов Менделеева, стали понятны природа химической связи в различных телах и механизмы химических реакций, появились совершенно новые приборы, в которых движение электронов играет определяющую роль. Изменились взгля-

ды на природу материи. *С открытия электрона начался век атомной физики*. Электрон был открыт в 1897 г.

Дискретность электрического тока отражена уже в работах М. Фарадея по электролизу — один и тот же ток приводит к выделению на электродах разного количества вещества в зависимости от того, какое вещество растворено. При выделении одного моля одновалентного вещества через электролит проходит заряд в 96 500 Кл, а при двухвалентном — заряд удваивается. После определения в конце XIX в. числа Авогадро появилась возможность оценить величину элементарного электрического заряда. Так как $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов переносят заряд в 96 500 Кл, то на долю

одного приходится $1,2 \cdot 10^{-19}$ Кл. Стало быть, это — мельчайшая порция электричества или «*атома электричества*». Георг Стоней предложил и назвать этот «атом электричества» *электроном*.

Так, исследования электрических токов в металлах привели к открытию закона Ома и термоэлектричества, в электролитах — к развитию физико-химического атомизма и созданию физической химии, в газах — к открытию электрона. Работа с токами в газах была осложнена трудностями получения разреженной газовой среды. Немецкий механик-стеклодув Г.Гейслер стал изготавливать трубки с разреженным газом, светящимся при пропускании через него электрического тока. Они служили для развлечений, пока В.Гиттгофф не обнаружил излучение из катода, которое вызывало флуоресценцию стенок трубки. Это излучение назвали *катодными лучами*. Английский физик У.Крукс показал, что эти лучи распространяются по прямой, отклоняются магнитным полем и оказывают механическое воздействие. Французский физик Ж.Перрен поместил внутри разрядной трубки перед катодом металлический цилиндр, с отверстием против катода, соединил цилиндр с электроскопом и установил, что от катодных лучей цилиндр заряжается всегда отрицательно. Когда для проверки лучи отклоняли магнитным полем, они не попадали в цилиндр, и он оказывался незаряженным. Так в 1895 г. родилась новая наука — *электроника*.

Через два года Дж.Дж.Томсон поместил цилиндр Перрена не перед катодом, а сбоку: поднесенный магнит искривлял катодные лучи так, что они попадали в цилиндр и заряжали его отрицательно, но при этом флуоресцирующее пятно на стекле смещалось. Стало ясно, что заряд не отделен от катодных лучей, а сами лучи — отрицательно заряженные частицы. Такой измерительный прибор *называют электронно-лучевой трубкой высокого вакуума*. Под действием силы Лоренца, вызванной магнитным полем, включенным в области конденсатора, светящийся след падения пучка смещается на экране. Действуя одновременно электрическим и магнитным полями и меняя их величину, Томсон подобрал их так, чтобы они компенсировались, катодные лучи не отклонялись, и пятно на стекле не смещалось. Используя механику, он получил отношение e/m — отношение электрического заряда к массе частицы — $e/m = 1,3 \cdot 10^{-7}$ Кл/г. В более ранних опытах, проведенных в его же лаборатории с использованием камеры Вильсона, в которой каждый ион является центром конденсации пара и постепенно становится видимым, было получено значение заряда газообразных ионов $6,5 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. ед. (1 Кл = $3 \cdot 10^9$ эл.-ст. ед.). Если принять, что заряд их одинаков, то масса частиц оказывалась очень малой: порядка 10^{-27} г. Томсон назвал эту частицу *корпускулой*, а электроном — только ее заряд, но потом и саму частицу катодных лучей назвали *электроном* (греч. *elektron* «янтарь»).

Милликен поставил опыт (1909 г.): в пространство между пластинами конденсатора впрыскивалось масло, так как оно испаряется медленнее воды. Проходя через горлышко пульверизатора, капельки из-за трения наэлектризовывались. В отсутствие электричества они падали медленно и равномерно. Сила тяжести уравнивается

силой сопротивления воздуха и для положения равновесия можно записать: $mg = qE = qV/d$, где d — расстояние между пластинами конденсатора. Отсюда и $q = mgd/V$. По этой формуле можно вычислить заряд капельки q из измеренных величин g, d, V . Массу капельки можно найти по плотности масла и скорости установившегося течения, поскольку известно, что скорость такого течения в вязкой среде зависит от размера тела или капелек.

Если напряжение подается, то движение капельки либо замедляется, либо ускоряется в зависимости от направления поля. Диаметр капелек измеряется с помощью микроскопа. Милликен изучал поведение капелек и при воздействии рентгеновскими лучами.

Милликен обнаружил, что заряды на капельках не произвольны, а равны *целому кратному некоторой основной единицы заряда*, т.е. и $q = Ne$, где $N = 1, 2, 3...$ Если существует *элементарный электрический заряд*, то измеренные величины должны быть равны ему, когда к капле присоединяется один одновалентный ион, или в целом число раз больше при присоединении нескольких ионов. Он измерил величину заряда на капельках масла, глицерина, ртути и т.д. и получил $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, что совпадало с полученным значением по исследованию электролиза. Так был определен *удельный заряд электрона*: $1,7 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, и значит, $m = 9,107 \cdot 10^{-31}$ кг, т.е. *масса электрона* в 1840 раз меньше массы атома водорода. Эта основная единица заряда фундаментальна и равна: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Опыт Милликена стал классическим. Итак, электричество (по крайней мере, отрицательное) имеет, как и вещество, *дискретную структуру*, причем во всех явлениях атомы отрицательного электричества имеют одинаковую массу и заряд. Магнитное поле катодных лучей обнаружил и измерил в 1913 г. один из создателей русской физической школы А.Ф.Иоффе. Дж.Дж.Томсон за открытие электрона стал лауреатом Нобелевской премии по физике за 1906 г.

Из многочисленных опытов с пропусканием электронов через вещество, Дж.Томсон заключил, что число электронов в атоме имеет порядок величины химического атомного веса. Но в нормальном состоянии атом должен быть электрически нейтрален, поскольку нейтрально вещество, состоящее из атомов, и поэтому в каждом атоме количества зарядов разных знаков равны. Поскольку масса электрона порядка $1/2000$ массы атома водорода, то масса положительного заряда должна быть в 2000 раз больше массы электрона. Например, у водорода почти вся масса связана с положительным зарядом. С открытием электрона сразу же появились новые проблемы. Атом нейтрален, значит, в нем должны быть другие частицы с положительным зарядом. Они еще не были открыты.

Атом переставал считаться неделимым. Модель строения атома — положительный заряд распределен в положительно заряженной достаточно большой области (возможно, и сферической формы), а электроны вкраплены в него, как «изюм в пудинг» — в 1902 г. предложил Кельвин.

Идея о сложном строении атома (из атомов водорода) была высказана еще в 1815 г. английским врачом У.Праутом. В химии выработалось учение о *химическом элементе*. В 1870 г. из сопоставления химических свойств элементов с их атомными весами Д.И.Менделеев представил свою

периодическую таблицу. Открытие *спектрального анализа* в 1859 г. физиком Г.Кирхгофом и химиком Р.Бунзеном и Периодического закона химических элементов Менделеевым породили сомнения в неделимости атомов. Стало ясно, что сам атом — это *сложная структура с внутренними движениями составных частей, ответственных за характерные спектры.*

Дж.Томсон вслед за открытием электрона развил идею Кельвина. Атом — капля пудинга положительно заряженной материи, внутри которой распределены электроны, находящиеся в состоянии колебательного процесса. Из-за этих колебаний атомы и излучают электромагнитную энергию, что позволило ему объяснить дисперсию света, но и породило много вопросов. Исследуя на устойчивость разные конфигурации электронов, он хотел объяснить периодическую таблицу элементов. Дж.Томсон предположил, что устойчивым конфигурациям соответствует устройство неактивных элементов типа благородных газов, а неустойчивым — более активных. По длинам волн испускаемого атомами света Томсон оценил область, занимаемую таким атомом, — около 10^{-10} м. Он считал, что внутри атома действуют только электромагнитные силы, и рассчитывал характеристики излучения по теории Максвелла, делая много предположений. В 1903 г. Томсон получил, что электроны при движении должны излучать эллиптические волны, в 1904 г. — что при большом числе электронов (более восьми) они должны располагаться кольцами, и

число их в каждом кольце уменьшается с радиусом кольца. В радиоактивных атомах число электронов не позволяет им быть устойчивыми, они выбрасывают альфа-частицы, и устанавливается новая структура атома.

Эксперимент одного из его учеников, Э.Резерфорда, привел к *ядерной модели строения атома.*

Когда был предложен корпускулярно-волновой дуализм материи, за обнаружение в кристаллах, облучаемых электронами, интерференционных эффектов, т.е. за открытие волновых свойств электрона, сын Дж.Дж.Томсона Дж.П.Томсон получил Нобелевскую премию по физике в 1937 г.

Открытия конца XIX века — *рентгеновских лучей* (Рентген, 1895 г.), *радиоактивности* (Беккерель, 1896 г.), *электрона* (Дж.Дж.Томсон, 1897 г.), *радия* (Пьер и Мария Кюри, 1898 г.), *квантового характера излучения* (Планк, 1900 г.) — были началом революции в науке. Атомизм вещества и электричества был дополнен дискретностью действия, что привело к созданию в конце 20-х годов XIX в. к созданию квантовой физики, а затем изменило все классическое естествознание и мировоззрение.

Но в атомы поверили как в сложную реальность только в конце XIX в., после открытия электрона и радиоактивности, сложного характера атомных спектров, периодического закона химических элементов и открытия электрона.

6.3. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. СОВРЕМЕННАЯ НАУКА И ПОСТУЛАТЫ БОРА

Австрийский физик А.Гааз (1910 г.) применил к томсоновской модели атома квантовые представления о пропорциональности испускаемой атомом энергии и частоты обращения электрона по круговой орбите. Но из-за неточности используемых в оценках величин получил значение константы Ридберга, большее в 8 раз, чем полученное впоследствии Бором. Его работу, представленную в виде диссертации, посчитали слишком наивной «карнавальной шуткой» и «провалили». К этому времени уже стало понятно, что *число электронов* должно быть пропорционально *атомному весу*, но из данных по рассеянию рентгеновских лучей в легких атомах следовало, что это число — в 2 раза меньше, а по другим опытным данным — вдвое больше. Данные о положительном заряде были не менее противоречивы: испускание альфа-частиц свидетельствовало, что они находятся где-то внутри радиоактивных атомов. Модель Томсона (он работал над ней почти 15 лет), основанная на классических законах электричества, не устояла перед опытной проверкой и критикой.

Планетарную модель строения атома первым предложил Ж.Перрен, пытаясь объяснить наблюдаемые свойства орбитальным движением электронов. Но В.Вин считал ее несостоятельной. Во-первых, электрон при вращении вокруг ядра, по классической электродинамике, должен непрерывно излучать энергию и, в конце концов, упасть на ядро, что приведет к неустойчивости атома. Во-вторых, из-за непрерывной потери энергии излучение атома должно иметь непрерывный спектр, а наблюдается линейчатый.

Опыты по прохождению альфа-частиц через тонкие пластинки из золота и других металлов провели (1908 г.) Э.Марсден и Х.Гейгер, сотрудники Э.Резерфорда. Они обнаружили, что почти все частицы проходят через пластинку, будто никакого препятствия нет, и только 1/10 000 из них испытывает сильное отклонение. Модель Томсона это не могла объяснить, но Резерфорд, его бывший ассистент, обратил внимание на то, что большая часть частиц отклоняется на малый угол, а очень малая — до 150° . Сделав оценки, Резерфорд пришел к *планетарной модели*: положительный заряд сосредоточен в объеме порядка 10^{-12} со значительной массой. Этот объем в 10 тысяч раз меньше объема самого атома.

Считая орбиты электронов в атоме закрепленными, Томсон тоже пришел к планетарной модели (1913 г.). Но, решая задачу на устойчивость с использованием закона Кулона, он нашел такую орбиту лишь для случая одного электрона. Ни Томсон, ни Резерфорд не могли объяснить испускание альфа-частиц при радиоактивном распаде — выходило, что в центре атома должны быть и электроны. Об этом говорила М.Склодовская-Кюри. Резерфорд принял это, но ему пришлось приписывать электронам функцию склеивания ядер, чтобы кулоновское отталкивание не развалило ядро. Эти модели не позволяли получить количественных результатов. В 1913 г. некоторые *опытные данные по радиоактивным явлениям* придали вес модели Резерфорда. Его ассистент Г.Мозли измерил частоту спектральных линий ряда атомов периодической системы и установил, что «атому присуща некая характерная вели-

чина, которая регулярно увеличивается при переходе от атома к атому. Это количество не может быть ни чем иным, как только зарядом внутреннего ядра».

Построение теории атома на основе планетарной модели наталкивалось на обилие противоречий, понимал и датский физик Н. Бор, который работал сначала в Кембридже у Дж. Томсона, а потом переехал в Манчестер к Резерфорду.

1) По классической электродинамике электрон при вращении вокруг ядра должен непрерывно излучать энергию и, в конце концов, упасть на ядро, что приведет к неустойчивости атома. 2) Из-за непрерывной потери энергии излучение атома должно иметь непрерывный, а наблюдается линейчатый спектр. 3) Но атомы ведь устойчивы и, вопреки классической физике, в них должны существовать дискретные стационарные орбиты, на которых электрон вовсе не излучает энергии. Сначала Бор пытался применить классическую механику и электродинамику к задаче о торможении заряженных частиц при движении через вещество, но при заданном значении энергии электрона появлялась возможность приписывать ему произвольные параметры орбиты (или частоты), что приводило к парадоксам. Планетарная модель атома Резерфорда оказалась несовместимой с электродинамикой Максвелла.

В феврале 1913 г. появились статьи Дж. Никольсона по интерпретации спектров звезд. Никольсон, распространяя идею Планка на атомы, предложил квантовать проекции момента электрона. Так появился атом с дискретными орбитами, по которым вращались группы электронов, излучающие электромагнитные волны с частотой, равной частоте обращения. Такая модель годилась для сильно возбужденных атомов, и Никольсон объяснил некоторые особенности в спектрах звезд и туманностей исходя из модели атома Нагаока — представления об электронном кольце, вращающемся вокруг положительно заряженного ядра. Атом у Никольсона характеризовался в первую очередь своим спектром излучения. Он связал со спектральными частотами частоты специально постулированных механических колебаний электронов, перпендикулярных плоскости кольца. Но тут возникли проблемы устойчивости атома, так как нужно было вводить специальные ограничения — вращающийся электрон должен двигаться где-то без излучения! (Но Никольсон до этих проблем еще не дошел.)

Теорию строения атома Бор согласовал с *проблемой происхождения спектров*. Он дополнил модель Резерфорда постулатами, которые обеспечивали устойчивость атома и линейчатый спектр его излучения, но были несвойственны классической науке. Бор уже через месяц представил первую, самую существенную часть своей работы «О строении атомов и молекул». Но ему пришлось отказаться от традиционных представлений классической механики и обратиться к квантовой гипотезе Планка: «Определенное соотношение между кинетической энергией в кольце и периодом обращения» — это перенесение соотношения $E = h\nu$, выражающего связь между энергией и частотой осциллятора, на случай системы, совершающей периодическое движение. Спектральные формулы Бальмера, Ридберга и Ритца позволили сформулировать требования

обеспечения устойчивости атома и линейчатого характера спектра атома водорода:

1) в атоме существует несколько стационарных состояний (или орбит в планетарной модели), электронов, на которых атом не излучает энергии;

2) при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую атом излучает или поглощает порцию энергии, пропорциональную частоте, согласующейся с правилом частот Ридберга–Ритца.

Итак, Бор *постулировал частоты и существование стационарных состояний*. То, что электрон может находиться только на определенных орбитах, сразу объясняло линейчатый спектр атомов — электрон испускает свет только при переходе с одной орбиты на другую, т.е. дискретными порциями, и не излучает, находясь на дозволенной орбите. Правильность его предположений могло подтвердить только хорошее согласие с экспериментом. Постулаты Бора были радикальны, и для их восприятия научному сообществу, не принимавшему независимость частоты излучения от частоты периодического движения излучающего заряда, требовалось преодолеть определенный психологический барьер. Бор, применив свою полуклассическую теорию к строению простейшего атома (водорода), сумел объяснить две известные в то время спектральные серии и предсказал еще две, пока не открытые. Он дал рациональное объяснение таинственным сериям спектральных линий, определил радиус атома и подсчитал значение постоянной Ридберга, входившей в комбинационный принцип Ридберга–Ритца. Это было огромным успехом. Но при переходе к более сложным атомам Бор столкнулся с трудностями — для атома гелия только математическими, а при нескольких электронах задача оказалась сложнее, чем задача многих тел в теории Ньютона. И Бор стал строить *водородоподобные модели*. Хотя данные по спектрам водорода уже на следующий год были подтверждены, но пока согласия с опытом было немного.

В том же 1913 г. Дж. Франк и Густав Герц пытались на опытах изменить планетарные орбиты электронов в атомах. Электроны вылетали из источника — электронной пушки — с энергией, которая определялась ускоряющим напряжением, приложенным к двум проволочкам, и проходили через газ из паров натрия, сталкиваясь с ними и искажая свои орбиты, точно так же, как звезда, проходящая вблизи планеты, искажала бы ее орбиту. По закону сохранения энергии это воздействие должно было бы изменить скорости электронов в выходящем из газовой камеры пучке. Но оказалось, что скорость электронов в пучке почти не менялась, если их начальная энергия была меньше некоторой минимальной величины (большей в 1000 раз тепловой энергии при обычной температуре), т.е. энергию электрона нельзя изменить на произвольную величину, чего не может быть при воздействии на планетную систему.

Получалось, что атому водорода можно сообщить только 10; 12; 12,5; 12,9... эВ энергии, тогда как атому натрия — 2,1; 3,18; 3,6; 3,75... эВ и т.д. Каждая величина энергии соответствует определенному состоянию движения электронов, а каждая линия — состоянию, которое атомы могут принимать (такие состояния называли *разре-*

шенными квантовыми состояниями, а остальные — *запрещенными*). Состояние с наименьшей энергией определили как основное состояние, а остальные разрешенные — как возбужденные. Пороговая энергия равна разности между первым возбужденным и основным состояниями. Так возникло представление о *квантах энергии*. Ряд разрешенных значений энергии атома обычно называют его *спектром*. Даже из приведенных выше значений разрешенных порций энергии для атомов видно, что с ростом энергии возбуждения квантовые состояния становятся столь близкими, что почти сливаются, и квантовые эффекты исчезают.

Если воспользоваться сравнением энергии с банковским счетом, предложенным В. Вайскопфом, известным физиком и популяризатором, то можно сказать, что «банк разрешает вносить вклады на счет и снимать с него только некоторые определенные суммы, чтобы держать величину вклада на одном из заранее предписанных уровней... Но странные правила, регулирующие банковский счет, не применяются к большим вкладам, потому что размеры дозволенных операций по вкладам становятся тем меньше, чем больше счет».

Модель Бора — первая квантовая модель атома. Объединив в себе результаты, полученные при исследованиях радиоактивности, оптических и электромагнитных явлений, она положила начало новой эпохе в развитии теории атома и сразу же обнаружила свою плодотворность в спектроскопии и химической связи. Предсказание спектра атома водорода явилось выдающимся предсказанием теории Бора. Это был величайший триумф физики. За создание квантовой теории атома Бор стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 1922 г. Дальнейшее развитие теории привело к созданию Шредингером и Гейзенбергом *квантовой механики*, описывающей поведение мельчайших частиц в микромире (1926 г.). Все дискретности величин в микромире оказались пропорциональными постоянной Планка, введенной в 1900 г. для решения проблем излучения. Этот квант действия и дал название новой механике (нем. *quant* < лат. *quantum* «сколько»).

Впоследствии установили, что электрон не может рассматриваться как материальная точка, что он обладает волновыми свойствами, что он имеет структуру, зависящую от его состояния, что и боровских стационарных орбит не существует. Из-за своей волновой природы электроны и их

заряды как бы размазаны по пространству атома, причем так, что электронная плотность неоднородна и в определенных местах имеет максимумы. Описание поведения электронного облака дано в квантовой механике, но это описание становилось все более далеким от наглядности. Микромир не позволяет описывать привычным образом поведение своих объектов, так как в нем теряется наглядность описания, связанная со свойствами частицы или волны: например, электрон, который привыкли считать частицей, проявляет и волновые свойства, а световая волна начинает вести себя, как частица. Специфика квантово-полевых представлений состоит в вероятностной форме законов.

При очень больших значениях энергии, сообщенной атому, он теряет свои свойства, образуя четвертое агрегатное состояние — *плазму*. В плазме исчезают почти все упорядочения, отличающие один атом от другого, там царит хаос. Плазма газообразного неона (где на атом 10 электронов) имеет те же свойства, что и плазма газообразного натрия с одиннадцатью электронами. Хаос таких высоких температур на Земле возможно наблюдать только в лабораторных условиях, а для космоса плазма — обычное явление, которое часто встречается в виде газа, испущенного звездами, или внутри Солнца и звезд. Так что при больших энергиях атом и ведет себя как планетная система, а отклонения происходят только при низких, порционных, значениях энергии.

Бор показал, что к формуле Бальмера можно придти по аналогии с классической электродинамикой, которая должна иметь место при излучении больших длин волн. В самом деле, излучение в этой области спектра согласуется с классической формулой Рэлея–Джинса. Это положение, названное Бором «*Принципом соответствия*», стало методологическим основанием первоначального развития квантовой механики. В пределе, когда стационарные состояния оказываются близкими и мало отличаются друг от друга, можно пользоваться классическими представлениями. Но для дальнейшего развития теории этот принцип не оказал конструктивной помощи. Ван дер Верден назвал весь период с 1919 по 1925 гг. периодом «систематического угадывания» на основе принципа соответствия. С.И. Вавилов считал, что неудача с расчетами атома гелия лишила Бора мощного орудия исследования — использования классических представлений для «почти интуитивного угадывания истинных отношений».

6.4. ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕВРАЩЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДРУГ В ДРУГА

Явление радиоактивности открыл французский физик А. Беккерель, исследуя люминесценцию (1896 г.). Он облучал солнечными лучами различные вещества, заворачивал их в черную бумагу и помещал над фотопластинкой. В отличие от других веществ, бисульфат урана и калий вызывали почернение фотопластинки и без солнечного облучения, самопроизвольно, и это новое излучение ионизовало воздух, как и рентгеновское. При попытках измерить эту особенность, Склодовская–Кюри открыла новый элемент — радий, а сам эффект излучения назвала *радиоактивностью* (лат. *radio* «испускаю лучи»). Интенсивность

излучения радия в сотни тысяч раз была больше, чем у урана. Происхождение радиоактивности — ключ к пониманию строения атомов и ядер.

Закон спонтанного распада радиоактивных атомов связывает радиоактивные превращения с уже известными видами *естественной радиоактивности* — *альфа-, бета- и гамма-лучами*. Резерфорд и Ф. Содди, занимаясь радиоактивностью и изучая химическую природу эманации тория в Монреале (1901–1902 гг.), установили, что этот газ инертный и что это один из изотопов аргона. Кроме того, они обнаружили и другой газ, существенно активнее тория,

причем его активность убывала вдвое за четверо суток. Вероятно, эманация принадлежала этому элементу, а не торью. Так они пришли к выводу, что «радиоактивность нужно рассматривать как проявление внутриатомного химического процесса». В 1903 г. они вывели закон такого распада: *при испускании альфа-лучей (ядер атомов гелия) образуется новый элемент, стоящий в периодической таблице на две клетки левее, а при бета-распаде — на одну клетку правее*. «Радиация сопровождает превращения атомов и служит мерой, определяющей степень их распада», — выразился Резерфорд при получении им за эти работы Нобелевской премии по химии (1908 г.). Было признано, что они стимулировали исследования в области *радиоактивных превращений*, т.е. в некотором смысле воплотили в себе старую мечту алхимиков о превращении элементов.

Новые элементы, возникающие при радиоактивном распаде, исследовал Содди. Он, как и другие, не мог отделить ионий от тория никакими химическими способами. Это было странно, поскольку большинство радиоактивных элементов расположено в Периодической таблице вблизи инертных газов, а свойства элементов в этой части таблицы легко предсказываются, поэтому они должны и легко отделяться. Кроме того, в этой части таблицы нет свободных клеток. Еще расчеты по модели атома Томсона показывали, что число электронов в атоме пропорционально атомному весу. Так Содди пришел к выводу и показал, что в одной клетке таблицы могут быть элементы с разной массой, но обладающие одним зарядом ядра и одинаковыми свойствами. Содди назвал их *изотопами* (греч. *iso* «одинаковый» и *topos* «место»). Впоследствии установили, что в состав ядра входят *нейтроны*, которые и изменяют массы. Содди за большой вклад в исследование атомов стал лауреатом Нобелевской премии по химии за 1921 г.

Разделял изотопы методом газовой диффузии английский физик Ф.Астон еще в 1913 г. Потом он предложил *электромагнитный метод* — ионизованные атомы отклоняются электрическим или магнитным полем, при этом величина отклонения зависит от массы. В 1919 г. Астон сконструировал первый *масс-спектрограф*, который свел проблему к простой лабораторной операции и произвел настоящую революцию в исследовании *изотопов*.

С помощью масс-спектрографа Астон выяснил почти все об изотопах. Так, вскоре показали, что хлор имеет изотопы 35 и 37, а в первых опытах фиксировались еще и гидриды с весами 36 и 38, и нужно было еще выяснять какие из пучков атомные, а какие — молекулярные. Астон занимался разработкой методов разделения изотопов, за что получил в 1922 г. Нобелевскую премию по химии. Он открыл большое число стабильных изотопов и занимался их изучением. Все опытные факты, полученные в лаборатории Резерфорда, относились к радиоактивным элементам, поэтому необходимо было получить подтверждение, что и нормальные атомы устроены аналогично.

Первая мировая война затормозила эти исследования, и только в 1920 г. Резерфорд приступил к экспериментам по облучению азота альфа-частицами. Появлялись ионы водорода с одним зарядом, названные Марсденом *прото-*

нами, но их получалось всего 20 на 10^6 альфа-частиц. Кроме протонов, Резерфорд получил и изотоп кислорода с массой 17. Но последующее открытие Чэдвигом *нейтрона* существенно углубило понимание процессов превращения элементов.

Первую ядерную реакцию с искусственным превращением элементов осуществили в 1921–1922 гг. Резерфорд и Дж.Чэдвак. Результаты своих более подробных исследований этих реакций в Кавендишской лаборатории (Кембридж) Чэдвак опубликовал только в 1932 г. Они касались облучения бериллия, при котором получались частицы с массой протона без заряда, названные Чэдвигом *нейтронами* (лат. *neutrum* «ни то ни другое»). Резерфорд предсказал существование таких частиц еще в 1921 г. За это открытие Чэдвак стал лауреатом Нобелевской премии по физике (1935 г.).

Расщепления атомов кислорода под действием нейтронов добились в том же 1932 г. австрийский физик Л.Майтнер и К.Филипп. Потом были получены и другие расщепления. «Большая эффективность нейтронов в получении ядерных реакций, — говорил Чэдвак, — легко объясняется. При столкновении заряженной частицы с ядром вероятность ее проникновения в ядро ограничена кулоновской силой. И это определяет то минимальное расстояние, на которое может приблизиться частица и которое возрастает с увеличением атомного номера ядра и становится столь большим, что вероятность проникновения в ядро становится малой. В случае соударения с ядром нейтрона ограничения такого типа не возникает. Сила взаимодействия нейтрона с ядром очень мала, только на малых расстояниях она начинает быстро расти и носит характер притяжения. Вместо потенциального барьера, как в случае заряженных частиц, нейтрон встречает «потенциальную яму». Поэтому даже нейтроны слабых энергий могут проникать в ядро».

Квантовомеханическую теорию альфа-распада создали в 1928 г. молодой советский физик Г.А.Гамов и независимо Р.Гарни и Э.Кондон. Было непонятно, как могла альфа-частица преодолеть потенциальный барьер и выйти из ядра, и Гамов объяснил явление с помощью волновой механики, используя аналогию с частичным проникновением света во вторую среду при падении на границу раздела двух сред под углом, большим угла полного внутреннего отражения.

Проблема состава ядра после открытия нейтронов стала актуальной. В 1930 г. В.А.Амбарцумян и Д.Д.Иваненко высказали идею, что электронов вообще нет в ядре. После открытия нейтронов Иваненко предположил, что *ядра состоят только из протонов и нейтронов* (1932 г.). Гипотеза Иваненко, привлекательная своей простотой, была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений, быстро распространилась и стала использоваться даже для обозначений. Протоны и нейтроны, как основу строения ядра, стали называть *нуклонами*. Проблема ядерных сил до сих пор не имеет решения, хотя эта гипотеза лежит в основе современной теории строения ядра.

Теорию бета-распада в 1936 г. выдвинули Паули и итальянский физик (эмигрировавший в 1938 г. в США) Энрико Ферми. Они предположили, что в ядре происходит *превращение нейтрона в протон* с одновременным испус-

канием электрона и нейтрино (нейтральной частички, обладающей ничтожной массой и собственным моментом вращения, или спином, равным $1/2$). Испускание электрона

происходит примерно так же, как фотон испускается атомом.

6.5. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Самопроизвольный распад и образование новых элементов изучались с начала XX в. Так, при обработке драгоценных камней на Цейлоне был открыт новый минерал — ториянит, который в Англии исследовали У.Рамзай и О.Ган. Они получили вещество, соответствующее тории, но с большей радиоактивностью, и назвали его *радиоторием*. Среднее время его жизни оказалось 2 года. Значит, им можно было бы заменить дорогостоящий радий в лабораторных опытах, но они не смогли выделить радиоторий никакими химическими методами. В 1907–1910 гг. подобные проблемы возникали при выделении некоторых других радиоактивных элементов. После открытия нейтрона опыты по бомбардировке альфа-частицами продолжались, меняя представления об элементах и показывая возможность превращения одних элементов в другие.

Фотографии протона, вылетающего при столкновении альфа-частицы с атомом азота, получил в камере Вильсона ученик Резерфорда П.Блэккет (1925 г.). Но это явление, т.е. *расщепление ядра*, происходило очень редко: на 23000 фотографий с 460000 траекторий частиц только в восьми случаях наблюдался вылет протона. Значит, альфа-частицы слишком неэффективны для расщепления. Теория Гамова позволяла, придав частице большую энергию, преодолеть потенциальный барьер, и, так как для маленьких частиц вероятность проникновения больше, разогнав до большой скорости протоны, можно добиться большей эффективности, чем у альфа-частиц.

В атомной физике 1 эВ соответствует энергии, приобретаемой частицей с зарядом e при прохождении разности потенциалов 1 В. Энергия наиболее быстрых альфа-частиц, испускаемых радиоактивными веществами, равна 8 МэВ. В 1925 г. для получения рентгеновских лучей использовались мощные индукционные катушки с разностью потенциалов порядка 100 кВ. Значит, ускоренный в таком поле электрон (или протон) мог приобрести энергию в 0,1 МэВ. Но теория Гамова предсказывала, что протоны с энергией 1 МэВ будут по эффективности равны альфа-частицам с энергией 32 МэВ. Идея была привлекательной, и начали строить все более мощные установки со все более огромными напряжениями. Возникла *современная алхимия*, как выразился Резерфорд.

Космические лучи, открытые еще в 1904 г., привлекали внимание и астрономов, и геофизиков. Они вызывали первичную ионизацию воздуха, возрастающую с высотой. После Первой мировой войны их изучение возобновилось не только на высотах, но и в глубинах водоемов. Космическое излучение, не без влияния исследований радиоактивности, считалось состоящим из гамма-квантов, вызывавших в атмосфере бета-излучение. Д.В.Скобельцын, основатель советской школы по физике атомного ядра и космических лучей, впервые исследовал эти лучи с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, и установил, что ионизация воздуха создается не гамма-квантами, а быстрыми β -лучами при энергиях 200 МэВ.

Дальнейшие исследования показали, что первичные космические лучи, состоящие в основном из протонов, действительно рождают быстрые β -лучи. Американский физик К.Андерсон осенью 1932 г. продолжил исследования лучей по методу Скобельцына и обнаружил на фотоснимках треков (следов) в камере Вильсона положительные электроны, которые назвал *позитронами* (одновременно с ним их открыли в Англии Блэккет и Оккиалини). Велись активные поиски позитрона в самых разных процессах. При облучении ядер тяжелых элементов жесткими гамма-квантами зафиксировали рождение пар электрон–позитрон — так материя гамма-кванта переходила в материю электрона и позитрона. Затем было открыто превращение пары электрон–позитрон в два гамма-кванта — этот процесс назвали *аннигиляцией*. Образование позитрона было обнаружено и при взаимодействии с ядрами альфа-частиц и нейтронов. Так в очень короткий срок стало известно о существовании *античастиц*.

Открытие искусственных радиоактивных элементов осуществили И.Кюри, дочь П. и М.Кюри, и ее муж, Ф.Жолио (1934 г.). За год до этого они установили, что при бомбардировке альфа-частицами некоторых легких элементов возникают позитроны, испускающиеся и после реакции. Энергетические соображения привели их к выводу, что сначала альфа-частица захватывается ядром алюминия с мгновенным испусканием нейтрона и образованием радиоактивного атома (изотопа фосфора с атомным весом 30), затем этот нестабильный атом — названный радиофосфором — распадается с испусканием позитрона и превращается в уже устойчивый изотоп кремния. За открытие искусственной радиоактивности супруги Жолио–Кюри стали лауреатами Нобелевской премии по химии (1935 г.). Открытие искусственных радиоактивных элементов имело большое значение для науки и создало огромное поле приложений в биологии и практической медицине.

Опыты по бомбардировке нейтронами ядер тяжелых элементов в Италии проводил Ферми. Выяснилось, что при захвате ядрами медленных нейтронов могут образовываться радиоактивные изотопы тех же или последующих элементов. Так, при облучении урана найдены изотопы нескольких веществ с периодами полураспада 10 с, 40 с, 13 мин и 100 мин. Изучая последние два, Ферми отметил, что они не являются изотопами элементов между номерами 82 и 92. Так были открыты *трансурановые элементы*. Кроме того, Ферми отметил, что эффективнее действуют «замедленные» нейтроны, т.е. предварительно прошедшие через воду или парафин. Эту кажущуюся парадоксальной ситуацию он объяснил с позиций волновой механики.

В результате возникла идея, что при бомбардировке нейтронами (в отличие от альфа-частиц) могут образовываться и элементы, расположенные примерно в середине таблицы Менделеева, т.е. *нейтроны могут расколоть ядро*

на большие осколки. В 1938 г. О.Ган и Ф.Штрасман обнаружили, что после бомбардировки нейтронами урана из раствора вместе с барием осаждаются четыре альфа-радиоактивных вещества. Сначала их посчитали изотопами актиния и радия, но позднее заметили, что они не отделимы от бария, а отделяются от радиотория. В то же время реакциями деления урана занимались Майтнер (работавшая до прихода нацизма вместе с Ганом и Штрасманом и вынужденная бежать в Копенгаген), О.Фриш (также эмигрировавший в Данию к Бору) и Ф.Жолио-Кюри.

Исследования конца 30-х годов стимулировали развитие представлений о структуре ядра, которое тогда рассматривали как твердое тело, склеенное из альфа-частиц и нуклонов. Бор указывал, что взаимодействие частицы с ядром следует рассмотреть более внимательно. Модель жидкой капли, предложенная Гамовым в 1931 г., тоже осталась вне внимания. Но сразу после сообщений о делении ядра урана ленинградский физик-теоретик Я.И.Френкель объяснил явление по *капельной модели ядра*: ядро, как и жидкая капля, должно обладать огромным поверхностным натяжением (порядка 10^{16} Н/м). Попадание нейтрона в ядро приводит к электрокапиллярным колебаниям капли, что и вызывает ее деление почти пополам. Впоследствии эту теорию разрабатывали Н.Бор и Дж.Уилер.

6.6. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПРОБЛЕМА ПОИСКА «ПЕРВИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ»

Элементарными называют частицы, входящие в состав прежде «неделимого» атома. Первыми были обнаружены электрон, протон, нейтрон и фотон — квант электромагнитного поля. Из первых трех строили вещество, а фотон осуществлял взаимодействие между ними. Тогда считали, что они ни на что далее не могут быть разложены и потому являются «первичными кирпичиками» мироздания. Позднее узнали, прежние элементарные частички имеют внутреннюю структуру и могут превращаться друг в друга. После Второй мировой войны благодаря мощной технике было открыто еще много частиц, претендующих на «элементарность». У каждой частицы, кроме фотона, оказалась еще и античастица. Сейчас элементарных частиц уже более трехсот. К ним относят и те частицы, которые получают при помощи мощных цикло тронов, синхротронов и других ускорителей частиц. Есть элементарные частицы, возникающие при прохождении через атмосферу космических лучей, они существуют несколько миллионов долей секунды, потом распадаются, видоизменяются, превращаясь в другие элементарные частицы, или испускают энергию в форме излучения. Хотя проблема элементарных частиц связана с самими основами науки, их изучение ведется в некотором отрыве от других областей физики.

Основные характеристики элементарных частиц — масса, электрический заряд, спин, среднее время жизни, магнитный момент, пространственная четность, барионный заряд и квантовые числа.

Масса элементарных частиц — это масса покоя, поскольку она не зависит от состояния движения. Ее определяют по отношению к массе покоя электрона m_e , самой маленькой из масс покоя. Нейтрон и протон тяжелее электрона почти в 2000 раз. Но есть и очень тяжелые

Вскоре было обнаружено, что деление урана сопровождается появлением свободных нейтронов, которые, попадая в ядро урана, могут вызвать новый процесс деления. Появились и теоретические работы, в которых формулировались конкретные условия для получения ядерной взрывной реакции. Наиболее значительных результатов в этом направлении достигли физики-теоретики Я.Б.Зельдович и Ю.Б.Харитон, впервые осуществившие расчет цепной реакции деления урана: «Для осуществления условий цепного взрыва урана необходимо для замедления нейтронов применять тяжелый водород или, может быть, тяжелую воду, или какое-нибудь другое вещество, обеспечивающее достаточно малое сечение захвата. Значительное по сравнению с водородом сечение рассеяния и несколько меньшая эффективность обмена энергией могут компенсироваться ничтожно малым сечением захвата нейтронов и связанной с этим возможностью чрезвычайного разбавления урана... Другая возможность заключается в обогащении урана изотопом 235».

Открытие деления урана ознаменовало начало *эры ядерной физики*. После того, как удалось расщепить ядра урана и плутония, сумели добиться быстрого и интенсивного высвобождения энергии, необходимой для взрыва атомной бомбы.

частицы, например, Z -частицы, получаемые на ускорителях, с массой покоя в 2000000 m_e . Фотоны вообще не имеют массы покоя. По массе частицы делят на лептоны (электрон и нейтрино); мезоны (с массой от 1 до 1000 m_e); барионы (с массой более 1000 m_e). В состав барионов входят протоны, нейтроны, гипероны и др.

Электрический заряд меняется от нуля до «+» или «-». Каждой частице, кроме фотона, нейтрино и двух мезонов, соответствует частица с противоположным зарядом или античастица. В 1963 г. была высказана гипотеза о существовании частиц с дробным зарядом — *кварков*.

Спин — одна из важнейших характеристик элементарных частиц. Она определяется собственным моментом импульса частицы. Спин фотона равен 1, это означает, что частица примет тот же вид после полного оборота на 360 градусов. Частицы со спином $1/2$ примет прежний вид при обороте, в 2 раза большем, т.е. в 720 градусов. Спин протона, нейтрона и электрона — $1/2$. Существуют частицы со спином в $3/2$, $5/2$ и т.д. Частица со спином, равным нулю, одинаково выглядит при любом угле поворота. В зависимости от значения спина все частицы делят на две группы:

– *фермионы* (название дано в честь Энрико Ферми), к ним относят частицы с полуцелыми ($1/2, 3/3...$) спинами. Фермионы составляют вещество и, в свою очередь, делятся на два класса — *лептоны* (греч. *leptos* «легкий») и *кварки* (название заимствовано американским физиком Марри Гелл-Маном из романа Дж.Джойса «Поминки по Финнегану», где это слово означало нечто неопределенное, мистическое). Кварки входят в состав протонов, нейтронов и других подобных им частиц, называемых в совокупности *адронами* (греч. *adros* «сильный»). Заряженные лептоны могут так же, как и электроны, вращаться вокруг ядер, образуя атомы. Лептоны, не имеющие заряда, могут, как и

нейтрино, проходить хоть сквозь всю Землю, ни с чем не взаимодействуя. У каждой частицы есть и античастица, отличающаяся только зарядом;

— *бозоны*, названные в честь индийского ученого Шатендраната Бозе (1894–1974), одного из создателей квантовой статистики. Это частицы с целыми спинами (0, 1, 2), бозоны переносят взаимодействие.

Между частицами существуют четыре типа взаимодействий, каждое из которых переносится своим типом бозонов. *Фотон*, квант света, переносит электромагнитные взаимодействия, *гравитон* — силы тяготения, действующие между любыми телами, имеющими массу. Восемь глюонов осуществляют перенос сильных ядерных взаимодействий, связывающих кварки. *Промежуточные векторные бозоны* переносят слабые взаимодействия, ответственные за некоторые распады частиц. Считается, что к этим четырем взаимодействиям сводятся все силы в природе. Одним из самых ярких достижений нашего века стало доказательство того, что при очень высоких температурах (или энергиях) все четыре взаимодействия объединяются в одно.

При энергии 100 ГэВ (10^9 эВ) объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Такая энергия соответствует температуре Вселенной через 10^{-10} с после Большого Взрыва и в 4 триллиона раз выше комнатной. Это открытие, сделанное в ЦЕРНе, позволило предположить, что при энергии порядка 10^{15} ГэВ можно достичь объединения с ними сильных взаимодействий, как это утверждается в Теориях Великого Объединения (ТВО), а при энергии 10^{19} ГэВ к взаимодействиям ТВО присоединится и гравитационное взаимодействие, «образуя» ТВС (Теорию Всего Сущего).

Ускорителей, на которых можно получить такие энергии и проверить эти теории, пока нет и не предвидится, поэтому обращаются ко Вселенной, чтобы найти в ней возможные ограничения для огромного числа элементарных частиц. В последние тридцать лет между физикой элементарных частиц и космологией существует тесная связь. Совокупность астрофизических данных можно рассматривать как «экспериментальный материал», накопленный в результате работы Вселенной как гигантского ускорителя частиц. Мы можем иметь дело только с косвенными следствиями происходивших и происходящих процессов, с усредненным по всей Вселенной результатом их влияния на эволюцию материи.

Среди *лептонов* наиболее известен электрон, вероятно, он не состоит из других частиц, т.е. элементарен. Другой лептон — *нейтрино*. Это самый распространенный лептон во Вселенной, и в то же время самый неуловимый. Нейтрино не участвует ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях. После предсказания нейтрино было обнаружено только через 30 лет на ускорителях. Нейтрино бывает трех видов — *электронное*, *мюонное* и *тау-нейтрино*. Каждый из них рождается вместе с тем или иным лептоном (в соответствии с названием) — вместе с электроном при распаде нейтрона или вместе с мюоном, или вместе с тау-лептоном. Мюон — это тоже широко распространенный в природе лептон. Он был обнаружен в космических лучах в 1936 г.; это очень нестабильная частица, а в остальном он очень похож на электрон. За две милли-

онные доли секунды он распадается на электрон и два нейтрино. Фоновое космическое излучение в большой части состоит из мюонов. В конце 70-х был обнаружен третий заряженный лептон (кроме электрона и мюона) — тау-лептон. Он ведет себя очень похоже на своих собратьев, но тяжелее электрона в 3500 раз. У каждого лептона есть и античастица, т.е. всего их 12.

Адроны существуют очень много, их сотни. Поэтому часто считают их не элементарными частицами, а составленными из других. Они бывают электрически заряженные и нейтральные. Все адроны участвуют в сильном, слабом и гравитационном взаимодействиях. Среди них самые известные — *протон* и *нейтрон*. Остальные живут очень мало, распадаясь за 10^{-6} с за счет слабого взаимодействия или за 10^{-23} с за счет сильного. Адроны рассортировали по массе, заряду и спину. В этом помогла *гипотеза кварков*, или частиц, составляющих адроны.

Кварки могут соединяться для этого тройками, составляя барионы, либо парами кварк — антикварк, составляя мезоны (промежуточные частицы). Кварки имеют заряд $1/3$ или $2/3$ заряда электрона. Тогда в комбинации они дадут 0 или 1. Все кварки имеют спин, равный $1/2$, т.е. они относятся к фермионам. Считают, что они сцепляются сильным взаимодействием, но участвуют и в слабом. Особенности сильного взаимодействия характеризуют типами («ароматами») — «верхний», «нижний», «странный». Но слабое взаимодействие может поменять «аромат» кварка. Например, при распаде нейтрона один из «нижних» кварков становится «верхним», а избыток заряда уносит рождающийся электрон. Так что сильное взаимодействие не может менять «аромат», а без изменения «аромата» кварка невозможен распад адрона.

Новый адрон, названный «пси-частицей», был обнаружен на ускорителях (1974 г.). Поэтому нужно в соответствии с теорией кварков ввести еще одну характеристику, четвертый «аромат», так появился «очарованный» кварк. Так что пси-частица — это предположительно мезон, состоящий из с-кварка и с-антикварка. Сейчас обнаружено уже много очарованных частиц, и все они тяжелые. А в 1977 г. появился *ипсилон-мезон*, и вся история повторилась, пятый аромат получил название «прелесть». Так развивается ныне атомистика. Сейчас считают, что существуют 12 кварков — фундаментальных частиц и столько же античастиц. Шесть частиц — это кварки с экзотическими именами «верхний», «нижний», «очарованный», «странный», «истинный», «прелестный». Они являются порождением теории, стремящейся к упорядоченности и красоте, и открыты все, за исключением «истинного». Остальные шесть — лептоны: электрон, мюон, тау-частица и соответствующие им нейтрино (электронное, мюонное, тау-нейтрино).

Эти 12 частиц, или два по шесть, группируют в три поколения, каждое из четырех членов. В первом поколении — «верхний» и «нижний» кварки, электрон и электронное нейтрино, во втором — «очарованный» и «странный» кварки, мюон и мюонное нейтрино, в третьем — «истинный» и «прелестный» кварки и тау-частица со своим нейтрино. Все обычное вещество состоит из частиц первого поколения. Протон, например, состоит из двух «верхних»

кварков и одного «нижнего», нейтрон — из двух «нижних» и одного «верхнего». Каждый атом состоит из тяжелого ядра (сильно связанных протонов и нейтронов), окруженного электронным облаком.

Но почему существуют другие поколения частиц и сколько их может быть? По мнению японских физиков М.Кобаяси и Т.Масакава, асимметрия между веществом и антивеществом требует наличия трех поколений. Если же число поколений не ограничено, являются ли кварки и лептоны основными «кирпичиками природы» и насколько они фундаментальны? Последние данные, полученные на

ускорителях разного типа, позволяют считать, что число поколений не может быть более пяти, так как полное число нейтрино не превышает этого числа. Ответы на эти вопросы ищут в современной космологии, в моделях первичного нуклеосинтеза, породившего те или иные частицы, часть которых может быть установлена по распространенности того или другого элемента во Вселенной. Эти исследования дают человеку возможность прикоснуться к тайне мироздания, найти те «кирпичики», из которых построено все в мире, а за ними стоят и новые технологии.

Глава 7. МИРОЗДАНИЕ В СВЕТЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПАРАДИГМЫ

7.1. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ И ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ

С движением электрических зарядов связаны многие явления, происходящие в живой и неживой природе. Люди с восхищением и ужасом наблюдали грозовые явления в атмосфере.

Древние римляне делили молнии «по предназначению», отмечая их свойства двигаться по металлам. Аристотель заметил, что «медь щита расплавлялась, а дерево, его покрывавшее, оставалось невредимым». Сенека, философ и наставник императора Нерона, отмечал, что «серебро расплавляется, а кошелек, в котором оно находилось, остается невредимым». Моряки XV в. привязывали к верхушкам мачт обнаженные мечи. Молнии систематизировали и изучали Б.Франклин, М.В.Ломоносов и Г.Рихтер, попытку построить научную картину грозы и ее наиболее драматических проявлений — грома и молнии — предпринял Д.Араго.

Молнии — это гигантские (длиной до нескольких километров) электрические искры между облаками в атмосфере или между облаками и поверхностью Земли. Длительность таких искровых разрядов составляет доли секунд. Чаще всего наблюдаются линейные молнии, они сопровождаются громом. Искровые разряды возникают при напряженностях электрического поля E , больших критических $E_{кр}$ для данного давления и сорта газа. В воздухе пробой возникает при атмосферном давлении $E_{кр} = 30$ кВ/см. Возникает ярко светящийся извилистый канал, по которому проходит импульс тока большой силы. Так, в канале молнии диаметром около 0,4 м при длине в 10^3 м за время 10^{-4} с сила тока достигает 100 кА. При этом температура в канале может достигать до 10000 К. Из-за резкого и интенсивного нагрева газа происходит скачок давления с возникновением звуковых и ударных волн.

Иногда возникают *шаровые молнии* — это образование при ударе обычной молнии газообразных активных веществ, горящих в присутствии катализаторов (частичек дыма или пыли), согласно модели Я.И.Френкеля. Но пока еще неизвестны вещества с такой огромной теплотворной способностью, какой обладает вещество шаровой молнии. По гипотезе А.Мейснера, это — сгусток горячей плазмы, быстро вращающийся за счет некоего начального импульса, переданного сгустку линейной молнией. Но теория не

объясняет достаточно длительного существования шаровой молнии. По теории П.Л.Капицы, молния улавливает радиоволны, возникающие во время грозы, поэтому и может долго существовать, тем более, что имеет пристрастие к всевозможным трубам и дымоходам. Ученым удалось получить в лаборатории плазменные сгустки, напоминающие шаровую молнию, но все свойства этого загадочного объекта пока не удалось получить.

Электрические свойства рыб были известны еще в далекой древности. Аристотель сообщал, что электрический скат «заставляет цепенеть животных, которых он хочет поймать, побеждая их силой удара, живущего в его теле». Позже выяснилось, что электрический скат длиной в 2 м способен создать электроимпульс напряжением в 50–60 В при силе тока в 50 А. Электрический угорь может парализовать лягушку на расстоянии 1 м. Электрические органы рыб — это специальные мускульные клетки, напоминающие по схеме соединения и конструктивному принципу электробатарей, причем такие органы занимают большую часть тела рыбы. Чувствительность к электромагнитным полям в живой природе просто поразительна. Прекрасно ориентируются в поле инфузории, меняют свой рост растения. Открытие Л.Гальвани — мышцы и нервы аналогичны обкладкам конденсатора — привело к созданию электрофизиологии, к созданию гальванического элемента А.Вольта в конце XVIII в., к открытию электролиза У.Никольсоном и А.Карлейном и т.д.

Полярные сияния, называемые часто сполохами, наблюдаются в высоких северных широтах. Они разнообразны по форме и цвету, полыхают несколько часов как разноцветное пламя, охватившее полнеба. Свет вызывается столкновениями протонов и электронов солнечного ветра с атомами кислорода и азота, находящимися в верхних слоях атмосферы. Еще М.В.Ломоносов считал, что это явление вызвано электрическими разрядами в разреженном воздухе. Взаимодействие частиц солнечного ветра с магнитным полем Земли приводит к повышенной концентрации заряженных частиц в областях, находящихся вблизи геомагнитных полюсов Земли. Возбуждаемые заряженными частицами атомы кислорода дают яркое излучение в красной и зеленой областях спектра, а молекулы азота — в

фиолетовой. Сочетания всех этих излучений и придает полярным сияниям часто меняющуюся окраску. Эти процессы наблюдаются на высотах от 80 до 1000 км, поскольку ниже заряженные частицы солнечного ветра не проходят, да и нижние слои атмосферы более плотные, так что столкновения между частицами рассеивают полученную от быстрых солнечных частиц энергию.

Из космоса приходят и другие частицы высоких энергий, которые образуются вне солнечной системы, их называют *галактическими космическими лучами*. Эти частицы, в основном протоны и тяжелые атомные ядра, попадают в магнитное поле Земли, и большинство из них отклоняется им и до поверхности Земли не доходят. Они отклоняются в сторону магнитных полюсов и могут даже при небольшой энергии достигать поверхности вблизи полюсов.

7.2. ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Еще Фалес заметил, что янтарь начинает притягивать мелкие предметы, если его потереть о шелк или мех. По гречески янтарь и называется электрон. В конце XVI в. У. Гильберт доказал, что Земля ведет себя как большой магнит, что есть две разновидности магнетизма, получившие название в соответствии с магнетизмом Земли северного и южного полюса. Затем Шарль Дюфе установил, что существуют два типа зарядов — положительные и отрицательные. Магнитные заряды, как и электрические, могут притягиваться или отталкиваться по закону обратных квадратов в зависимости от разно- и одноименности. Но в отличие от электрических, магнитные заряды всегда парные, и никому не удалось получить изолированный магнитный полюс — монополь.

Электрический ток — это упорядоченное и направленное движение зарядов. В повседневной жизни и в технике человек сталкивается с ним. Электрический ток характеризуется силой тока — скалярной величиной, которая равна заряду, переносимому через некоторую поверхность, или скоростью переноса зарядов Q через поперечное сечение проводника или: $I = Q/t$. Сила тока измеряется в амперах (А), ток в 1 А равен переносу заряда в 1 Кл через какую-либо поверхность за 1 с. За направление тока принято направление перемещения положительных зарядов. Различают ток проводимости и конвекционный ток. *Ток проводимости* — это направленное движение зарядов в проводящих телах: электроны в металлах, дырки в полупроводниках, ионы в электролитах, электроны или ионы в газах. *Конвекционный ток* — это движение заряженных тел и поток заряженных частиц в вакууме. Иногда выделяют предсказанный Максвеллом и после обнаруженный *ток смещения* — переменное электрическое поле. Любой ток является источником магнитного поля.

В обычных проводниках свободные электроны движутся со скоростями порядка 10^8 м/с. В отсутствие поля это движение происходит хаотично, и тока нет. Если в проводнике создать разность потенциалов, и не поддерживать ее, то перемещение зарядов прекратится — работа электростатических сил в замкнутой цепи равна нулю. Для поддержания тока нужно от конца проводника с меньшим потенциалом отводить поступающие заряды, а к концу с

Магнитное поле Земли простирается далеко в космическое пространство, Солнце тоже порождает магнитное поле, которое заполняет всю солнечную систему. Вблизи Земли есть области, где собирается много отклоненных заряженных частиц — протонов и электронов, эти области называют радиационными поясами. Энергичные протоны космических лучей в верхних слоях атмосферы сталкиваются с ядрами атмосферных газов, при этом выделяются нейтроны, на которые магнитное поле Земли не действует и которые поэтому не отклоняются и попадают в области с меньшей напряженностью магнитного поля. Но нейтроны живут всего 12,8 мин, после чего распадаются на электроны, протоны и нейтрино. Нейтрино улетают как не имеющие заряда, а заряженные частицы захватываются полем и образуют магнитные пояса Земли.

большим потенциалом — непрерывно подводить. Этот процесс можно осуществить за счет сторонних сил, вызванных химическими, тепловыми или другими процессами. Величина работы этих сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда называется *электродвижущей силой* — ЭДС — E , которая действует в цепи или на участке ее. В постоянном электрическом поле движение зарядов отличается от движения незаряженных частиц, они двигаются с меньшей скоростью, чем должны бы двигаться по второму закону Ньютона. Электроны сталкиваются с ионами, закрепленными в узлах кристаллической решетки, теряют энергию, испытывают сопротивление движению.

Сопротивление проводника переносу зарядов определяется физической величиной, называемой *сопротивлением* (R). В начале XIX в. Георг Ом определил сопротивление как $R = U/I$. Он открыл закон, согласно которому ток в металлах при постоянной температуре пропорционален приложенному напряжению и обратно пропорционален сопротивлению проводника: $I = U/R$. Поскольку в системе СИ напряжение измеряется в вольтах (В), а сила тока — в амперах (А), то сопротивление должно измеряться в В/А. Эта величина названа Ом — в честь Ома.

Закон Ома — следствие фундаментальных законов взаимодействия и строения вещества. Величина сопротивления проводника зависит от его длины, поперечного сечения и свойств материала, из которого он выполнен. Эти свойства учитываются удельным электросопротивлением ρ , или величиной — $\sigma = 1/\rho$, называемой коэффициентом электропроводности или проводимостью материала. Эти величины сильно зависят от температуры, как видно из наблюдений за свечением проволоочки в лампах накаливания. Это используется в термомпарах — термометрах сопротивления. С понижением температуры сопротивление падает, и вблизи 0 К возможно явление, называемое *сверхпроводимостью*. Сопротивление находит объяснение в квантовой теории твердого тела.

Газ состоит из нейтральных частиц, является изолятором, и специальная ионизация его делает электропроводящим. В отличие от газов, в электролитах и металлах носители тока существуют независимо от электрического

поля. В них с повышением температуры подвижность ионов возрастает, т.е. электропроводность увеличивается. Биологические ткани и органы — довольно разнородные образования с разными электрическими сопротивлениями. Это затрудняет измерения, но электропроводность их зависит от функционального состояния, и потому может использоваться как диагностический показатель. Например, при воспалении клетки набухают, уменьшается сечение межклеточных соединений и растёт электрическое сопротивление. Отсюда физиологические явления, вызывающие потливость, увеличивают электропроводность кожи и т.д. Порог ощутимого тока — около 1 мА на частоте 50 Гц у мужчин на участке предплечье — кисть. При увеличении силы тока сустав может сгибаться, и человек уже не сможет освободиться от проводника — источника напряжения. Это — порог неотпускающего тока. Воздействуя на сердце, ток может вызвать фибрилляцию желудочков и гибель.

При столкновении электронов с ионами решетки в металлах происходит выделение тепла. Английский физик Дж.Джоуль и русский ученый Э.Х.Ленц независимо друг от друга установили опытным путем, что количество выделяющегося в проводнике тепла пропорционально сопротивлению проводника, силе тока и времени: $P^2 R t$. При прохождении зарядом dq разности потенциалов U изменение энергии можно записать так: $dE = U dq$; разделим обе части этого выражения на время и получим следующее: $dE/t = U dq/dt$, отсюда для Джоулева тепла или потерь электрической мощности получим выражение: $P = IU$. Это выражение можно записать и так: $P = I^2 R$, заменив U на IR , и так: $P = U^2/R$, заменив I на U/R в соответствии с законом Ома. В системе СИ электрическая мощность измеряется в ваттах (Вт).

Ватт — это мощность, при которой за 1 с совершается работа 1 Дж. При частотах более 500 кГц смещение ионов становится соизмеримым со смещением, которое вызывается молекулярно-тепловым движением, и такой ток используется в медицине. Тепловое действие тока находит широкое практическое применение (бытовые приборы, электросварка, выплавка металла).

Энергия, потребляемая электроприбором и преобразуемая в другие виды энергии, равна произведению мощности на время использования этой мощности: $E = Pt = I U t$.

Закон Ампера устанавливает взаимодействие проводников, по которым течет постоянный ток, — притяжение, если по двум параллельным проводникам токи текут в одном направлении, и отталкивание — если в противоположном. $F_A = (\mu_0/4\pi) I_1 I_2/d$, здесь d — расстояние между проводниками, μ_0 — магнитная постоянная. При взаимодействии параллельных токов силы пропорциональны произведению сил токов, магнитной проницаемости среды, длине проводников и обратно пропорциональны расстоянию между ними. Таким образом, уже в законе Ампера видно, что взаимодействие осуществляется через среду при отсутствии непосредственного соприкосновения проводников. Эта среда и есть магнитное поле.

При сильных токах притяжение проводников может стать большим, они могут даже сомкнуться. В случае короткого замыкания. Увеличившийся в сотни и тысячи раз ток отключается моментально, за доли секунды, и это может привести к аварии.

Магнитное поле — это одна из форм проявления электромагнитного поля, это вид материи, посредством которой осуществляется силовое воздействие на движущиеся электрические заряды, помещенные в поле, и другие тела, обладающие магнитным моментом. Возникновение магнитного поля вокруг провода с током обнаружил Г.Эрстед в 1820 г. А.М.Ампер установил, что распределение магнитных силовых линий определяется правилом правой руки — если взять проводник в правую руку, чтобы большой палец указывал направление тока, то пальцы покажут направление магнитных силовых линий. Если поместить плоский замкнутый контур малой площади S из проводника с током I в магнитное поле, то обнаружится, что поле начинает вращать рамку с током. Величина вращающего момента M зависит от угла отклонения направления поля от направления нормали к плоскости контура, от свойств контура и свойств поля в данной точке.

Магнитный момент контура равен произведению силы тока на площадь контура: $p_m = IS$, т.е. максимальный момент силы M_{max} пропорционален $p_m = IS$. Магнитный момент — векторная величина, он направлен перпендикулярно плоскости контура с током и связан с направлением тока по правилу правого буравчика. Магнитный момент является характеристикой многих элементарных частиц — протонов, нейтронов, электронов и др. Его единицей является ампер-квадратный метр ($A \cdot m^2$). В микромире вводят особые единицы, называемые атомным (μ_B), или ядерным (μ_d) магнетонами Бора. Зависимость между M_{max} и p_m используют для введения силовой характеристики магнитного поля — *магнитной индукции*.

Вектор магнитной индукции характеризует магнитное поле в каждой точке пространства. Он определяется отношением максимального значения вращающего момента, действующего на контур (при отклонении нормали к его плоскости на 90°), к величине магнитного момента. Она не зависит от свойств различных контуров и представляет количественную характеристику магнитного поля. Вектор магнитной индукции определяется величиной $B = M_{max}/p_m$, направление его совпадает с направлением вектора p_m в положении устойчивого равновесия контура. Условились выбирать направление вектора B в точке расположения магнитной стрелки совпадающим с направлением от южного к северному полюсу стрелки. Измеряется магнитная индукция в теслах (Тл), $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} / 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Н} / (\text{А} \cdot \text{м})$, т.е. в поле с магнитной индукцией 1 Тл на контур с магнитным моментом в $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ действует максимальный момент силы 1 Н·м. Индукция магнитного поля Земли изменяется от $4,2 \cdot 10^{-5}$ Тл на экваторе до $7 \cdot 10^{-5}$ Тл у магнитных полюсов. В ускорителях на протонах она достигает 6,6 Тл.

Поле вектора магнитной индукции может быть представлено в виде линий магнитной индукции, касательные к которым показывают направление вектора B . Эти линии замкнуты. Число линий, проходящих через единичную площадку, перпендикулярную к ним, равно модулю вектора B . Такое поле называют *вихревым*. И циркуляция вектора магнитной индукции по любой линии магнитной индукции не равна нулю. Если поместить на пути магнитного потока площадку площадью S , перпендикулярную силовым линиям, то число силовых линий, пронизывающих площадку, не

будет зависеть от ее положения (так как определяется модулем вектора B). Тогда магнитный поток $\Phi = B S$. Единица магнитного потока вебер (Вб): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ в системе СИ.

Электромагнитная индукция означает, что и переменное магнитное поле тоже порождает электрическое поле, т.е. и электрический ток. В этом основной закон электромагнитной индукции, установленный в 1831 г. М.Фарадеем. Как и заряд, движущийся в магнитном поле, испытывает действие силы, на движущийся в магнитном поле проводник с током действует магнитная сила. При выключении источника питания, поддерживающего ток в проводнике, магнитная сила исчезнет. Но при перемещении проводника без тока в магнитном поле появится магнитная сила, которая будет действовать на заряды в проводнике, вызывая их перемещение, т.е. появится ток. Итак, в проводнике при перемещении в магнитном поле будет индуцироваться электрический ток. Здесь важно относительное перемещение поля и проводника, поэтому таким перемещением будут и процессы вдвигания и выдвигания магнита в проволочную рамку. Таким образом, переменное магнитное поле создает поле электрическое. И наоборот, переменное электрическое поле создает магнитное поле. Математический закон был записан К.Максвеллом.

В результате действия магнитной силы на проводник он приходит в движение. Но как только он начал двигаться, возникает магнитная сила, которая действует на заряды в проводнике из-за их движения в направлении первоначальной силы. По правилу правой руки можно убедиться в том, что она действует против тока, т.е. индуцируемый ток стремится уменьшить первоначальный ток. Этот закон был установлен Э.Х.Ленцем. Закон Ленца имеет общий характер: если какое-то изменение A движения зарядов или полей вызывает эффект B , то этот эффект вызовет реакцию C , которая стремится уменьшить изменение A . Правило Ленца позволяет определить направление тока, индуцированного в цепи. Оно внешне похоже на третий закон Ньютона и на принцип Ле Шателье в химии. Фактически оно отражает закон сохранения энергии в применении к индуцированным токам. Напряженность магнитного поля пропорциональна

току, поскольку движущийся заряд и есть ток (закон Био–Савара–Лапласа).

Сила, действующая на движущийся заряд в электромагнитном поле, была получена Г.Лоренцем. Неподвижный заряд q , помещенный в магнитное поле, не испытывает никакого воздействия. Со стороны электрического поля напряженности E на частицу действует сила qE . Полная сила, действующая на частицу, может быть представлена, как это было сделано Г.Лоренцем в 1892 г., $F = qE + F_m$. Магнитное поле, как было установлено, действует только на движущиеся заряды. Сила, действующая на движущийся в магнитном поле заряд, пропорциональна модулям векторов скорости V и индукции B и синусу угла между ними, т.е. дается векторным произведением этих векторов. Направление силы Лоренца определяется по правилу правого винта, если двигаться от V к B . Итак, $F_m = q [V, B]$.

Эти явления не нашли объяснения с помощью законов механики, основанных на идее *дальнодействия* и *понятии материальной точки*. М.Фарадей показал, что переменное магнитное поле индуцирует в проводнике электрический ток. Эрстед и Фарадей были убеждены в вихревом характере магнитного поля. Фарадей начал экспериментировать с двумя изолированными друг от друга проволочными спиралью, намотанными на деревянную катушку: одну спираль присоединил к гальванической батарее, другую — к гальванометру. Замыкая и размыкая первую спираль, он заметил слабое отклонение стрелки гальванометра. Спустя некоторое время Фарадей обнаружил, что при движении магнита в катушке появляется индукционный ток, т.е. открыл явление *электромагнитной индукции*. В 1831 г. Фарадей задался целью выяснить, нельзя ли магнитные силы, возникающие под влиянием электрического тока, использовать, в свою очередь, для получения тока. После ряда экспериментов он нашел такое расположение проводников и магнита относительно друг друга, когда действием электрического поля подвергался только один магнитный полюс, и в результате добился безостановочного вращения магнита при замкнутой цепи. Так Фарадей, изучая явление индукции, открыл принцип, лежащий в основе устройства современных генераторов тока.

7.3. ПОНЯТИЕ «ПОЛЕ». УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА. СВЕТ — ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Понятие *«поле»* отражает тот факт, что электрические и магнитные силы действуют с конечной скоростью на расстоянии, взаимно и непрерывно порождая друг друга. Фарадей использовал (1840 г.) идею всеобщего сохранения и превращения энергии, хотя сам закон еще не был открыт.

В лекциях (1845 г.) Фарадей говорил не только об эквивалентных превращениях энергии из одной формы в другую, но и о том, что он давно пытался «открыть прямую связь между светом и электричеством» и что «удалось намагнитить и наэлектризовать луч света и осветить магнитную силовую линию». Ему принадлежит методика изучения пространства вокруг заряженного тела с помощью пробных тел, введение для изображения поля *силовых линий*. Он описал свои опыты по вращению плоскости поляризации света магнитным полем. Изучение взаимосвязи электрических и магнитных свойств веществ привело Фарадея не только к открытию *пара-* и *диамагнетизма*, но и к уста-

новлению фундаментальной идеи — *идеи поля*. Он в 1852 г. писал: «среда или пространство, его окружающие, играют столь же существенную роль, как и сам магнит, будучи частью настоящей и полной магнитной системы».

Поле — это то, что излучается, распространяется с конечной скоростью в пространстве, взаимодействует с веществом. Фарадей сформулировал идеи *поля как новой формы материи*, а записи вложил в запечатанный конверт, завещав вскрыть его после своей смерти (этот конверт был обнаружен только в 1938 г.). Фарадей показал, что электродвижущая сила индукции E возникает при изменении магнитного потока Φ (размыкании, замыкании, изменении тока в проводниках, приближении или удалении магнита и пр.). Максвелл выразил этот факт равенством: $E = -\partial\Phi/\partial t$. По Фарадею, способность индуцировать токи проявляется по окружности вокруг магнитной равнодействующей. Максвелл записывает это в векторной форме: $\text{rot } E = -\partial B/\partial t$.

То есть переменное магнитное поле окружено вихревым электрическим полем, а знак минус связан с *правилом Ленца*: возникает индукционный ток такого направления, чтобы препятствовать изменению, порождающему его. В 1846 г. Ф. Нейман нашел, что на создание индукционного тока надо затратить энергию, отсюда получается знак минус, и записал закон индукции: $V = -\partial A/\partial t$.

Максвелл математически обработал идеи Фарадея, связав в своих уравнениях все экспериментальные законы, полученные в области электрических и магнитных явлений. Закон Ампера имеет дело с магнитным полем вдоль замкнутого контура с током. Аналог закона Кулона в электростатике, закон Био–Савара выглядел в векторной форме так: $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + (\partial \mathbf{D}/\partial t)$. Суммируя токи и поля, чтобы показать, что магнитное поле создается не только током проводимости \mathbf{j} , но и «*током смещения*», Максвелл ввел в уравнения дополнительный член $(\partial \mathbf{D}/\partial t)$. Так, по аналогии с фарадеевой поляризацией диэлектрика, он ввел в свои уравнения *поляризацию пространства*, или вакуума. Введение поляризации вакуума вызвало неоднозначную реакцию со стороны ученых, до сих пор обсуждение этого вопроса не сходит со страниц научных журналов, вызывая дискуссии. Но Максвелла это не очень волновало, так как он представлял вакуум диэлектрической средой, а не сплошной пустотой.

Он писал: «Мы не в состоянии понимать распространение во времени иначе, как только двумя способами — или как полет материальной субстанции через пространство, или как распространение состояния движения или напряжения в среде, уже существующей в пространстве... Все теории приводят к концепции среды, в которой имеет место распространение. И если мы примем эту среду в качестве гипотезы, то я считаю, что она должна занимать выдающееся место в наших исследованиях и что нам следует попытаться сконструировать рациональное представление о всех деталях ее действия». В конце жизни Максвелл написал для Британской энциклопедии статью «Эфир», где были такие строки: «Несомненно, что межпланетное и межзвездное пространства не суть пространства пустые, но заняты материальной субстанцией или телом, самым обширным и, надо думать, самым однородным, какое только нам известно» (1879 г.).

Кроме уже сформулированных двух уравнений, отражающих закон индукции и закон Био–Савара, Максвелл записал в векторной форме закон о замкнутости магнитных силовых линий $\text{div } \mathbf{B} = 0$ и о структуре электрического поля $\text{div } \mathbf{D} = \rho$, а также группу уравнений для векторов электромагнитного поля, связанных с характеристиками среды, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, и тока проводимости $\mathbf{j} = \lambda(\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{стор}}$), где последняя величина есть сторонняя электродвижущая сила.

В целом система уравнений, записанная Максвеллом в векторной форме, имеет компактный вид:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + (\partial \mathbf{D}/\partial t); \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B}/\partial t); \quad (2)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho; \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}; \text{ div } \mathbf{B} = 0; \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (4)$$

Входящие в эти уравнения векторы электрической и магнитной индукции (\mathbf{D} и \mathbf{B}) и векторы напряженности электрического и магнитного полей (\mathbf{E} и \mathbf{H}) связаны

указанными простыми соотношениями с диэлектрической постоянной (ϵ) и магнитной проницаемостью среды (μ). (Обозначение *rot* от *rotor* — вихрь.) Использование этой операции означает, что вектор напряженности магнитного поля вращается вокруг вектора тока плотности \mathbf{j} .

Согласно уравнению (1) любой ток вызывает возникновение магнитного поля в окружающем пространстве, постоянный ток — постоянное магнитное поле. Такое поле не может вызвать в «следующих» областях электрическое поле, так как по уравнению (2) только *изменяющееся* магнитное поле порождает ток. Вокруг переменного тока создается и переменное магнитное поле, способное создать в «следующем» элементе пространства электрическое поле волны, волны незатухающей, — энергия магнитного поля в пустоте полностью переходит в энергию электрического, и наоборот. Так как свет распространяется в виде поперечных волн, можно сделать два вывода. «Свет — электромагнитное возмущение». Электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде поперечных волн со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, зависящей от свойств среды, и поэтому невозможно «мгновенное действие». Это предчувствовал Ломоносов, доказали Фарадей (конверт с его формулами найден в 1938 г.) и Максвелл. Итак, в световых волнах колебания совершают напряженности электрического и магнитного полей, а носителем волны служит само пространство, которое находится в состоянии напряжения. А оно за счет «тока смещения» создаст новое магнитное поле и т.д. до бесконечности.

Смысл уравнений (3) и (4) понятен — (3) описывает *электростатическую теорему Гаусса* и обобщает *закон Кулона*, а (4) отражает факт отсутствия магнитных зарядов. Дивергенция (лат. *divergere* «обнаруживать расхождение») есть мера источника. Если в стекле, например, не рождаются световые лучи, а только проходят сквозь него, $\text{div } \mathbf{D} = 0$. Солнце, как источник света и тепла, обладает положительной дивергенцией, а темнота — отрицательной. Поэтому силовые линии электрического поля кончаются на зарядах, плотность которых ρ , а магнитного — замкнуты сами на себя и нигде не кончаются.

Система взглядов, которая легла в основу уравнений Максвелла, получила название «*максвелловской теории электромагнитного поля*». Хотя эти уравнения имеют простой вид, но чем больше Максвелл и его последователи работали над ними, тем более глубокий смысл открывался им. Генрих Герц, опыты которого явились первым прямым доказательством верности теории электромагнитного поля Фарадея–Максвелла, писал о неисчерпаемости уравнений Максвелла: «Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, будто математические формулы живут собственной жизнью, обладают собственным разумом — кажется, что эти формулы умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время было в них заложено».

Среди постоянных, входящих в уравнения, была константа c ; Максвелл нашел, что ее значение равнялось точно значению скорости света. На это совпадение нельзя было не обратить это внимания. Процесс распространения поля будет продолжаться до бесконечности в виде незатухающей волны — энергия магнитного поля в пустоте

полностью переходит в энергию электрического, и наоборот. Но так как свет распространяется в виде поперечных волн, можно сделать вывод: «Свет — электромагнитное возмущение». Электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде поперечных волн со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Скорость распространения волн зависит от свойств среды, поэтому невозможно «мгновенное дальнего действия». Это предчувствовал Ломоносов, это доказали Фарадей и Максвелл. Итак, в световых волнах колебания совершают напряженности электрического и магнитного полей, а носителем волны служит само пространство, которое находится в состоянии напряжения.

Световая волна — это волна электромагнитная, «бегущая в пространстве и отделенная от испустивших ее зарядов», как выразился Вайскопф. «Открытие Максвелла можно сравнить по важности с открытием закона тяготения Ньютона. Ньютон связал движение планет с тяготением на Земле и открыл фундаментальные законы, управляющие механическим движением масс под действием сил. Максвелл связал оптику с электричеством и открыл фундаментальные законы (уравнения Максвелла), управляющие поведением электрических и магнитных полей и их взаимодействием с зарядами и магнитами. Труды Ньютона привели к введению понятия всеобщего закона тяготения, труды Максвелла — к введению понятия электромагнитного поля и к установлению законов его распространения».

Если электромагнитное поле может существовать независимо от материального носителя, то *дальнодействие* должно уступить место *близкодействию*, полям, распространяющимся в пространстве с конечной скоростью. Идеи тока смещения (1861 г.), электромагнитных волн и электромагнитной природы света (1865 г.) были настолько смелыми и необычными, что даже следующее поколение физиков не сразу приняло теорию Максвелла. В 1888 г. Генрих Герц открыл *электромагнитные волны*, но такого активного противника теории Максвелла, как У.Томсон (Кельвин), смогли убедить лишь эксперименты П.Н.Лебедева, открывшего в 1889 г. существование *светового давления*.

Плотность потока энергии в волне, распределенной в некоторой области пространства и колеблющейся во времени, — это количество электромагнитной энергии, проходящей через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения, в единицу времени. Плотность потока энергии обозначают буквой S . Для плоской волны $E = B$ энергия делится поровну между электрической и магнитной компонентами, поэтому удобно записать: $S = E^2 = B^2$.

7.4. ТИПЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ФИЗИКЕ

Естествознание не только выделяет типы материальных объектов во Вселенной, но и раскрывает связи между ними. Связь между объектами в целостной системе более упорядочена, более устойчива, чем связь каждого из элементов с элементами из внешней среды. Чтобы разрушить систему, выделить из системы тот или иной элемент, нужно приложить к ней определенную энергию. Эта энергия имеет разную величину и зависит от типа взаимодействия между элементами системы. В мегамире эти взаимодействия обеспечиваются гравитацией, в макромире к гравитации

Электромагнитное излучение Солнца переносит на Землю его энергию, снабжая нас теплом и светом. Учение о движении энергии было разработано русским физиком Н.А.Умовым. Он показал, что изменение энергии внутри объема определяется ее потоком через поверхность. Через 11 лет после публикации Умова английский физик лорд Дж.Рэлей представил Королевскому обществу сообщение Дж.Пойтинга «О переносе энергии в электромагнитном поле», где содержались независимо полученные аналогичные результаты. Поэтому ныне вектор $\mathbf{S} = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{H})$ называют *вектором Умова-Пойтинга*.

Импульс электромагнитной волны можно записать аналогично: из формулы $E = mc^2$ следует получить значение эквивалентной массы и, зная скорость распространения волны c , посчитать импульс, т.е. $P = mc = E/c$. Мы не замечаем давления света, обусловленного наличием импульса у световой волны, ни от светящейся лампочки, ни от Солнца, так как огромное значение скорости света c , стоящее в знаменателе последней формулы. В теории Максвелла энергия распределена в пространстве с объемной плотностью, записанной выше, и электромагнитная волна несет энергию. И он утверждал, что, падая на поглощающую поверхность, волна, должна производить давление, равное объемной плотности энергии.

В середине XIX в. Максвелл объединил электричество и магнетизм в единой теории поля. Электрический заряд связан с элементарными частицами, из которых самые известные — электрон и протон — имеют одинаковый по величине заряд e , это универсальная постоянная природы. В системе СИ он равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Хотя магнитных зарядов пока не обнаружено, в теории они уже возникают. По мнению известного физика Дирака, величина магнитного заряда должна быть кратной заряду электрона e .

Дальнейшие исследования в области электромагнитного поля привели к установлению противоречия с представлениями классической механики, эти противоречия пытался устранить путем математического согласования теорий голландский физик Х.А.Лоренц. Он ввел преобразования координат инерциальных систем, которые в отличие от классических преобразований Галилея содержали константу — скорость света, которая и осуществляла связь с теорией поля. Изменились масштабы времен и длин при скоростях, близких к скорости света. Физический смысл этих преобразований Лоренца был вскрыт только А.Эйнштейном в 1905 г. в его работе «К электродинамике движущихся тел», составившей основу специальной теории относительности (СТО) или релятивистской механики.

добавляется электромагнитное взаимодействие, и оно становится основным, как более сильное. В микромире на размерах атома включается еще более сильное, так и называемое сильное ядерное взаимодействие, обеспечивающее целостность атомных ядер. При переходе к элементарным частицам энергия внутренних связей становится сравнимой с собственной энергией частиц — слабое ядерное взаимодействие обеспечивает целостность частиц. Так что чем меньше размеры материальных систем, тем более прочно связаны между собой элементы.

История науки знает множество попыток представить сложные процессы во Вселенной в виде определенных схем. Успешное познание окружающего мира и приведение наблюдаемых явлений к простейшим понятиям возможны лишь в том случае, если бы мы сумели описать Мир в терминах ограниченного числа фундаментальных частиц и нескольких типов фундаментальных взаимодействий, в которые они могут вступать. Сейчас мы знаем, что природные вещества — это химические соединения элементов, построенных из атомов и собранных в Периодическую таблицу. Некоторое время считали, что атомы и есть элементарные кирпичики мироздания, но потом установили, что атом представляет собой «целую Вселенную» и состоит из взаимодействующих друг с другом еще более фундаментальных частиц: протонов, электронов, нейтронов, мезонов и т.д. Число частиц, претендующих на элементарность, увеличивается, но так ли уж они элементарны?

Механика Ньютона была признана, но происхождение сил, которые вызывают ускорения, в ней не обсуждалось. Силы гравитации действуют через пустоту, они далекодействующие, тогда как силы электромагнитные — через среду. В настоящее время все взаимодействия в природе сводят к четырем типам: *гравитационные, электромагнитные, сильные ядерные и слабые ядерные.*

Гравитация — исторически первое исследованное взаимодействие. Вслед за Аристотелем считали, что все тела стремятся к «своему месту» (тяжелые — вниз, к Земле, легкие — вверх). Физике XVII–XVIII вв. были известны только гравитационные взаимодействия. По Ньютону, две точечные массы притягивают друг друга с силой, направленной вдоль соединяющей их прямой: $F_{\text{гп}} = -G m_1 \cdot m_2 / r^2$. Знак минус указывает, что мы имеем дело с притяжением, r — расстояние между телами (считается, что размер тел много меньше r), m_1 и m_2 — массы тел. Величина G — универсальная постоянная, определяющая величину гравитационных сил. Если тела массами в 1 кг находятся на расстоянии 1 м друг от друга, то сила притяжения между ними равна $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н. Гравитация универсальна, все тела подвержены ей, и даже сама частица — источник гравитации. Если бы величина G была больше, то увеличилась бы и сила, но G очень мала, и гравитационное взаимодействие в мире субатомных частиц несущественно, а между макроскопическими телами еле заметно. Кэвендиш сумел измерить величину G , пользуясь крутильными весами. Универсальность постоянной G означает, что в любом месте Вселенной и в любой момент времени сила притяжения между массами в 1 кг, разделенными расстоянием в 1 м, будет иметь то же значение. Поэтому можно говорить, что G определяет структуру гравитирующих систем. *Гравитация* (лат. *gravitas* «тяжесть»), или тяготение, не очень существенна при взаимодействии между малыми частицами, но она удерживает планеты, всю Солнечную систему и галактики. Мы постоянно ощущаем гравитацию в нашей жизни. Закон утвердил *дальнодействующую природу силы тяготения* и основное свойство гравитационного взаимодействия — его *универсальность*.

Теория тяготения Эйнштейна (ОТО) дает отличающиеся результаты в сильных гравитационных полях, в

слабых — обе теории совпадают. Согласно ОТО, *гравитация — это проявление искривления пространства-времени*. Тела движутся по искривленным траекториям не потому, что на них действует гравитация, а потому, что они движутся в искривленном пространстве-времени. Двигутся «кратчайшим путем, и тяготение — это геометрия». Влияние искривления пространства-времени можно обнаружить не только вблизи коллапсирующих объектов типа нейтронных звезд или черных дыр. Таковы, например, прецессия орбиты Меркурия или замедление времени на поверхности Земли (см. рис.5). Эйнштейн показал, что гравитацию можно описывать как эквивалент ускоренного движения.

Чтобы избежать сжатия Вселенной под влиянием самогравитации и обеспечить ее стационарность, он ввел возможный источник гравитации с необычными свойствами, ведущий к «расталкиванию» материи, а не к концентрации ее, а *сила отталкивания* $F_{\text{косм}}$ возрастает с расстоянием. Но эти свойства могут проявляться только в очень больших масштабах Вселенной. Сила отталкивания неимоверно мала и не зависит от отталкивающей массы; ее представляют в виде $F_{\text{косм}} = L \cdot r \cdot m \cdot c^2$, где m — масса отталкиваемого объекта, r — его расстояние от отталкивающего тела, c — скорость света. Сейчас устанавливают верхний предел для $L = 10^{-53}$ м², т.е. для двух тел массами по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м, сила притяжения превышает космическое отталкивание, по крайней мере, в 10^{25} раз. Если две галактики с массами 10^{41} кг находятся на расстоянии 10 млн св. лет (около 10^{22} м), то для них силы притяжения примерно уравновешивались бы силами отталкивания. Поэтому эта величина не измерена до сих пор, хотя и важна для *крупномасштабной структуры Вселенной как фундаментальная*.

Электромагнитное взаимодействие, обусловленное электрическими и магнитными зарядами, переносится фотонами. Силы взаимодействия между зарядами сложным образом зависят от положения и движения зарядов. Если два заряда e_1 и e_2 неподвижны и сосредоточены в точках на расстоянии r , то взаимодействие между ними электрическое и определяется законом Кулона: $F_{\text{эл.}} = e_1 \cdot e_2 / (4\pi\epsilon_0 \cdot r^2)$. В зависимости от знаков зарядов e_1 и e_2 сила электрического взаимодействия, направленная вдоль прямой, соединяющей заряды, будет силой притяжения или отталкивания. Здесь через ϵ обозначена постоянная, определяющая интенсивность электростатического взаимодействия, ее значение $8,85 \cdot 10^{12}$ Ф/м. Так, два заряда по 1 Кл, разнесенные на 1 м, будут испытывать силу $8,99 \cdot 10^9$ Н. Электрический заряд всегда связан с элементарными частицами. Численная величина заряда наиболее известных среди них — протона и электрона — одинакова: это универсальная постоянная, равная $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд протона считается положительным (e), электрона — отрицательным.

Магнитные силы порождаются электрическими токами — движением электрических зарядов. Существуют попытки объединения теорий с учетом симметрий, в которых предсказывается существование магнитных зарядов (магнитных монополей), но они пока не обнаружены. Поэтому величина e определяет и интенсивность магнитного взаимодействия. Если электрические заряды

движутся с ускорением, то они излучают — отдают энергию в виде света, радиоволн или рентгеновских лучей в зависимости от диапазона частот. Почти все носители информации, воспринимаемые нашими органами чувств, имеют электромагнитную природу, хотя и проявляются подчас в сложных формах. Электромагнитные взаимодействия определяют структуру и поведение атомов, удерживают атомы от распада, отвечают за связи между молекулами, т.е. за химические и биологические явления. Гравитация и электромагнетизм — *дальнодействующие силы*, распространяющиеся на всю Вселенную.

Сильные и слабые ядерные взаимодействия — короткодействующие и проявляются только в пределах размеров атомного ядра, т.е. в областях порядка 10^{-14} м.

Слабые ядерные взаимодействия ответственны за многие процессы, обуславливающие некоторые виды ядерных распадов элементарных частиц (например, β -распад — превращение нейтронов в протоны) с радиусом действия почти точечным: около 10^{-18} м. Оно сильнее сказывается на превращениях частиц, чем на их движении, поэтому его эффективность определяют постоянной, связанной со скоростью распада, — универсальной постоянной связи $g(W)$, определяющей скорость протекания процессов типа распада нейтрона. Слабое ядерное взаимодействие осуществляют так называемые слабые бозоны, и одни субатомные частицы могут превращаться в другие. Оно самое слабое из известных, кроме гравитации. Открытие нестабильных субъядерных частиц обнаружило, что слабое взаимодействие вызывает множество превращений. Сверхновые звезды — один из немногих случаев наблюдаемого слабого взаимодействия.

Сильное ядерное взаимодействие препятствует распаду атомных ядер, и не будь его, ядра распались бы из-за сил электрического отталкивания протонов. В ряде случаев для его характеристики вводят величину $g(S)$, аналогичную электрическому заряду, но много большую. Сильное взаимодействие, осуществляемое глюонами, резко спадает до нуля за пределами области радиусом около 10^{-15} м. Оно связывает между собой кварки, входящие в состав протонов, нейтронов и других подобных частиц, именуемых сейчас адронами. Говорят, что взаимодействие протонов и нейтронов есть отражение их внутренних взаимодействий, но пока картина этих глубинных явлений скрыта от нас. С ним

связаны энергия, выделяемая Солнцем и звездами, превращения в ядерных реакторах и освобождение энергии.

Перечисленные типы взаимодействий имеют, видимо, разную природу. К настоящему времени не ясно, исчерпываются ли ими все взаимодействия в природе. Самое сильное — короткодействующее сильное взаимодействие, электромагнитное слабее его на 2 порядка, слабое — на 14 порядков, а гравитационное — меньше сильного на 39 порядков. В соответствии с величиной сил взаимодействия они происходят за разное время. Сильные ядерные взаимодействия происходят при столкновении частиц с околосветовыми скоростями, и время реакций, определяемое делением радиуса действия сил на скорость света, дает величину порядка 10^{-23} с. Процессы слабого взаимодействия происходят за 10^{-9} с. Характерные времена для гравитационного взаимодействия порядка 10^{16} с, или 300 млн лет.

«Закон обратных квадратов», по которому действуют друг на друга точечные гравитационные массы или электрические заряды, следует из трехмерности пространства, как показал П.Эренфест (1917 г.). В пространстве n измерений точечные частицы взаимодействовали бы по закону обратной степени $(n - 1)$. Для $n = 3$ справедлив закон обратных квадратов, так как $3 - 1 = 2$. А при $n = 4$, что соответствует закону обратных кубов, планеты двигались бы по спиральям и быстро бы упали на Солнце. В атомах при числе измерений, больше трех, также не существовало бы устойчивых орбит, т.е. не было бы химических процессов и жизни. На связь трехмерности пространства с законом тяготения указывал еще и Кант.

Кроме того, можно показать, что распространение волн «в чистом виде» невозможно в пространстве с четным числом измерений — появляются искажения, нарушающие переносимую волной структуру (информацию). Пример тому — распространение волны по резиновому покрытию (по поверхности размерности 2). В 1955 г. математик Г.Дж. Уитроу заключил, что поскольку живым организмам необходимы передача и обработка информации, то высшие формы жизни не могут существовать в пространствах четной размерности. Этот вывод относится к известным нам формам жизни и законам природы и не исключает существование иных миров, иной природы.

7.5. ПОПЫТКИ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРИИ ВСЕГО СУЩЕГО

Ученые стремились найти единообразное объяснение окружающего мира и построить для этого единую теорию. В качестве универсальной физической теории после Ньютона считали механику. В XIX в. это место заняла *механистическая картина мира*, включающая механику, термодинамику и кинетическую теорию материи, упругую теорию света и электромагнетизм. Открытие электрона стимулировало создание новой теории. В конце века Х.Лоренц построил свою электронную теорию, но проблемы, связанные с дискретностью заряда и непрерывностью поля, и проблемы в теории излучения («ультрафиолетовая катастрофа») привели к созданию *квантово-полевой картины мира* и квантовой механики. После создания СТО ожидалось, что охватить мир природы способна *электро-*

магнитная картина мира, соединявшая теорию относительности, теорию Максвелла и механику, но и эта иллюзия вскоре была развеяна. Многие теоретики пытались *единицами уравнениями охватить гравитацию и электромагнетизм*. Под влиянием обаяния Эйнштейна, который ввел *четырёхмерное пространство-время*, строились многомерные теории поля в попытках свести явления к геометрическим свойствам пространства.

Объединение осуществилось на основе установленной независимости скорости света для разных наблюдателей, движущихся в пустом пространстве при отсутствии внешних сил. Эйнштейн изобразил *мировую линию* объекта на плоскости, где пространственная ось направлена горизонтально, а временная — вертикально. Тогда вертикальная

прямая — это *мировая линия* объекта, который покоится в данной системе отсчета, а наклонная — движущегося с постоянной скоростью. Кривая мировая линия соответствует движению объекта с ускорением. Любая точка на этой плоскости отвечает положению в данном месте в данное время и называется *событием*. Гравитация при этом уже не была силой, действующей на пассивном фоне пространства и времени, а представляла собой искажение самого пространства-времени. Ведь гравитационное поле — это «кривизна» пространства-времени.

Для установления связи между системами отсчета, движущимися относительно друг друга, нужно измерять пространственные интервалы в тех же единицах, что и временные. Множителем для такого пересчета может служить *скорость света*, связывающая расстояние с временем, за которое свет может это расстояние преодолеть. В такой системе 1 м равен 3,33 нс ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$). Тогда мировая линия фотона пройдет под углом 45° , а любого материального объекта — под меньшим углом (так как скорость у него всегда меньше скорости света). Поскольку пространственная ось на плоскости соответствует трем пространственным осям, то мировые линии материальных тел будут находиться внутри конуса, описываемого мировой линией фотона. Результаты наблюдений солнечного затмения 1919 г. принесли всемирную славу Эйнштейну. Смещения звезд, которые можно увидеть в окрестности Солнца только во время затмения, совпали с предсказаниями теории тяготения Эйнштейна. Так что его геометрический подход к построению теории тяготения был подтвержден впечатляющими экспериментами.

В том же, 1919 г., когда появилась ОТО, приват-доцент Кенигсбергского университета Т. Калуца отправил Эйнштейну свою работу, где предлагал *пятое измерение*. Пытаясь найти первооснову всех взаимодействий (тогда было известно два — тяготение и электромагнетизм), Калуца показал, что они могут быть выведены единообразно в пятимерной ОТО. Для успеха объединения не имели значения размеры пятого измерения и, может быть, они столь малы, что их не удастся обнаружить. Только после двухгодичной переписки с Эйнштейном статью опубликовали. Шведский физик О.Клейн предложил модификацию основного уравнения квантовой механики с пятью переменными вместо четырех (1926 г.). Неощущаемые нами измерения пространства он «свернул» до очень малых размеров (приведа пример небрежно брошенного поливального шланга, который издали кажется извилистой линией, а вблизи каждая его точка оказывается окружностью). Эти своеобразные петельки он оценил по размеру в 10^{20} раз меньше размера атомного ядра. Поэтому пятое измерение и не наблюдаемо, но возможно.

В развитие пятимерной теории внесли свой вклад советские ученые Г.А.Мандель и В.А.Фок. Они показали, что траектория заряженной частицы в пятимерном пространстве может быть строго описана как *геодезическая линия* (греч. *geodaisia* «землеразделение»), или кратчайший путь между двумя точками на поверхности, т.е. пятое измерение может быть физически реальным. Оно не обнаружено из-за *соотношения неопределенности* Гейзенберга, которое каждую частицу представляет в виде волнового

пакета, занимающего в пространстве область, размер которой зависит от энергии частицы (чем больше энергия, тем меньше объем области). Если пятое измерение свернуто в малую окружность, то для ее обнаружения должна быть велика энергия освещающих ее частиц. Ускорители дают пучки частиц, обеспечивающие разрешающую способность 10^{-18} м. Поэтому, если окружность в пятом измерении имеет меньшие размеры, ее пока нельзя обнаружить.

Как представить себе пятимерное пространство? Представим линию бесконечной длины, с каждой точкой которой связана окружность, нечто вроде бесконечного цилиндра. Одномерная линия и одномерная окружность порождают двухмерный цилиндр. Четырехмерную конструкцию можно представить из двухмерной плоскости и двухмерной сферы. Далее, пятимерное пространство порождено окружностью и обычным четырехмерным пространством, т.е. объединением сферы и пространства-времени. Длина окружности в пятом измерении, приводящая к образованию частиц в теории Калуцы, очень мала: около 10^{-32} м! Но работы по многомерным теориям и реальности выводов из них продолжались. Так, советский профессор Ю.Б.Румер (свою научную деятельность он начал еще у М.Борна во время создания квантовой механики, общался со всеми великими физиками нашего века, в том числе с Эйнштейном, последние 30 лет работал в Новосибирске) в своей пятимерной теории показал, что пятому измерению можно придать смысл *действия*. Тут же появились попытки представить наглядно это пятимерное пространство, как ранее пытались представить четырехмерное пространство-время, введенное Эйнштейном. Одна из таких попыток — гипотеза о существовании «параллельных» миров. Четырехмерное изображение мяча представить было несложно: это совокупность его изображений в каждой временной точке — «труба» из мячей, которая тянется из прошлого в будущее. А пятимерный мяч — это уже поле, плоскость из абсолютно одинаковых миров. Во всех мирах, имеющих от трех до пяти измерений, даже одна причина, хотя бы случайная, может породить несколько следствий.

Шестимерная Вселенная, построенная выдающимся советским авиаконструктором Л.Р.Бартини, включает три пространственных измерения и три — временных. У него длина времени — длительность, ширина — количество вариантов, высота — скорость времени в каждом из возможных миров.

Теория квантовой гравитации должна была соединить ОТО и квантовую механику. Эйнштейн считал, что «процесс углубления теории не имеет границ», но большинство его современников считало этот поиск единой теории результатом его квазирелигиозных склонностей. Во Вселенной, подчиненной законам квантовой гравитации, кривизна пространства-времени и его структура должны флуктуировать, квантовый мир никогда не находится в покое. И понятия прошлого и будущего, последовательность событий в таком мире тоже должны быть иными. Возможно, эти изменения существуют, но пока не обнаружены, так как квантовые эффекты проявляются в исключительно малых масштабах.

В 50-е годы Р.Фейнман, Ю.Швингер и С.Томогава (Нобелевская премия по физике, 1965 г.) независимо друг от друга создали квантовую электродинамику, связав квантовую механику с релятивистскими представлениями и объяснив многие эффекты, полученные при исследовании атомов и их излучений. Затем была разработана теория слабых взаимодействий и показано, что электромагнетизм можно объединить математически только со слабым взаимодействием. Пакистанский физик-теоретик Салам, один из авторов теории слабого взаимодействия, писал: «Секрет достижения Эйнштейна состоит в том, что он осознал фундаментальное значение заряда в гравитационном взаимодействии. И пока мы не поймем природу зарядов в электромагнитных, слабых и сильных взаимодействиях так же глубоко, как это сделал Эйнштейн для тяготения, надежды на успех в окончательной унификации мало... Мы хотели бы не только продолжить попытки Эйнштейна, в которых ему не удалось преуспеть, но и включить в эту программу остальные заряды». Возродился интерес к многомерным теориям, и вновь стали обращаться к работам Эйнштейна, Бергмана, Калуцы, Румера, Йордана. В работах советских физиков (Л.Д.Ландау, И.Я.Померанчук, Е.С.Фрадкин) выяснилось, что при расстояниях 10^{-33} см в квантовой электродинамике появляются неустраиваемые противоречия (расходимости, аномалии, все заряды обращаются в нуль). Многие ученые работали над идеями создания единой теории, среди них выделяются С.Вайнберг, А.Салам и Ш.Глэшоу, лауреаты Нобелевской премии по физике 1979 г. Они показали, что электромагнетизм и слабое ядерное взаимодействие можно считать проявлением некоей «электрослабой» силы и что истинные носители сильного взаимодействия — кварки. Созданная теория — квантовая хромодинамика — построила протоны и нейтроны из кварков и сформировала стандартную модель элементарных частиц.

Еще Планк отметил фундаментальную роль величин, составленных из трех констант, определяющих основные теории — СТО (скорости света c), квантовую механику (постоянной Планка \hbar) и теорию тяготения Ньютона (гравитационной постоянной G). Из их комбинации можно получить три величины (*планковские*) с размерностями массы, времени и длины. Планковская длина, например, $\approx 10^{-33}$ см, т.е. совпадает с критическим расстоянием, на котором теряет смысл квантовая электродинамика. Но, как указывалось выше, сейчас определена геометрия лишь на расстояниях 10^{-16} см, которые больше планковских на 17 порядков величины! Но объединение взаимодействий нужно для устранения в теории расходимостей и аномалий — проблему составляло определение частиц как точек и искажение ими пространства-времени. И его стали искать с помощью идей более высоких симметрий. Эти идеи получили «второе дыхание» в 80-х в теориях *Великого объединения* (ТВО) и *супергравитации*. ТВО — это теория, позволяющая объединить все взаимодействия, кроме гравитационного. Если удастся объединить с ней и гравитационное взаимодействие, то получится Теория Всего (ТВС). Тогда мир будет описываться единообразно. Поиск такой «*суперсилы*» продолжается.

Теории супергравитации используют многомерные построения, свойственные геометрическому подходу при построении ОТО. Можно построить мир из разного числа измерений (используют 11- и 26-мерные модели), но 11 наиболее интересно и красиво с математической точки зрения: 7 — минимальное число скрытых измерений пространства-времени, которые допускают включение в теорию трех негравитационных сил, а 4 — обычные измерения пространства-времени. Четыре известных взаимодействия рассматривают как геометрические конструкции, имеющие более пяти измерений.

Теория суперструн разрабатывается с середины 80-х наряду с супергравитацией. Эту теорию начали развивать английский ученый М.Грин и американский ученый Дж.Шварц. Они сопоставили частицам вместо точки одномерную струну, помещенную в многомерное пространство. Эта теория, заменив точечные частицы крошечными энергетическими петлями, устранила абсурдность, возникающие при расчетах. *Космические струны* — это экзотические невидимые образования, порожденные теорией элементарных частиц. В этой теории отражена иерархичность понимания мира — возможность того, что не существует окончательного основания для физической реальности, а есть только последовательность все меньших и меньших частиц. Существуют и очень массивные частицы, и около тысячи частиц без массы. У каждой струны, имеющей планковский размер (10^{-33} см), при этом может быть бесконечно много типов (или мод) колебаний. Как вибрация струн скрипки порождает различные звуки, так и вибрация этих струн может генерировать все силы и частицы. Суперструны позволяют понять киральность (греч. *cheir* «рука»), тогда как супергравитация не может объяснить разницы между левым и правым — в ней поровну частиц каждой направленности. Теория суперструн, как и супергравитация, связана не с опытом, а с более характерным для математики устранением аномалий и расходимостей.

Американский физик Э.Виттен заключил, что теория суперструн — основная надежда на будущее физики, она не только учитывает возможность силы тяжести, она утверждает ее существование, и тяжесть — есть следствие теории суперструн. Его технология, заимствованная из топологии и теории квантового поля, позволяет открывать глубокие симметрии между запутанными узлами высокой мерности. Была зафиксирована размерность, соответствующая относительно непротиворечивой теории, она равна 506. (За 1981–1990 гг. Виттен опубликовал 96 статей по теории суперструн, и они цитировались 12105 раз другими физиками — пока недостижимый рекорд цитируемости.)

С помощью теории суперструн можно объяснить «кловчатость» распределения вещества во Вселенной. Суперструны — это нити, оставшиеся от вещества только что родившейся Вселенной. Они невероятно подвижны и плотны, искривляют пространство вокруг себя, образуют клубки и петли, причем массивные петли могли бы создавать гравитационное притяжение, достаточно сильное, чтобы зарождались элементарные частицы, галактики и скопления галактик. К 1986 г. опубликовано много работ по космическим струнам, хотя сами они до сих пор не обнаружены. Найти суперструны считают возможным по ис-

кривлению пространства, которое они вызывают, действуя как гравитационная линза, или по испускаемым ими гравитационным волнам. Эволюцию суперструн разыгрывают на компьютерах, и на экране дисплея возникают картины, соответствующие наблюдаемым в космосе, — там тоже образуются *волокна, слои и гигантские пустоты*, в которых практически нет галактик.

Это необычайное сближение космологии и физики элементарных частиц в последние 30 лет дало возможность разобраться в сути процессов рождения пространства-времени и вещества в коротком интервале от 10^{-43} до 10^{-35} с после *первичной сингулярности*, называемой *Большим Взрывом*. Число размерностей 10 (супергравитация) или 506 (теория суперструн) — не окончательно, могут появиться и более сложные геометрические образы, но непосредственно обнаружению множество дополнительных размерностей недоступно. Истинная геометрия Вселенной, вероятно, не имеет трех пространственных измерений, что характерно лишь для нашей Метагалактики — наблюдаемой части Вселенной. И все они, кроме трех, в момент Большого Взрыва (10–15 млрд лет назад) свернулись до планковских размеров. На больших расстояниях (до размеров Метагалактики 10^{28} см) геометрия евклидова и трехмерна, а на планковских — неевклидова и многомерна. Считают, что разрабатываемые сейчас *Теории Всего Сущего* (ТВС) должны объединить описания всех фундаментальных взаимодействий между частицами.

Совпадение предмета исследований изменило сложившуюся методологию наук. Астрономия считалась наблюдательной наукой, а ускорители — инструментом в физике элементарных частиц. Теперь стали строить предположения о свойствах частиц и их взаимодействиях в космологии, и проверить их стало возможным уже для нынешнего поколения ученых. Так, из космологии следует, что число фундаментальных частиц должно быть невелико. Это предсказание относилось к анализу процессов первичного синтеза нуклонов, когда возраст Вселенной составлял около 1 с, и сделано было в то время, когда казалось, что достижение больших мощностей на ускорителях приводит к увеличению числа элементарных частиц. Если бы частиц было много, Вселенная была бы сейчас иной.

Проверить теорию элементарных частиц должен был сверхпроводимый суперколлайдер диаметром в 75 км. Его хотели было построить в США (даже потратили 2 млрд долларов и прорыли в Техасе тоннель длиной 22 км), но Конгресс США отменил эти работы. Струны столь же малы по сравнению с протоном, как и протон по сравнению с размерами Солнечной системы. Для проверки теории суперструн нужно устройство, составляющее 1000 св. лет в окружности, и дальнейшее продвижение в проверке «ТВС» заморожено. Узвимость теории суперструн в том, что пока она опирается лишь на эстетические суждения. С.Вайнберг в книге «Мечты об окончательной теории» (1993 г.) признал, что физикам, вероятно, придется полагаться на математическую ясность и последовательность как направляющие. Да и вряд ли эта теория будет иметь практическую ценность; она устранил парадоксы квантовой механики, но физики не смогут доказать, что эта теория является окончательной, как доказывают теоремы математики; для них

достаточно, что она работает, что дает результаты, подтверждаемые экспериментом.

Знакомясь с явлениями в простых системах и сопровождающими их взаимодействиями, будем искать и выделять общие правила, которым они подчиняются, выяснять их область приложения и пытаться применять их к более сложным системам. И огромная и сложная Вселенная предстанет в виде совокупности небольшого числа элементарных частиц, которые могут взаимодействовать только четырьмя способами и подчиняться небольшому числу фундаментальных законов. Однако при движении по пути познания мира все больше возникает вопросов и все труднее на них отвечать. Так, в неживой природе постоянно открывают все новые и новые субатомные частицы, и многие детали их поведения пока остаются неясными. Даже у кварков появляются не известные до сих пор качества. Где предел дробления материи и существует ли он? Что представляет из себя *физический вакуум*? Что есть частица и каково соотношение между реальными и виртуальными состояниями, когда частица начинает проявлять свойства волны, и можно ли уловить этот момент современными приборами? В физике большого и малого оказалось много удивительных совпадений, которые не могут быть поняты как чистые случайности или чистые закономерности. Можно проследить взаимные превращения порядка в хаос, рождение законов и упорядоченность хаоса, но возможно ли управление этими процессами?

Мы плохо представляем себе даже состав и строение внутренних областей Земли, хотя получены разнообразные сведения о составе, строении, движениях и жизненных циклах звезд и других небесных объектов. Человечество вышло за пределы атмосферы, на разных планетах побывали космические станции и лаборатории, на Землю доставлены обильная информация и образцы грунта других планет. Но мы не можем уверенно определить наличие жизни вне Земли, ничего не знаем о происхождении и границах Вселенной. Почему мир именно таков и каково будущее нашей планеты и нашей солнечной системы? В живой природе, как в целом, так и в отдельных организмах, круг неясного еще более широк. Нам известно многое об общих функциях различных органов и тканей, об их взаимодействии, но попытки описать функции этих органов через процессы в клетках далеки от желаемого завершения и понимания. Огромное внимание привлечено к проблеме изучения деятельности отдельной живой клетки и функций, выполняемых колоссальным количеством химических соединений, составляющих клетку, в которые входят более 10^{14} атомов. При целостном объяснении многих закономерностей в разных областях знания на первый план выходят проблемы симметрии неживой природы и асимметрии живой.

Возможно, при огромных значениях энергии все взаимодействия удадутся и получится Теория Всего Сущего (ТВС). Тогда мир будет описываться единообразно. Но что такое красивое и элегантное описание скажет о явлениях, придающих смысл нашей жизни? И может ли когда-нибудь такая теория быть подтверждена экспериментами, которые становятся невообразимо дорогими?!

Глава 8. ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МАКРОМИРА

8.1. СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ

Иерархическое строение материи (структурная организация материи) — любой объект от микрочастиц до организмов, планет и галактик является частью более сложного образования и, с другой стороны, сам может считаться таковым, т.е. состоящим из неких составных частей. Доступная для наблюдения часть мира простирается в пространстве от 10^{-15} до 10^{28} см, а во времени — до $2 \cdot 10^{10}$ лет. Современное научное знание основано на *структурности материи и системном подходе*.

Молекула — наименьшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства. Молекулы состоят из атомов, соединенных химическими связями. Молекула инертных газов — это просто атомы. Молекулы других газов состоят из двух или более атомов. Молекулы, состоящие из многих повторяющихся групп атомов, называют *макромолекулами*. Было установлено, что свойства веществ определяются не только составом молекул, но и их структурой. Удалось выделить в молекуле структурные блоки, состоящие из групп атомов или из отдельных атомов, каждый из которых обладает своей уникальной реакционной способностью. Теория химического строения молекул была создана А.М.Бутлеровым. Позже она была подтверждена квантовой механикой. Под *молекулярной структурой* понимается сочетание атомов, которые имеют закономерное расположение в пространстве и связаны между собой химической связью с помощью валентных электронов.

Атом — составная часть молекулы. Существование структуры атома было доказано открытием в 1897 г. Дж.Дж.Томсоном электрона, называемого атомом электричества. Заряд электрона Томсон определил уже в 1898 г., а через 5 лет предложил модель строения атома. В 1903 г. Э.Резерфорд нашел посредством опытов с отклонением альфа-лучей, что отношение заряда к массе по знаку и величине соответствует дважды ионизованным атомам гелия. Опыты показали, что в атомах существуют положительно заряженные частицы — ядра, в которых сосредоточена почти вся масса атома и которые имеют размеры 10^{-12} см, тогда как размеры самого атома порядка 10^{-8} см. Была предложена «планетарная» модель атома. Исследования многих ученых того времени показали, что место элемента в периодической системе, его атомный номер, определяется числом элементарных зарядов ядра атома. Периодичность же свойств элементов объяснила только квантовая механика.

Элементарные частицы были открыты постепенно вслед за электроном: протон, нейтрон и другие (сейчас их известно более трехсот) и соответствующие им античастицы. Для упорядочения этого обилия элементарных частиц их группируют по разным признакам — времени жизни, участию в разных типах фундаментальных взаимодействий и пр.

Кварковая модель строения элементарных частиц существует с 1964 г. (Г.Цвейг, М.Гелл-Ман). Сначала кварки рассматривались как гипотетические структурные эле-

менты с дробным электрическим зарядом, но они заняли в квантовой хромодинамике роль основных частиц. Открытие возможности превращений одних элементарных частиц в другие показывает, что они тоже имеют сложную внутреннюю структуру. Эту структуру описывают с помощью так называемых «виртуальных» частиц, так как эту внутреннюю структуру невозможно описать через другие частицы.

На микро-, макро- и мегамире подразделяют все уровни строения материи и все типы материальных систем. Понятие структуры охватывает весь мир. В нем относительны «сложное» и «простое». Атом — простой элемент молекулы, но сложный относительно составляющих его элементарных частиц.

Микромир — мир очень малых микрообъектов, размеры которых от 10^{-8} до 10^{-16} см, а время жизни может быть до 10^{-24} с. Испускание (и поглощение) света происходит порциями, *квантами*, получившими название *фотонов*. Это мир — от атомов до элементарных частиц. При этом для микромира свойственен корпускулярно-волновой дуализм, т.е. любой микрообъект обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Описание микромира опирается на принцип дополнительности Н.Бора и соотношение неопределенности Гейзенберга. Мир элементарных частиц, которые долго считали элементарными «кирпичиками», подчиняется законам квантовой механики, квантовой электродинамики, квантовой хромодинамики. Квантовое поле носит дискретный характер.

Макромир — это мир объектов, соизмеримых с человеческим опытом. Размеры макрообъектов измеряются от долей миллиметра до сотен километров, а времена — от секунд до лет. Поведение же макроскопических тел, состоящих из микрочастиц, описывается классической механикой и электродинамикой. Материя может пребывать как в виде вещества, так и в виде поля, причем вещество дискретно, а поле — непрерывно. Скорости распространения поля равны скорости света, максимальной из возможных скоростей, а скорости движения частиц вещества всегда много меньше скорости света.

Мегамир — мир объектов космического масштаба. Объекты мегамира — планеты, звезды, галактики, Метагалактика. Помимо перечисленных космических тел во Вселенной присутствует материя в виде излучения и диффузная материя. Последняя может занимать огромные пространства в виде гигантских облаков газа и пыли — газопылевых туманностей. В звездах сосредоточено 97% вещества в нашей галактике, называемой Млечный Путь или Галактика. В других галактиках распределение материи почти такое же. Почти все звезды образуют системы. Так, в Галактике почти все звезды являются двойными, а всего их более 120 млрд. Диаметр Галактики порядка 100 тыс. св. лет, наше Солнце — рядовая звезда типа желтый карлик находится на краю утолщенного диска, в 5 пк от края. Но много и звездных систем из 3–5 звезд, часто они окружены диффузной материей. Звездные скопления могут состоять

из нескольких сотен отдельных звезд, а шаровые скопления — из сотен тысяч. Галактики, наблюдаемые с Земли как туманные пятнышки, имеют разную форму: спиральную, неправильную, эллиптическую. Число их достигает 10 млрд. Галактики встречаются тоже в виде скоплений, которые состоят из нескольких тысяч отдельных систем. Упорядоченная система галактик получила название Метагалактики. Мегамир описывается законами классической механики с поправками, которые были внесены теорией относительности.

Многие теоретики пытались едиными уравнениями охватить гравитацию и электромагнетизм. Строились многомерные теории поля в попытках свести явления к геометрическим свойствам пространства. Гравитация при этом играла все большую роль. Она, по теории Эйнштейна, представляет собой искажение самого пространства-времени. Поскольку квантовый мир никогда не находится в покое, во Вселенной, подчиняющейся законам квантовой гравитации, кривизна пространства-времени и его структура должны флуктуировать. Поэтому понятия прошлого и будущего, последовательность происходящих событий в таком мире тоже должны быть иными. Возможно, эти изменения существуют, но пока не обнаружены, так как квантовые эффекты проявляются в исключительно малых масштабах. На эти малые масштабы впервые обратил внимание в самом начале XX столетия Макс Планк, который и ввел свою постоянную h (постоянная Планка). Теория квантовой гравитации должна была соединить теорию относительности и квантовую механику, и хотя такой

синтез пока осуществить не удалось, на этом пути было открыто много нового и интересного.

В последнюю четверть века необычайно сблизилась космология и физика элементарных частиц, и на пути этого сближения были получены новые результаты. Прежде всего это дало возможность понимания сущности процессов рождения пространства-времени и вещества в коротком интервале от 10^{-43} до 10^{-35} с после *первичной сингулярности*, называемой *Большим Взрывом*. Считают, что разрешение этой глобальной проблемы тесно связано с разрабатываемыми сейчас так называемыми *Теориями Всего Сущего* (ТВС), которые должны объединить описания всех фундаментальных взаимодействий между частицами. Такое совпадение предмета исследований изменило сложившуюся методологию наук. Традиционно астрономия считалась наблюдательной, не экспериментальной наукой, а ускорители были инструментом в физике элементарных частиц. Теперь в космологии стали строить предположения о свойствах частиц и их взаимодействиях, проверить которые стало возможным уже для нынешнего поколения ученых.

Например, из космологии следует, что число фундаментальных частиц должно быть невелико. Это предсказание относилось к анализу процессов первичного синтеза нуклонов, когда возраст Вселенной составлял около 1 с, и сделано было в то время, когда казалось, что достижение больших мощностей на ускорителях приводит к увеличению числа элементарных частиц. Но если бы частиц было много, Вселенная была бы сейчас иной.

8.2. МИКРО- И МАКРОПЕРЕМЕННЫЕ. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ

Идеал научной теории, сложившийся под влиянием успехов классической механики, состоял в отыскании наиболее общих, количественно формулируемых законов природы. В механике состояние системы однозначно определяется координатами и скоростями частиц. И зная их, можно вычислить любую другую механическую величину в данный момент времени: энергию, момент импульса и пр. Кроме того, зная действующие на систему силы, можно определить состояние системы в любой другой момент времени в прошлом или будущем. Эта удивительная однозначность и детерминизм и составляет *основу динамического описания*. В XIX в. еще считалось, что только динамические закономерности отражают принцип причинности в природе. Ныне уже никто не сомневается ни в реальности атомов, ни в том, что статистическая трактовка глубже термодинамической (фактически феноменологической). *Принципиально статистический характер законов микромира* изменил представление об идеале причинности, поскольку он основан на *вероятностном описании* явлений. В проблеме соотношения динамических и статистических закономерностей отражено в количественной форме соотношение необходимого и случайного, которое пронизывает все необходимые связи в природе. Она имеет большое значение для интерпретации квантовой механики.

Параллельно с развитием классической механики частиц и твердых тел шло развитие и *механики сплошных сред* (жидкостей, газов и деформируемых твердых тел).

Трудами Бернулли, Эйлера и др. были заложены основы гидродинамики идеальной жидкости. Ставшее классическим уравнение Эйлера описывает движение жидкостей и газов в случае, когда можно игнорировать вязкость и теплопроводность сред. Его можно вывести из законов Ньютона для системы материальных точек. Вместо набора координат и импульсов частиц Эйлер использовал для описания состояния системы некоторые функции, описывающие распределение различных физических величин в пространстве. Эти величины: плотность, давление и скорость — связаны уже не с отдельной частицей, а с точкой пространства (зависят от ее координат) в данный момент времени. И для решения задач гидродинамики нужно задавать не конечное число координат и импульсов, а начальные и граничные условия на эти их функции, которые описывают состояние среды в целом. Если уравнение Эйлера решать вместе с уравнением непрерывности, которое выражает закон сохранения вещества в гидродинамике, то можно решить любые задачи динамики идеальных сред. То есть *динамический характер законов динамики идеальных сред* (гидродинамика, теория упругости) остался незывлемым.

Гидродинамика неидеальной (вязкой) жидкости стала развиваться в XIX в. При движении такой жидкости (или газа) возникают *силы трения и теплообмен*. При этом имеет место *диссипация энергии*, которая не учитывается в идеальных моделях. В этом случае уже нельзя строить теорию процессов, опирающуюся только на механику, где

все процессы обратимы. И такая теория была построена только на основе теории теплоты, где иначе (чем в механике) определяется состояние системы.

Состояние системы определяют термодинамические параметры — *давление p , объем V , температура T* . Если первые два из них имеют механический смысл, то последний его лишен. Между параметрами существует связь, выражаемая уравнением состояния, которое устанавливается из опыта и не получено теоретически. Известно, что состояние заданной массы газа в отсутствие внешних воздействий не меняется, если газ находится в *равновесном состоянии*.

Газ — это совокупность слабо связанных частиц. Атомы в газах находятся на значительном расстоянии друг от друга и обладают свободой движения, хаотически сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда. Расстояния между атомами столь велики по сравнению с их размерами, и времена сближения частиц столь малы, что все газы ведут себя одинаково.

Модель идеального газа — это газ, молекулы которого пренебрежимо малы, свободно двигаются и сталкиваются

по законам упругого удара. Частицы принимаются за материальные точки, взаимодействующие на расстоянии. Частицы газа являют собой наилучший пример неупорядоченной совокупности однородных объектов (фр. *gaz* < греч. *chaos* «хаос»).

Модель реального газа, предложенная Ван дер Ваальсом в 1873 г., отличалась от модели идеального газа только двумя деталями: учетом объема самих молекул и их взаимодействия — притяжения. Последний фактор несколько уменьшает давление, так как каждая молекула при столкновении как бы тормозится притяжением соседних молекул. Так появилось новое уравнение состояния, которое получило имя автора.

При низких абсолютных температурах газы уже не похожи на газы, их свойства определяются квантовыми законами. В этих условиях используются квантовые функции распределения, которые переходят в классические с повышением температуры. Области, в которых наступают отклонения от закона распределения, называются **областями вырождения** газа (для водорода, например, эта область находится при $T = 1\text{ K}$, для других газов — еще ниже).

8.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ

Различные тела могут быть в разных *агрегатных состояниях* — газообразном, жидком, твердом или в виде плазмы. Но они имеют общее в своем строении — они состоят из молекул, а молекулы — из атомов. Элементарная молекулярно-кинетическая теория газов основана на классической механике, а молекулы представляются материальными точками.

Молекулярно-кинетическая теория строения вещества основана на следующих основных положениях.

1. Молекулярное строение веществ подтверждено существованием *процессов растворения, диффузии, броуновского движения* и других.

2. Молекулы находятся на определенных расстояниях друг от друга, что доказывается возможностью сжатия и перечисленными выше процессами. Размеры молекул газа малы по сравнению с расстояниями между ними. При отсутствии внешних сил молекулы газа равномерно заполняют весь, предоставленный им объем.

3. Молекулы связаны силами молекулярного взаимодействия — притяжения и отталкивания. Силы отталкивания на малых расстояниях превосходят силы притяжения, но быстро убывают с увеличением расстояния между молекулами, и с некоторого расстояния r_0 , называемого радиусом молекулярного действия, им можно пренебречь. При отсутствии внешних воздействий молекулы находятся в устойчивом состоянии на расстояниях в $2 r_0$. Эти силы имеют электромагнитную природу.

4. Молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении, что доказывают те же процессы.

5. Внутреннюю энергию молекулярной системы составляет сумма кинетической энергии движения молекул, потенциальной энергии их взаимодействия и всех прочих энергий этой системы.

6. В любом, даже самом малом, объеме газа, к которому применимы выводы этой теории, число молекул велико.

Газовые законы были получены эмпирически для равновесного состояния:

Закон Бойля-Мариотта, который выполняется при постоянной температуре T : $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$, т.е. описывается изотермой на pV -диаграмме.

Закон Гей-Люссака — изменение объема с температурой T при постоянном давлении: $V = V_0 \cdot (1 + \beta \Delta T)$, т.е. описывается изобарой.

Закон Шарля — изменение давления с температурой T при постоянном объеме: $p = p_0 (1 + \alpha \Delta T)$, т.е. изохорный процесс. Здесь термический коэффициент давления α и коэффициент объемного расширения β одинаковы для всех газов и равны $(1/273)$.

Параметры газа связаны между собой *уравнением состояния*.

Уравнение состояния газа ввел Клапейрон; оно связывает давление, объем и температуру заданной массы газа, т.е. объединяет все три газовых закона. Он записал объединенный закон Бойля-Мариотта и Гей-Люссака в виде: $pV = R(267 + t)$. Клапейрон впервые употребил графическое изображение обратимых круговых процессов и вычислил работу как соответствующую площадь на графике.

Уравнение Клапейрона-Менделеева получено при обобщении Д.И.Менделеевым уравнения Клапейрона с учетом закона Авогадро-Ампера-Жерара: $pV = (m/\mu)RT$, где m — масса газа, μ — его молекулярный вес, R — универсальная газовая постоянная, равная $8,31$ (Дж/моль·К). Согласно закону Авогадро, моли любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковый объем. При нормальных условиях он равен $22,4\text{ л} = 22,4 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$.

Газовые законы справедливы приблизительно, как всякие эмпирические, и описывают поведение почти идеальных газов при невысоких давлениях и не слишком высоких температурах. Они содержат нечто важное; подоб-

ных универсальных законов нет для жидкостей или твердых тел. Свойства твердых тел и жидкостей зависят от типа частиц, из которых они состоят, и силы взаимодействия между частицами в них меняются в очень широких пределах. Как показывают экспериментальные результаты, эти силы, имеющие отчасти характер электростатического взаимодействия, при расстояниях между молекулами более 10^{-9} м убывают столь быстро, что ими можно пренебречь. Поэтому свойства идеальных газов близки к свойствам реального газа.

Так как молекул много, и они часто ударяются о стенку, их суммарное действие на поверхность можно заменить одной непрерывно действующей силой. Эта сила как бы сглаживает отдельные толчки. Такое описание называется *статистическим* — время и место удара каждой молекулы о поверхность совершенно не интересны, важен только общий эффект, т.е. то, что входит в статистический закон.

Пусть атом газа заключен в кубическом ящике со стороной, равной L , и движется хаотически, ударяясь о стенки под разными углами. Из хаотичности движения молекул следует, что все направления их движения равновероятны. Это подтверждается тем, что давление на стенки сосуда одинаково. Проследим за компонентой скорости, направленной по оси x , и посмотрим, что происходит при ударе атома о стенки, перпендикулярные оси x ; импульс атома соответственно равен Mv_x и $-Mv_x$, изменение импульса для атома равно $2Mv_x$. Средняя сила, действующая на любую стенку ящика от ударов N частиц, равна $F_{\text{ср}} = (1/3)NMv_{\text{ср}}^2/L$. Давление равно: $p = F/S = (1/3)F_{\text{ср}}/S$, где S — площадь стенки. Подставив сюда значение для средней силы, получаем: $NMv_{\text{ср}}^2/LS = (1/3)NMv_{\text{ср}}^2/V$, где V — объем ящика ($V = LS$). Тогда уравнение можно преобразовать: $pV = (1/3)MNv_{\text{ср}}^2$. Это соотношение по форме напоминает закон Бойля–Мариотта. Произведение давления на объем при постоянной температуре есть величина постоянная.

8.4. СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА С ЕГО МИКРОСТРУКТУРОЙ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ

Процессом называют переход системы из одного состояния в другое через некоторую последовательность промежуточных состояний. Важной схематизацией, часто используемой в молекулярной физике, является понятие о равновесном процессе.

Равновесным называется состояние, если характеризующие его параметры при отсутствии внешних воздействий остаются постоянными неограниченное время. Если это условие не соблюдается, состояние называется *неравновесным*. Равновесное состояние изображается точкой в координатной плоскости, если по осям координат отложить значения каких-либо двух параметров, характеризующих систему. Неравновесное состояние так изобразить нельзя, так как параметры имеют неопределенные значения. Любой процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое всегда связан с *нарушением равновесия системы*. Но если это происходит медленно, то за любой малый промежуток времени состояние системы можно охарактеризовать определенными значениями параметров. И такой процесс можно считать состоящим из ряда равновесных процессов.

Значит, от температуры зависит правая часть, т.е. квадрат средней скорости. Средняя кинетическая энергия атомов в ящике $E_{\text{кин. ср}} = (1/2)Mv_{\text{ср}}^2$. Тогда уравнение для pV можно переписать так:

$$pV = (2/3) N (1/2) Mv_{\text{ср}}^2 = (2/3) N E_{\text{кин. ср}}$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа в состоянии теплового равновесия одинакова для всех молекул газов, находящихся в тепловом контакте, и для различных молекул газовой смеси. Таким образом, $E_{\text{кин. ср}}$ обладает основным свойством температуры и не зависит от внутренней структуры молекул и ее можно принять за меру температуры газа или тела, находящегося в тепловом контакте с газом. Обозначив усреднение угловыми скобками вместо индексов, введем понятие кинетической температуры θ .

$$\theta = (2/3) E_{\text{кин. ср}} = (2/3) \langle E_{\text{кин}} \rangle.$$

Тогда: $pV = N\theta$. Эта запись похожа на ранее полученный для идеального газа закон: $pV = RT$ или $pV = NkT$, причем полученный как обобщение опытных данных, $R = 2$ кал/(моль · К). Если выбранная модель соответствует реальности, то полученное из модели выражение для pV не должно отличаться от полученного экспериментально. Приравнявая правые части, получим условие соответствия модели опыту: $E_{\text{кин. ср}} = (3/2) kT$.

Температура газа должна определяться средней кинетической энергией его молекул. В 1730 г. Д.Бернулли наметил кинетику газовых сред. В частности, он сумел из *атомистических представлений вывести закон Бойля–Мариотта*. Так впервые из хаоса явился порядок. Этот закон вывел и Ломоносов, его гипотеза о внутреннем вращательном движении составляющих материю частиц позволила наглядно объяснить механизм нагревания двух трущихся друг о друга поверхностей.

Равновесный процесс состоит из непрерывной последовательности равновесных состояний. Чем медленнее протекает процесс, тем он больше похож на равновесный. Только равновесный процесс можно изобразить непрерывной линией на графике.

Понятие вероятности впервые в 1856 г. ввел в свои оценки А.Крениг. Он рассматривал газ как совокупность мельчайших упругих шариков-атомов, которые хаотично двигаются в пустоте. Исходя из вероятностных соображений он принял, что атомы газа движутся по трем взаимно перпендикулярным направлениям с одинаковой скоростью. Работа Кренига подтолкнула Клаузиуса к опубликованию своих результатов (1857 г.). Рассматривая удар молекул о стенку по законам упругих столкновений, Клаузиус вывел:

$$p = Nmv^2/3V \text{ или } pV = (3/2) N (mv^2/2) = (3/2) K,$$

где K — энергия поступательного движения всех частиц газа.

Поскольку давление и объем идеального газа связаны уравнением Клапейрона, он получил: $N(mv^2/2) = kT$. В 60-е годы кинетической теории удалось объяснить многие

явления — диффузию, растворение, теплопроводность и др., рассчитать сначала относительные, а затем и абсолютные значения средних скоростей молекул разных газов, найти *средний свободный пробег* молекулы. Его рассчитал Дж.К.Максвелл в 1866 г.

Средний свободный пробег определялся как среднее значение длины прямолинейного пути, проходимого молекулой между последовательными соударениями. Отсюда нетрудно посчитать и среднее число соударений частицы за определенное время. При обычных условиях это число очень велико — около 5 млрд соударений за 1 с. Подведение тепла увеличивает кинетическую энергию движения частиц, растут давление и температура. Как только они достигнут высоких значений, возрастает вероятность столкновений между частицами, и сходство газов исчезает.

Поступающая в газ энергия должна как-то распределиться между атомами. В любой момент времени одна часть атомов движется быстрее, другая — медленнее, но их *средняя кинетическая энергия* пропорциональна *температуре* газа T . Если к сосудам, содержащим равное число молекул двух разных газов, подвести равное количество тепла, то их температура повысится на одну и ту же величину, т.е. удельные теплоемкости c , приходящиеся на одну молекулу, одинаковы.

Распределение молекул по скоростям определяет распределение энергий, или *энергетический спектр газа*, от которого зависят многие свойства газов. В состоянии равновесия все направления скоростей равновероятны, иначе тепловое движение частиц не было бы беспорядочным, но равными по величине они быть не могут. Если такое и случится в какой-то момент, то столкновения быстро изменят эту ситуацию. Максвелл рассуждал следующим образом: ни одно направление движения и ни одно значение скорости не является выделенным, и предоставленный самому себе газ приходит в стационарное состояние, которое характеризуется определенным распределением скоростей.

Поскольку по всем трем осям проекции скоростей должны быть независимы и равновероятны, можно записать $W(V_x, V_y, V_z) = W(V_x) \cdot W(V_y) \cdot W(V_z)$, причем все вероятности распределения $W(V_i)$ должны иметь одинаковый вид. Кроме того, с одинаковой вероятностью будут встречаться скорости вдоль каждой оси и против нее, т.е. вероятность должна зависеть от квадрата скоростей $W(V_i^2)$. Повернем теперь координатные оси так, чтобы новая ось x' совпала с направлением вектора скорости, т.е. проекции скорости в новой системе будут $(V, 0, 0)$. От поворота осей значение функции $W(V)$ измениться не должно, поэтому: $W(V_x, V_y, V_z) = W(V_x^2) W(0) W(0)$.

Но $V_x^2 = V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$, $W(V^2) W^2(0) = W(V_x^2) W(V_y^2) W(V_z^2)$.

Таким образом, нужно найти функцию от суммы величин, которая распадается на произведение таких же функций от каждого слагаемого в отдельности. Этим свойством обладает *показательная функция*. Покажем это, например, для основания степени числа 10: $10^{a+b+c} \cdot (10^0)_2 = 10^a \cdot 10^b \cdot 10^c$. (Можно взять и любое другое число.) Но квадраты проекций скорости на оси — величины размерные и потому не могут стоять в показателе степени без коэффициента, обеспечивающего его безразмерность.

Среднее значение кинетической энергии имеет размерность квадрата скорости: $\langle E_{\text{кин}} \rangle = m \langle V^2 \rangle / 2 = (3/2) \theta$. Поэтому величина (θ/m) имеет ту же размерность, а обратная ей (m/θ) — размерность обратного квадрата скорости. Если взять за основу величину $e = 2,718\dots$, то среднее значение кинетической энергии не изменится и согласуется с прежним определением. Тогда искомая функция $W(V_x^2)$ окажется пропорциональной $\exp(-mV_x^2/2\theta)$. Очевидно, что нужно подобрать еще коэффициент пропорциональности, исходя из условия, что $W = 1$. Запишем этот коэффициент в готовом виде и получим искомое максвеллово распределение по скоростям:

$$W(V_x) = \sqrt{(m/2\pi\theta)} \exp(-mV_x^2/2\theta).$$

Можно показать, что никакая другая функция распределения, кроме $\exp(-E/\theta)$, не совместима с *законом сохранения энергии* при отдельных соударениях частиц. Графически $W(V_x)$ представляется *гауссовой кривой*. Максимум этой кривой лежит в окрестности нуля, т.е. в газе больше всего молекул с нулевыми значениями компонент скорости. Это связано с равновероятностью направлений скоростей, так что средняя проекция скорости хаотического движения на любое направление равна нулю. Гауссовы распределения встречаются в разных системах (даже в социальных).

Максвелл рассматривал свою модель газа как математическую аналогию реальности. «Вместо того, чтобы говорить, что все частицы тверды, упруги и шарообразны, можно сказать, что частицы являются центрами сил, действие которых ощутимо лишь на некотором малом расстоянии, где они проявляются внезапно и в виде очень интенсивной силы отталкивания». Далее он проводит сопоставление с величинами, характеризующими тепловое движение, заменяя среднюю скорость распределением скоростей (1859 г.). Проведя ряд опытов, Максвелл заключил: можно считать, что сила отталкивания должна быть обратно пропорциональна пятой степени расстояния между молекулами. В 1866 г. он вывел свой закон распределения по скоростям уже с этой поправкой.

Распределением Максвелла называется распределение молекул по проекции скорости, определяемое функцией $W(V_x) = (m/2\pi\theta)^{1/2} \exp(-mV_x^2/2\theta)$, оно установлено Максвеллом в 1859 г. Кривые распределения по компонентам скорости и абсолютному значению скорости отличны одна от другой. Первая является частным случаем *нормального закона распределения Гаусса*, которому подчиняются случайные ошибки при измерениях (рис.7).

Абсолютное значение скорости не может быть отрицательным, и, так как неподвижных частиц в газе нет, функция распределения по абсолютному значению скорости начинается с ее нулевого значения:

$$dN = 4 N (m/2) V^2 \exp(-E/\theta) dV \text{ и } dN = F(V).$$

Основное отличие заключается в существовании множителя — квадрата значения скорости. Поскольку $\exp(-E/\theta)$ при возрастании скорости убывает быстрее, чем возрастает квадрат скорости, то получающееся распределение асимметрично. Максимум функции $F(V)$ имеет место при наиболее вероятной скорости $V_0 = \sqrt{(2kT/m)}$. Среднее арифметическое значение скорости находится по формуле:

$\langle V \rangle = \int V F(V) dV = \sqrt{8kT/m}$. Среднее значение квадрата скорости равно $\langle V^2 \rangle = 3kT/m$, а квадратный корень из него называют средней квадратичной скоростью:

$$\langle V_{\text{кв.}} \rangle = \sqrt{\langle V^2 \rangle} = \sqrt{3kT/m}.$$

Распределению Максвелла, как можно показать, удовлетворяют закон сохранения энергии и принцип детального

равновесия в отдельных соударениях, когда при хаотическом движении в газе скомпенсированы два противоположно направленных процесса с равными скоростями. Этот принцип справедлив не только для газов, но и для любых систем в состоянии полного хаоса.

8.5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ И ЕГО ПРОЯВЛЕНИЕ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ, В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ

Распределение Больцмана — это распределение газа по занимаемому объему, если газ находится во внешнем поле; оно отлично от равномерного. Для газа в поле силы тяготения имеет место *барометрическая формула* $p = p_0 \exp(-gh/RT)$, которая может быть записана и для концентрации на определенных высотах в виде: $n = n_0 \exp(-mgh/kT)$.

Формулу для концентраций можно записать через $\exp(-E/kT)$, тогда под E понимается потенциальная энергия в любом поле (не обязательно в гравитационном). Она называется формулой Больцмана. По Больцману, плотность газа убывает с высотой, но температура остается постоянной. Множитель $\exp(-mgh/kT)$ определяет вероятность того, что молекула находится на высоте h над поверхностью Земли, и задает зависимость плотности атмосферы от высоты. Отношение плотности на высоте h к плотности на высоте 0 равно отношению функций $W(h)/W(0)$. Последняя из них равна единице, поскольку $\exp(0) = 1$. Поэтому и $n(h) = n(0) \exp(-mgh/kT)$.

В соответствии с этой формулой *концентрация тяжелого газа в атмосфере* должна убывать скорее, чем легкого, и слой атмосферы выше 60 км должен, по оценкам, состоять уже из самых легких газов — водорода и гелия. Однако из-за сильного перемешивания атмосфера однородна по составу вплоть до высот в 90 км и меняется только на высоте около 95 км. Причину этого отклонения от закона Больцмана усматривают в диссоциации молекул под действием жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Здесь считалось, что потенциальная энергия равна mgh , но это верно для высот, много меньших радиуса Земли. Поскольку сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра, потенциальная энергия должна убывать как первая степень расстояния. С ростом r плотность $n(r)$ падает, т.е. и показатель степени становится меньше, тогда можно записать: $n(r) = n(0) \exp(-mgr_3/kT)$.

При удалении от Земли на бесконечно большое расстояние $n(r)$ сохраняет конечное значение, что, конечно, удивительно. Земная атмосфера не может простираться до бесконечности, а этот множитель показывает, во сколько раз плотность атмосферы на бесконечности должна быть меньше, чем на поверхности Земли. Такое парадоксальное положение показывает, что статистическое равновесие не наступило, и когда оно наступит, атмосфера Земли улетучится. Но так как множитель очень мал, такого не случится. Для оценки величины показателя степени умножим и разделим его на число Авогадро N . В знаменателе заменится $N = RT$, в числителе Nm равно молекулярному весу. Подставляя значения радиуса Земли и ускорения свобод-

ного падения $r_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м и $g = 10$ м/с² и считая $T = 300^\circ\text{C}$, получим: $(Nmgr_3/RT) = (30 \cdot 10 \cdot 6,4 \cdot 10^6)/(8,3 \cdot 10^7 \cdot 300) = 700$ и $\exp(-700) = 10^{-300}$, что показывает ничтожность атмосферы на бесконечности.

Для Луны это число порядка 10^{-25} и тоже мало, но не так, как для данных Земли. Если бы атмосфера у поверхности Луны была такой же, как у Земли, т.е. равная $2,7 \cdot 10^{19}$ мол./м³, то на бесконечности остался бы 1 атом/м³. Приближаясь к состоянию статистического равновесия, атмосфера Луны улетучилась. В самом деле, из-за малой массы Луны, вторая космическая скорость в 12 раз меньше, чем на Земле. У Марса, который тоже меньше Земли, весьма разреженная атмосфера, а у Юпитера и Сатурна, напротив, атмосферы очень плотные. При точном расчете нужно было бы рассмотреть процессы в нижних и верхних слоях атмосферы, но оценки можно сделать только при знании скоростей убегания молекул на высоте и у поверхности планеты, которые связаны со значениями ускорения свободного падения на разных высотах.

Оценка времени рассеяния атмосферы, зависящего от изменений температуры, такова: при изменении T на 15% оно меняется на два порядка. Это объясняет наличие атмосферы на Титане (шестом спутнике Сатурна) и отсутствие ее на Луне, хотя скорости убегания на этих спутниках почти одинаковы — 2,6 и 2,4 км/с соответственно. На Титане температура намного ниже, чем на Луне, — 70–120 К. При такой низкой температуре только легкие газы типа гелия и водорода имеют тепловые скорости, позволяющие им убежать из атмосферы. Обнаруженная на Титане атмосфера состоит из метана и, возможно, аммиака. На Меркурии скорость убегания порядка 3,8 км/с, но близость к Солнцу позволяет даже тяжелым молекулам иметь достаточную скорость для покидания атмосферы, поэтому для существования атмосферы на Меркурии самые плохие условия в солнечной системе. Рассеяние атмосферы, кроме того, сильно возрастает из-за диссоциации многоатомных молекул под действием солнечного излучения.

Число Авогадро, которое введено в показатель степени в распределении Больцмана, по зависимости плотности газа от высоты впервые определил Ж.Перрен. Он взял коллоидный раствор частиц гуммигута в воде, в котором при равновесии у основания сосуда концентрация больше. При боковом освещении этих частичек они напоминают пылинки в солнечном луче. Перрен сумел построить функцию $\exp(-mgh/kT)$, натуральный логарифм которой равен: $mgh/kT = Nm/RT$. Зная массу коллоидных частиц из других измерений, он впервые вычислил N . Так впервые была доказана *реальность существования молекул*, а статисти-

ческая физика позволила из свойств совокупности многих молекул найти свойства и характеристики отдельных частиц. Возникла возможность избежать неудобств, связанных с решением уравнений движения отдельных частиц.

В *равновесном состоянии* распределение частиц должно быть наиболее вероятным, и это осуществляется посредством многих столкновений. Если возникнут какие-то иные распределения, то при создании в системе беспорядка они исчезнут, и установится *наиболее вероятное распределение*.

Если провести вывод распределения Больцмана на основе принципа детального равновесия, то получится та же формула, в которой под E понимается полная энергия молекулы. Это распределение получило название *распределения Максвелла–Больцмана*, поскольку оба распределения обусловлены столкновениями молекул. Кинетическая энергия частиц, позволяющая им подниматься в силовом поле, вызвана только столкновениями.

Распределение Максвелла–Больцмана — это объединенное распределение, которое соответствует наиболее вероятному распределению числа молекул в состоянии статистического равновесия. Для реальных газов этот закон применим, пока можно пренебречь взаимодействием молекул на расстоянии, т.е. для достаточно разреженных газов.

Ричардсон опытным путем проверил максвеллово распределение по скоростям (1908 г.), а Франк и Густав Герц измерили длину свободного пробега ионов водорода (1912 г.). В то же время, еще с конца 90-х годов прошлого века атомистика подвергалась непрерывным критическим

атакам со стороны ряда естествоиспытателей и философов-физиков (Оствальд, Мах, Дюгем, Гельм и др.). В своем неприятии атомистики критики исходили из следующего положения: поскольку законы термодинамики есть обобщение огромного опыта человечества, они абсолютны, поэтому обратимость во времени, связанная с тенденцией возрастания энтропии, не может объясняться механическим движением мифических микрочастиц, так как законы механики обратимы.

Приведенный выше вывод распределения Максвелла по скоростям относится к одноатомным газам. Для двух- или трехатомных газов следовало бы в энергию ввести члены, характеризующие вращение или переносное движение атомов в молекуле относительно друг друга. На каждый вид вращения приходится энергия $kT/2$, так что средняя энергия вращения двухатомной молекулы $2(kT/2) = kT$, трехатомной — $3(kT/2) = (3/2)kT$, но более трех вращений не может быть, поэтому для многоатомной молекулы также $(3/2)kT$. Средняя энергия колебаний равна на каждое колебание, т.е. для молекулы водорода средняя энергия равна $(3/2)kT + kT + kT = (7/2)kT$. Здесь первое слагаемое обязано переносному движению, второе — вращательному, третье — колебательному. Из опыта следует, что она равна не $(7/2)kT$, а $(5/2)kT$. Это связано с тем, что оценки по классической механике здесь не дают верного результата — для повышения температуры на 1°C требуется теплота, равная c . Квантовые законы меняют вид функций распределения, но они должны использоваться при низких температурах.

8.6. ПОНЯТИЕ «ФЛУКТУАЦИЯ»

Возрастание энтропии замкнутой системы есть стремление системы к наиболее вероятному состоянию. Оно близко к состоянию с немного меньшей вероятностью, и всегда будут иметь место небольшие, меняющиеся со временем, отклонения от него. Так, если сосуд с газом разделить перегородкой на две равные части, а затем ее убрать, то при равновесии в каждой части должно оказаться поровну частиц. *Равновесие это динамическое*, так как о равенстве числа частиц можно говорить лишь применительно к средним значениям, которые устанавливаются за длительный промежуток времени. Самопроизвольные отклонения величин от средних значений, обусловленные тепловым движением, называются *флуктуациями*.

Флуктуациями объясняется открытое Броуном хаотическое движение мельчайших частиц в жидкости (1827). Польский физик-теоретик Смолуховский исследовал броуновское движение (1906 г.) на основе статистического подхода, а на следующий год Эйнштейн завершил теорию. Оствальд писал: «Совпадение броуновского движения с требованиями кинетической гипотезы дает теперь право самому осторожному ученому говорить об экспериментальном доказательстве атомистической теории материи. Таким образом, атомистическая гипотеза выведена в ранг научной прочно обоснованной теории» (1908 г.).

Эйнштейн в 1905 г. оценил число столкновений в газе атомов за 1 с в 10^{21} , считая, что скорости должны определяться именно столкновениями. При таком большом

числе столкновений возможно только вероятностное описание. Он рассчитал средний квадрат смещения броуновской частицы и дал формулы для определения величин, характеризующих размеры молекул, их число в единице объема и т.п. Так было введено *статистическое описание*.

Большие флуктуации, т.е. отклонения от среднего, в системах огромного числа частиц по закону больших чисел должны быть достаточно редкими. Меньшие флуктуации, которые должны бы встречаться чаще, были слишком малы, чтобы их можно было обнаружить с помощью несовершенных приборов того времени. Тем не менее статистический подход к термодинамике способствовал пересмотру всех ее основ. Например, «вечное» движение броуновских частиц противоречит раннему варианту второго начала, согласно которому температура в замкнутой системе должна постепенно выравниваться. Когда система придет к равновесию, в такой системе нельзя преобразовать тепловую энергию в полезную энергию, или работу.

Эйнштейн и Смолуховский независимо друг от друга разрабатывали теорию флуктуаций и вводили статистические понятия применительно к тем явлениям, в которых «антиэнтропийное» поведение можно наблюдать непосредственно. Смолуховский показал на многих примерах, как микроскопически обратимые процессы приводят к необратимым макроявлениям. Он оценил «время возврата» для разных процессов и показал, что оно может быть наблюдаемо для небольших флуктуаций, тогда как для больших

оно чудовищно велико. Поэтому обратимость и необратимость процессов связаны с временами наблюдения и, значит, относительны.

Теория флуктуаций приводит к выводу о существовании некоторого *предела чувствительности* измерительных приборов из-за флуктуаций, измеряемой величины и элементов самого прибора. В 1912 г. Смолуховский указал на важный случай флуктуаций, имеющих отношение к измерениям: маленькое зеркальце, подвешенное на крутящейся нити, и сама нить должна испытывать флуктуации из-за броуновского движения молекул воздуха и атомов вещества, т.е. сама структура вещества, из которого изготовлены приборы, налагает естественный запрет на безграничное повышение точности измерений.

Происхождение голубого цвета неба Смолуховский объяснил с помощью теории флуктуаций, были и другие объяснения. Тиндаль считал, что причиной этого служит рассеяние коротковолновой части солнечного излучения мельчайшими частицами тумана, дыма или пыли. Рэлей

предполагал, что оптическую неоднородность атмосферы создают отдельные молекулы воздуха. Он сумел объяснить опыты Тиндаля. По его закону интенсивность рассеянного света пропорциональна четвертой степени частоты света. И, так как сильнее рассеиваются световые волны с большими частотами, спектр рассеянного света будет сдвинут в область высоких частот — отсюда и голубой цвет неба. Глядя на закатное солнце, наблюдатель видит свет, прошедший через атмосферу без рассеяния, поэтому его спектр сдвинут к более низким частотам. И чем ниже окажется солнце над горизонтом, тем в большей степени сдвигается его спектр, поэтому заходящее (или восходящее) солнце кажется красноватым, и более красной выглядит его нижняя часть. Смолуховский объяснил голубой цвет неба рассеянием на флуктуациях плотности и проверил свои идеи опытом: он пропустил сквозь тщательно отфильтрованный воздух мощный поток света и наблюдал на фоне зачерненной поверхности голубоватую окраску воздуха.

Глава 9. КОНЦЕПЦИИ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

9.1. ТЕПЛОТА, ТЕМПЕРАТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ТЕПЛОТЫ

Теплота еще со времен античности считалась или веществом, или состоянием. У философов ионийской школы огонь был четвертым элементом. В XVII в. можно было услышать, что термометры измеряют «абсолютное» количество теплоты в теле. Классическая термодинамика родилась в борьбе с теорией теплорода, в которой теплота рассматривалась как неуничтожимая невесомая жидкость, способная перетекать от нагретых тел к более холодным. Но рядом с теорией теплорода возникла *кинетическая теория теплоты*, творцами которой были Бэкон, Гук, Бойль, Ломоносов, Клаузиус. Термодинамика, возникшая сначала как инженерная дисциплина, имеет целью установление соотношений между параметрами макросистем, не опираясь ни на какие модели строения веществ. Молекулярная физика, наоборот, исследует тепловые явления с микроскопической точки зрения.

Измерение температуры ввели для характеристики *степени нагретости тел*, но при измерениях нельзя полагаться на ощущения, нужно опираться на объективные критерии. Исследование тепловых явлений началось после изобретения первого прибора — *термометра*.

Галилей сконструировал *термоскоп*: это была тонкая стеклянная трубка, один конец которой заканчивался шариком, а другой, открытый, был опущен в сосуд с водой, которая заполняла и часть трубки. Когда воздух в шарике нагревался или охлаждался, столбик воды в трубке опускался или поднимался. Было много подобных конструкций, и стеклянные трубки стали снабжать шкалой. Термометры создавали флорентийские академики, Ньютон, Амонтон, Ламберт и Герике. Впервые попытку сделать термометры с одинаковыми показателями предпринял гданьский стеклодув Г.Д. Фаренгейт. За 0° шкалы он принял температуру смеси воды, льда и поваренной соли, тогда температура таяния льда — 32°F, человеческого тела — 96°F, кипения

воды — 212°F. Шкала Фаренгейта с 1714 г. получила широкое распространение, сначала в его термометрах использовался спирт, а потом — ртуть. Эта шкала сейчас принята во многих странах, в том числе в США. Шведский астроном А. Цельсий предложил в 1742 г. за 0 градусов взять температуру кипения воды при нормальном давлении, а за 100 — температуру таяния льда. Известный шведский ботаник К. Линней переставил точки 0 и 100 на шкале Цельсия, так появился бытовой термометр с этой шкалой.

Помимо *свойства расширения веществ при нагревании*, которое лежит в основе действия перечисленных термометров, используется и изменение электрических свойств с изменением температуры. *Термопара* — прибор для измерения температуры — сделан из двух спаянных на одном конце проволок из разных металлов (обычно меди и константина, сплава меди с никелем), свободные концы которых присоединены к прибору, измеряющему напряжение. Термопара удобна в применении, и ее интервал велик — от -269 до 2300°C. Поскольку обычно сопротивление растет при повышении температуры, а в некоторых полупроводниках — падает, то этот эффект используется в очень точных термометрах.

Для количественного определения температуры нужно найти величину, которая бы обладала свойствами температуры — *быть одинаковой у всех тел, находящихся в состоянии теплового равновесия*. Австрийский физик Л. Больцман установил (1866 г.), что этим свойством обладает средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул: $E_{\text{ср.}} = (3/2)kT$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (постоянная Больцмана). Значит, *температура — мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа*.

Абсолютная шкала температур, введенная лордом Кельвином, принята в науке и потому единица температуры

(градус) в этой шкале в системе СИ назван в честь автора и обозначается K . Соотношение этой шкалы со шкалой Цельсия дает: $T(K) = 273,15 + 1^\circ C$ (рис.8).

Температура и количество теплоты как различные понятия первым определил Ламберт (1755 г.). В том же году и М.В.Ломоносов указал, что температура тела — степень теплоты — определяется скоростью движения частиц, тогда как количество теплоты зависит от общего количества движения этих частиц, т.е. от их кинетической энергии.

Уравнения теплового баланса появились в связи с вопросом о *температуре смеси*. Фаренгейт считал, что при смешивании двух различно нагретых жидкостей температура смеси всегда будет равна половине суммы температур составных частей. Но опыты этого не подтвердили. Петербургские академики Г.Крафт и Г.Рихман пришли к уравнению *теплового баланса*, которое вскоре даже в учебниках стали называть «задачей Рихмана». Рихман на опыте открыл, что при смешивании равных количеств воды с разной температурой получится смесь с температурой, равной среднему арифметическому начальных температур.

Калория — количество теплоты, соответствующее уменьшению температуры единицы веса воды на $1^\circ C$. В 1772 г. ввел эту единицу измерения тепла шведский академик И.К.Вильке. Он проверил формулы для смеси веществ, отличающихся по своему строению (например, воды и снега) и обнаружил «исчезновение» части теплоты при исследовании смеси воды и снега. К понятиям *скрытой теплоты таяния и испарения* пришли, опираясь на формулы Рихмана и теории теплорода. Эту теорию теплорода развивал Ж.Марат, известный революционер. Явления нагрева и охлаждения газа при сжатии и расширении истолковывались как подтверждение теории. Теплород, говорили они, содержится в газе, как сок в апельсине, сожмешь апельсин — выдавишь сок, сожмешь газ — выделишь теплород, и газ нагреется. Открытие Р.Майером в 1842 г. эквивалентности теплоты и энергии дало возможность измерять количество теплоты энергетическими единицами. И измерение температуры в принципе было также сведено к механическому измерению. В системе СИ единицей работы и теплоты является джоуль. Всесистемная единица — калория: $1 \text{ кал} = 4,186 \text{ Дж}$.

Понятие скрытой теплоты возникло, когда Блэк открыл *постоянство точки плавления льда*.

Калориметр — классический прибор для измерения количества теплоты сконструировали в 80-е годы XVIII в. А.Лавуазье и Лаплас. Они определили *удельные теплоемкости* многих тел, твердых и жидких, и их зависимость от температуры. Калориметры совершенствовались, но и до сих пор широко используются. Лавуазье и Лаплас, видимо, первыми поняли физическую сущность понятия теплоемкости. Проанализировав работы предшественников, они отмечали, что «опыты дают сведения только об отношении количеств теплоты», а не о полном количестве теплоты, и считали природу теплоты иной, не связанной с особым флюидом, теплородом. Они предчувствовали, что наука уйдет от наглядности модели теплорода, и их кинетические взгляды на природу теплоты окажутся более верными.

Понятие теплоемкости было введено для характеристики зависимости количества энергии, необходимого

для изменения температуры на 1 градус, от количества вещества, его вида и температуры: $C = dQ/dT$. Понятием теплоемкости стали пользоваться Вильке и Блэк к началу XIX в. При единичной массе вводится понятие *удельной теплоемкости*. Так как количество тепла, необходимое для повышения температуры тела на ΔT , пропорционально массе тела m , то: $Q = cm \Delta T$. Величина c называется *удельной теплоемкостью* вещества. Для воды она максимальна и принята равной единице — 1 кал на 1 г на $1^\circ C$.

Работы Эйлера, Д.Бернулли и Ломоносова показывают, что с точки зрения «*корпускулярной философии*» можно объяснить различные физические и химические явления, в том числе и тепловые. В работе «Размышления о причине теплоты и стужи» (1745 г.) Ломоносов исходит из принципа, что все явления природы определяются материей и движением, и считает, что «теплота состоит в некотором движении мельчайших частичек тела».

Механический эквивалент теплоты вывел из данных об удельной теплоемкости газов при постоянных давлении и объеме Р.Майер. Его «метод» состоит в том, что разницу удельных теплоемкостей он приравнивает работе, совершаемой при расширении газа, находящегося при постоянном давлении. Поэтому уравнение $c_p - c_v = R$ названо уравнением Майера.

В книге «Органическое движение в связи с обменом веществ» (1845 г.) он последовательно и систематично изложил учение о сохранении и превращении энергии (по его терминологии, силы). Воспользовавшись данными по удельной теплоемкости, Майер получил значение механического эквивалента теплоты $I = 425 \text{ кГм/ккал}$.

Джоуль экспериментировал с проводниками электрического тока и измерял количество выделенной теплоты. Он открыл закон, по которому количество теплоты, выделенной током, пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению. Этот же закон, независимо от Джоуля, получил в 1844 г. петербургский академик Э.Х.Ленц, поэтому он известен как закон Джоуля–Ленца. Джоуль провел много экспериментальных работ по исследованию тепловых явлений в гальванических цепях и выделению теплоты в химических реакциях.

Для определения механического эквивалента теплоты Джоуль построил установку. Масса m спускается с высоты h , ее потенциальная энергия гравитации mgh теряется при опускании груза и превращается в кинетическую энергию вращающихся лопаток. Лопатки, вращаясь, отдают свою энергию воде, налитой в калориметр. При этом поглощенная водой энергия (в калориях) пропорциональна произведению массы воды $m_{\text{вод}}$ на наблюдаемое изменение ее температуры ΔT : $mgh = cm_{\text{вод}} \Delta T$. Если слева в формуле все величины выражены в системе МКС (метр, килограмм, секунда), то энергию получим в джоулях (Дж). Если массу воды взять в граммах, температуру в градусах Цельсия, то получим тепловую энергию в калориях, так как теплоемкость воды равна единице. Так Джоуль пришел к соотношению, которое сейчас принято: $1 \text{ кал} = 4,185 \text{ Дж}$.

Как видно из работ Джоуля, опубликованных в его книге «Механический эквивалент теплоты» (1872 г.), в середине 40-х годов он уже владел идеей сохранения и превращения энергии. Термин «*энергия*», впервые введенный в науку

Юнгом, автором принципа интерференции световых волн, окончательно вошел в научный обиход в 1849 г., после работ Кельвина. Говоря о природе теплоты, Джоуль считал ее родом колебательных движений частичек тела (вслед за М.В.Ломоносовым). Независимо от Майера, он рассматривал животную силу как результат химических процессов. Важность эквивалентности энергии (работы) и теплоты сумел оценить в 1847 г. Гельмгольц.

Полная энергия тела складывается из кинетической энергии движения тела как целого, из потенциальной энергии его во внешнем поле сил и внутренней энергии.

Внутренняя энергия — это обычно кинетическая энергия хаотического (теплового) движения его частиц и их взаимная потенциальная энергия. В последнюю включают и энергию колебательного движения атомов в молекулах, и внутриатомную энергию. В идеальном газе внутренняя энергия — только энергия хаотического движения молекул.

Понятие внутренней энергии относится только к равновесным состояниям систем. Поэтому предполагаем, что начальные и конечные состояния равновесны, тогда как на процессы, происходящие между этими состояниями, такого ограничения можно не накладывать. *Внутренней энергией системы U называют такую функцию состояния, приращение которой во всяком процессе, совершаемом системой в адиабатической оболочке, равно работе внешних сил над системой при переходе из начального состояния в конечное.*

Под *адиабатической оболочкой* понимается такая, что состояние заключенной в нее системы не меняется при изменении температуры окружения, если внешние параметры постоянны. Или: в адиабатической оболочке состояния меняются только путем изменения внешних параметров. Поэтому работа над системой в такой оболочке зависит не от способов перехода в состояние, а только от начального и конечного состояний. Для такой системы, перешедшей из состояния 1 в состояние 2, можно записать: $U_2 - U_1 = A_{12}$, причем эта работа, производимая внешними силами, не зависит от вида пути. Внутренняя энергия может быть положительной и отрицательной, как и работа внешних сил, т.е. записанные соотношения нужно понимать в алгебраическом смысле. Для квазистатических процессов $A_{\text{внеш}} = -A$, т.е. можно записать $U_1 - U_2 = A$, работа системы при адиабатических процессах совершается за счет убыли внутренней энергии.

Итак, внутренняя энергия есть функция параметров, определяющих состояние, т.е. $U = U(V, T)$. Это уравнение называют *калорическим уравнением состояния* (в отличие от термического уравнения состояния типа $pV = RT$ для идеальных газов). Эти уравнения следуют из обобщения опыта.

Механическую теорию теплоты разрабатывал немецкий физик Клаузиус. Он обратил внимание на то, что между затраченной работой и полученной теплотой наблюдается постоянство соотношения только при процессах *циклических*, т.е. таких, при которых тело всегда возвращается в исходное состояние. Понятие *внутренней энергии* Клаузиус ввел для уравнивания счета. Тогда теплота, подводимая к воде, частично преобразуется во внутреннюю

энергию расширения пара и воды, а частично — во внутреннюю энергию, которую пар возвращает при конденсации. Джоуль установил, что при диссипации (лат. *dissipatio* «рассеяние») одинаковых количеств обеих энергий образуется одно и то же количество теплоты. Вслед за Джоулем, Томсоном и Гельмгольцем Клаузиус применил закон сохранения и превращения энергии к электрическим явлениям (1852 г.): «Подобно тому как посредством теплоты может быть произведена механическая работа, так и электрический ток способен вызывать частично механическое действие, включая теплоту». Тогда же Томсон применил этот закон к световым явлениям, химическим процессам и жизнедеятельности живых организмов, а впоследствии — к электрическим и магнитным явлениям, установив выражение для энергии магнитного поля в виде интеграла, взятого по объему.

Молярная теплоемкость вещества определяется отношением количества теплоты, полученного одним молекул вещества, к происходящему при этом увеличению температуры: $c = Q/\Delta T$. Это тепло расходуется на увеличение внутренней энергии вещества и совершение работы: $Q = \Delta U + A$. Полная внутренняя энергия определяется кинетической энергией поступательного движения частиц: $U = N(1/2)mv_{\text{ср}}^2 = N(3/2)kT = (3/2)RT$. $R = 2$ (кал/моль · К).

Поэтому при изменении температуры меняется и внутренняя энергия.

Работа может быть совершена за счет расширения газа: $A = p\Delta V$. Если газ находится в постоянном объеме, $A = 0$ и молярная теплоемкость определяется только изменением внутренней энергии и обозначается c_v . Итак, $c_v = q/\Delta T = (Q/\Delta T) + 0 = (3/2)R = 3$ (кал/моль · К).

Если при подводе тепла газ имел возможность расширяться, можно вычислить работу при постоянном давлении. Из уравнения газового состояния $pV = nRT$ видно, что увеличение температуры при постоянном давлении ведет к увеличению объема, т.е. $p\Delta V = nR\Delta T$.

Совершаемая работа равна $p\Delta V$. Из первого начала термодинамики можно записать:

$$Q = \Delta U + A = (3/2)nR\Delta T + nR\Delta T.$$

Для одного моля газа это означает, что $Q = (3/2)R\Delta T + R\Delta T$.

Для молярной теплоемкости при постоянном давлении получаем значение:

$$c_p = (Q/\Delta T)_p = (3/2)R + R = (5/2)R = 5R = 5 \text{ (кал/моль · К)}.$$

В рассматриваемой нами простой модели для газов все значения молярной теплоемкости должны быть равными, но теплоемкость при постоянном давлении больше теплоемкости при постоянном объеме на 2 кал/(моль · К). Сравните с уравнением Майера: $c_p - c_v = R$.

Если два атома как-то связаны, то они могут не только начать двигаться поступательно, но и вращаться вокруг общего центра масс. Поскольку каждый вид движения оттягивает на себя поступающую энергию, то изменение внутренней энергии за счет поступающего тепла должно состоять из изменения энергии поступательного движения $\Delta(N(1/2)mv_{\text{ср}}^2)$, вращения $\Delta(N(1/2)I\omega_{\text{ср}}^2)$ и колебаний $\Delta(N(1/2)kx_{\text{ср}}^2)$. При поступательном движении двухатомной молекулы как целого возможно движение по трем равноправным направлениям, поэтому естественно предположить, что энергия делится поровну между этими тремя

направлениями. При вращении молекулы, имеющей форму гантели, два направления являются равноценными — это направления, перпендикулярные оси вытянутости молекулы, на каждое из которых должна приходиться одинаковая энергия. При колебаниях (атомы связаны между собой чем-то вроде пружины) меняются потенциальная и кинетическая энергии, и на каждый тип колебания тоже приходится одинаковая энергия.

Молярная теплоемкость металлов имеет одинаковое значение равное $6 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ (закон Дюлонга и Пти). Это объясняется тем, что каждый атом имеет три степени свободы колебаний около своего положения равновесия в кристаллической решетке, а на каждую приходится вдвое больше энергии, чем на поступательные (одна — на кинетическую энергию и одна — на потенциальную). Зависимость теплоемкости от температуры, несколько отличающаяся для разных металлов, классическая теория не способна объяснить. И не понятно, почему электронный газ, переносит энергию в металле, не получает тепловой энергии исходя из значения молярной теплоемкости. Или — он переносит энергию, обеспечивая теплопроводность и электропроводность, но сам энергии не поглощает?! Загадкой оказывается и огромная теплоемкость воды, в три раза большая, чем у металлов. Все эти, не решаемые в классической теории, вопросы говорят о более сложной структуре веществ.

Закон сохранения и превращения энергии в середине XIX в. приобрел права всеобщего закона природы, объединяющего живую и неживую природу. Его кратко формулируют так: «Энергия сохраняется», или: «Тепло, полученное системой, идет на приращение ее внутренней энергии и на производство внешней работы». *Сохраняется именно энергия, а не теплота, что стало одним из основных научных достижений.* Понятие энергии позво-

лило рассматривать все явления природы и процессы с *единой точки зрения*, объединить все явления. Впервые в науке *абстрактное понятие* заняло центральное место, оно пришло вместо ньютоновой силы, соответствующей чему-то осязаемому, конкретному, хотя и облаченному Ньютоном в математические одежды.

Понятие энергии прочно вошло в нашу жизнь. Ему нет единого определения, но чаще всего под энергией понимают способность тела совершать работу. В середине прошлого века лорд Кельвин признал, что силы могут исчезать и возникать, а энергия не уничтожается. Это понятие соответствовало и религиозным взглядам Кельвина: он считал, что Творец в самый момент творения мира наделил его запасом энергии, и этот божественный дар будет существовать вечно, тогда как эфемерные силы подвержены многим превращениям, и с их помощью в мире ткется ткань явлений переходящих. Современная наука не отвергает взгляды Кельвина, но не отрицает и существования атомов как носителей энергии.

Первое начало термодинамики, связанное с законом сохранения и превращения энергии, акцентирует внимание на *внутренней энергии*: приращение внутренней энергии при переходе системы из одного состояния в другое складывается из суммы работы внешних сил над системой и количества теплоты, получаемого системой. Оно требует сохранения энергии изолированной системы, но не указывает направления, в котором процессы могут происходить в природе. Это направление указывается вторым началом термодинамики. Кроме того, второе начало вводит температурную шкалу, не связанную с рабочим веществом термометра и его устройством. Два начала позволяют установить множество точных количественных соотношений между различными макроскопическими параметрами тел в состояниях термодинамического равновесия или около него.

9.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКУЮ РАБОТУ. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Молодой французский инженер и физик Н.С.Карно поставил себе задачу **исследовать работоспособность тепловых машин**. Тепловые машины получали все большее распространение, и он считал, что, «по-видимому, им предстоит сделать большой переворот в цивилизованном мире», что и блестяще оправдалось. Двигатели внутреннего сгорания и паровые турбины получили широчайшее распространение, появилось автомобильное и авиационное производство, ракеты вывели человека в космос. Работа Карно «Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824 г.), в которой он сформулировал общий и *абстрактный метод* решения специальной задачи — термодинамический, вышла за пределы узкого специального исследования, положив начало новой науке — *термодинамике*.

Анализируя механизм действия тепловых машин, Карно исходил из того, что для их работы нужно наличие разности температур и затем их выравнивание, так же как для работы водяных машин необходима разность уровней воды. Поэтому заключал, что «возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, а переходу его от горячего тела к холодному,

т.е. восстановлению его равновесия». Но определяет ли ΔT производимую машиной работу? Ведь возможен процесс выравнивания температур без всякой работы, как в случае непосредственного теплового контакта. *Для того чтобы работа производилась, нужен посредник, рабочее вещество, которое было бы способно отобрать теплоту у нагревателя (более горячего тела) при более высокой температуре и отдать ее холодильнику (более холодному телу) — при более низкой.*

В идеальном газе выгоднее провести процесс передачи тепла *изотермически*. Само рабочее вещество при этом меняет температуру без какого-либо подвода тепла, т.е. адиабатически. Только в этом случае работа получится максимальной. И Карно рассмотрел *идеальную машину*, которая имела бы большую эффективность, чем любая реальная машина. Идеальна она потому, что в ней отсутствует внутреннее трение, а процесс характеризуется только двумя температурами.

Теорема Карно, доказанная в этой работе: *эффективность любой тепловой машины, работающей при температурах T_1 и T_2 , причем $T_2 > T_1$, меньше эффективности идеальной машины.* Карно не вычислял коэффициент

полезного действия (КПД), но указал, что он пропорционален *разности падения температур* единицы теплохода.

Идеи Карно в течение 10 лет не вызвали интереса, пока Клапейрон, долгое время работавший в Петербургском институте инженеров путей сообщения, не выпустил свою книгу (1834 г.). Он дал анализ работы Карно, перевел ее на математический язык и несколько улучшил сам цикл Карно — заменил его другим, теперь общеизвестным циклом из двух адиабат и двух изотерм, называемый циклом Карно. Клапейрон впервые употребил *графическое изображение* обратимых круговых процессов и вычислил *работу как соответствующую площадь на графике*.

Превращение тепла в работу важно для практических целей, как и превращение одного вида энергии в другой. Рассмотрим схематически работу *тепловой машины*. В цилиндре машины помещается при атмосферном давлении идеальный газ или другое вещество, называемое *рабочим телом*. Повысим температуру газа, не меняя давление. Тогда газ должен расширяться. Поршень переместится на расстояние x , причем он будет двигаться против внешнего давления атмосферы. Если площадь поршня равна s , то совершается работа против силы, равной ps , поскольку p — сила, приходящаяся на единицу площади. Поршень переместился на расстояние x , и работа на этом пути равна: $A = -psx$. Здесь поставлен знак минус, так как работа совершается газом, который отдает ее внешней среде, перемещаясь в направлении, противоположном приложенной силе. Поскольку произведение sx есть изменение объема газа $V_2 - V_1$, то $A = -p(V_2 - V_1)$ и равна теплоте, затраченной на нагревание газа.

Пусть газ, находящийся под поршнем в цилиндре, находится в равновесии с окружающей средой. Будем медленно выдвигать поршень из цилиндра, не нарушая равновесия в каждый данный момент и сохраняя постоянство температуры. Этот процесс соответствует закону Бойля–Мариотта: $pV = \text{const}$. Точка 1, представляющая состояние газа, перейдет на плоскости p, V в точку 2. Если опять же медленно и при постоянной температуре сжимать газ, то точка 2 вернется в точку 1, потому что изотермический процесс обратим. Существует и другой обратимый процесс в идеально теплоизолированном сосуде. Этот процесс тоже очень медленный, так что температура во время сжатия или расширения выравнивается во всех точках, но меняется в зависимости от объема. Такой процесс без теплообмена с окружающей средой называется *адиабатическим*. Уравнение процесса: $pv^\gamma = \text{const}$, $\gamma = c_p/c_v$.

Оба этих обратимых процесса, конечно, идеализированы, реальные процессы могут только приближаться к ним, поскольку всегда есть какие-то потери тепла на теплоизоляцию, вязкость среды и т.п. Цикл Карно состоит из двух изотермических и двух адиабатических процессов, которые образуют на графике в координате (p, v) криволинейный четырехугольник (рис.9). Адиабаты идут круче изотерм, поэтому они образуют боковые линии, а изотермы — основания. Тепло подводится и отнимается при изотермическом процессе, поэтому верхняя изотерма отвечает расширению газа в тепловом контакте с нагревателем температуры T_1 , а нижняя — сжатию при контакте

с холодильником при T_2 . Пусть газ получает от нагревателя теплоту Q_1 , а холодильнику отдает теплоту Q_2 . Тогда за весь цикл он получит теплоту $Q = Q_1 - Q_2$, равную совершенной работе A . Отношение работы A к теплу, полученному у нагревателя (с нагревателем связаны основные затраты, ведь это ему нужно топливо), называется *КПД теплового двигателя*: $\text{КПД} = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1$.

Можно показать, что $\text{КПД} = (T_1 - T_2)/T_1$.

Коэффициент полезного действия двигателя, таким образом, определяется разностью температур нагревателя и холодильника, деленной на температуру нагревателя.

На рисунке слева графически представлена совершенная работа, справа — тепловая машина (а) при $Q = A + Q_1$ и рефрижератор (б): $Q = A + Q_2$. Возможность построения машины без холодильника, т.е. с КПД = 1, которая могла бы превращать в работу всю теплоту, заимствованную у теплового резервуара, не противоречит закону сохранения энергии. По своему практическому значению она не уступала бы перпетуум-мобиле, так как могла бы производить работу за счет почти неисчерпаемых запасов внутренней энергии, содержащихся в воде морей и океанов, атмосфере и недрах Земли. Такую машину У.Оствальд назвал *перпетуум-мобиле второго рода* (в отличие от перпетуум-мобиле первого рода — вечного двигателя, производящего работу из ничего). Карно исходил из идеи невозможности вечного двигателя, опираясь на многочисленные опытные факты, которая была возведена в постулат, названный вторым началом термодинамики.

Термодинамическую шкалу температур построил Кельвин, исходя из того, что КПД всех обратимых двигателей, работающих при данной разности температур, одинаков и определяется только абсолютными температурами холодильника и нагревателя. Отсюда можно определить температуру вне зависимости от типа вещества по КПД обратимого теплового двигателя. Машина Карно может быть использована *для градуировки шкалы*, если закрепить точку таяния льда. Проведя цикл Карно между данным телом и тающим льдом и измерив соответствующие количества теплоты, можно из прямой пропорциональности теплот и температур найти абсолютную температуру (в К). С 1954 г. температура тройной точки воды (точка равновесного сосуществования льда, воды и пара) считается равной $0,01^\circ\text{C}$ (273,16 К) при давлении 6,09 гПа (4,58 мм рт.ст.), по определению X Генеральной конференции по мерам и весам.

Можно ли повысить КПД за счет уменьшения температуры холодильника? Казалось бы, напрашивается положительный ответ — ведь при $T = 0$ КПД = 1, но все газы гораздо раньше начинают сжиматься, т.е. перестают быть газами, следовательно, *абсолютный нуль температур недостижим*. Это и составляет содержание *третьего начала термодинамики*, утверждающего, что нельзя охладить вещества до температуры абсолютного нуля посредством конечного числа шагов. Понимание этого начала требует представлений об атомном строении вещества, тогда как другие начала есть обобщение непосредственного опыта и не зависят ни от каких предположений. Но: можно ли повысить КПД за счет увеличения температуры нагревателя? На этом пути развивается вся теплотехника (плаз-

менные двигатели, например, имеют температуру горячего вещества до 3000°С), потому что, когда хотят понизить температуру холодильника, обычно забывают, что на это надо затратить работу хотя бы с помощью жидкого воздуха. В холодильных установках теплота отбирается от холодного тела и отдается горячему, но только за счет работы извне.

Смысл **второго начала термодинамики** в том и состоит, что нельзя непрерывно получать работу, не имея резервуара энергии. Для Земли таким источником энергии является Солнце. За счет солнечной энергии работают и гидростанции, и солнечные батареи, и ветряные двигатели. Их работа не противоречит второму началу термодинамики. В 1851 г. Кельвин сформулировал второе начало иным образом: «Невозможен круговой процесс, единственным

результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара». Близкую формулировку дал Макс Планк: «Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом которой было бы поднятие груза за счет охлаждения теплового резервуара» (поэтому иногда говорят: «Процесс Томсона–Планка невозможен»). Клаузиус выдвинул второй постулат в виде: «Теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к телу более нагретому». Можно показать, что все эти варианты второго начала эквивалентны и следуют один из другого. Второе начало определяет новую функцию состояния — энтропия, однозначно определяющую состояние изолированной системы. Энтропия сохраняется только при равновесных обратимых процессах.

9.3. ПОНЯТИЕ «ЭНТРОПИЯ». СУТЬ СПОРА О «ТЕПЛОВОЙ СМЕРТИ ВСЕЛЕННОЙ»

Начала феноменологической термодинамики, сформулированные в середине прошлого века Клаузиусом и Кельвином, свели всю совокупность тепловых явлений в три начала без всякой модели вещества, т.е. просто описывают все явления (отсюда и термин — феноменологическая). Клаузиус не только уточнил идеи Карно, но и отказался от теории теплорода, объясняя природу теплоты в соответствии с концепцией атомизма. Важную роль в этом сыграла и новая абстрактная величина — «энтропия» (греч. *entropia* «поворот, превращение»), введенная им в 1865 г. Клаузиус математически точно определил понятие *энтропии* и показал, что в термически изолированных системах энтропия при обратимых процессах не изменяется, а при реальных и необратимых — ее изменение всегда положительно. Поэтому она является как бы мерой отклонения реальных процессов от идеальных.

Энтропия характеризует состояние системы, она сыграла в дальнейшем развитии науки фундаментальную роль. Как каждому уровню высоты над поверхностью Земли отвечает своя потенциальная энергия, так и каждому состоянию — своя энтропия. Как работа в поле тяжести не зависит от вида пути, а определяется только изменением потенциальной энергии, так и энтропия не зависит от вида процесса, определяясь только состоянием. Понятие энтропии как функции состояния было введено из рассмотрения квазистатических циклов.

Обратимся к бесконечно малому циклу Карно. Если обозначить через S сумму величин (Q/T) — приведенных теплот, то для любого обратимого процесса $S = \sum_i (Q_i/T_i) = S_1 + S_2 + S_3 + \dots = 0$, тогда как сумма количеств тепла Q не равна нулю. В результате завершения квазистатического цикла в источниках работы и теплоты происходят изменения. Между ними должны быть общие связи, выражением которых служит, с одной стороны, принцип *эквивалентности теплоты и работы*, с другой — теорема о *сумме приведенных теплот*. Рост энтропии в замкнутой системе есть *мера необратимости* какого-то процесса в ней. Всякий необратимый процесс в замкнутой системе ведет к росту энтропии. Если мы предпримем обратный ход рассуждений, то придем к формулировке второго начала о невозможности построить вечный двигатель второго рода. *Существо-*

вание энтропии доказано для обратимых процессов и выражает второе начало в наиболее общей форме.

Второе начало термодинамики претерпело определенную эволюцию — от тепловой аксиомы, выражающей опытный факт о невозможности самопроизвольного перехода теплоты от холодного тела к горячему (1850 г.), к принципу эквивалентности превращений (1854 г.) и к принципу существования и возрастания энтропии (1865 г.). Итак, *в замкнутой системе энтропия может только возрастать, что эквивалентно второму началу термодинамики*.

Клаузиус обосновал выбор термина: «Слово “энтропия” я намеренно подобрал ближе к слову “энергия”, так как обе соответствующие этим выражениям величины настолько близки по смыслу, что они, по моему мнению, требуют однородного обозначения...». Таким образом, состояние тела, независимо от способа, каким оно приходит в данное состояние, определяется энергией и энтропией. Подразумеваемая важность обоих начал термодинамики во Вселенной в целом, Клаузиус заканчивает свое исследование простыми формулировками: «1) энергия мира постоянна; 2) энтропия мира стремится к максимуму», вызвавшими много споров, получивших название «о тепловой смерти Вселенной». У Клаузиуса энтропия связана с обратимостью и необратимостью процессов, и впоследствии она стала критерием *обратимости и необратимости*. М.Планк начал свою научную деятельность с защиты диссертации, посвященной применению понятия энтропии в необратимых процессах (1879 г.). И термодинамика излучения стала мостом от классической физики к квантовой.

Основоположники классической термодинамики — Кельвин и Клаузиус — считали, что ее начала годятся для любой изолированной системы, в том числе и для всей Вселенной. Отсюда — вывод о неизбежности ее «тепловой смерти», т.е. такого состояния, когда все процессы прекратятся, и мир перейдет в состояние термодинамического равновесия. Они не находили процессов, в которых энергия могла бы повышать свое качество, считали, что все тепловые явления самопроизвольно происходят только в одном направлении: горячие тела охлаждаются, холодные — сами по себе не нагреваются, т.е. распределение энергии необратимо. Однако они отделяли это свойство мира от сохра-

нения количества энергии при всех превращениях. Второе начало термодинамики указывает естественное направление изменения распределения энергии, не зависящее от количества энергии. Идеи Клаузиуса и Кельвина носили описательный характер, но вызвали дискуссии.

Так, Ранкин выдвинул *гипотезу реконцентрации энергии*: Вселенная окружена особой эфирной оболочкой, обладающей свойствами зеркальной поверхности, поэтому энергия имеет возможность не рассеиваться, а концентрироваться где-то в каких-то центрах мира, где температура будет повышаться. Возникшая разность температур вновь нарушит тепловое равновесие. Но Клаузиус показал, что никакое вогнутое зеркало не может дать температуру выше той, которая была присуща телу. Папа Пий XII считал, что: «Закон энтропии, открытый Рудольфом Клаузиусом, дал нам уверенность в том, что в замкнутой материальной системе в конце концов процессы в макроскопическом масштабе когда-то прекратятся. Эта печальная необходимость свидетельствует о существовании Необходимого Существа». Ф.Энгельс расценил выводы Клаузиуса как доказательство необходимости внешнего толчка или сотворения мира, как противоречие закону сохранения энергии, поскольку второе начало говорит о качественном уничтожении энергии. Он указывал, что «вопрос будет решен окончательно лишь в том случае, если будет показано, каким образом излученная в мировое пространство теплота может быть снова используемой». Его «Диалектика природы» построена на идее круговорота энергии во Вселенной.

Термодинамические законы, основанные на опыте, говорят, что энергия превращается из одной формы в другую так, чтобы энтропия возрастала (поэтому их и называют «царица мира и ее тень»). Все виды энергии удобно классифицировать в порядке возрастания их «ценности». Высший класс присвоить тем из них, которые способны превращаться в большее число форм энергии, т.е. им присущи минимальные энтропия и хаос. Низший класс остается теплу, энергетические превращения которого ограничены принципом Карно. Самопроизвольные превращения энергии, сопровождающиеся ее деградацией и ростом энтропии, представляют собой последовательные преобразования от высших форм к низшим. Химическая энергия занимает средний класс. Направление потока превращения энергии во Вселенной задается главным образом гравитационными взаимодействиями. Они преобладают в космосе количественно и имеют практически нулевую энтропию, поэтому КПД гидроэлектростанций во много раз больше, чем тепловых.

Но почему же гравитационная энергия до сих пор не превратилась в свет и тепло? Больцман считал гипотезу «тепловой смерти Вселенной» Клаузиуса–Томсона плодом недоразумения. Он признал вероятностный смысл второго начала термодинамики и распространил его на Вселенную: «Если смотреть на мир, как на нечто бесконечное, то возникают опять те же самые противоречия, какие получались, когда бесконечное считалось только пределом». Больцман нарисовал картину огромного космического пространства, возможно, даже бесконечного во времени и пространстве, полная энтропия которого достигла своего

максимального значения, но в котором имеются области, где в данный момент энтропия уменьшается. «Данный момент» может длиться миллиарды лет, а «данная область» может насчитывать миллиарды галактик. Возможно, что та ничтожно малая область из этого бесконечного пространства, где находимся мы, и есть одна из областей гигантской флуктуации. В некоторый момент в прошлом энтропия уменьшилась, а сейчас возрастает. В вечном и бесконечном потоке материи в некотором месте появилась зона упорядоченности, а ныне порядок постепенно разрушается. Где-то процессы могут идти в обратном порядке, тогда и время там должно идти в обратном направлении, поскольку рост энтропии связан со стрелой времени. Но в этом случае и наше понимание причинности должно измениться на обратное, выходит, в тех областях пространства и времени следствие предшествует причине?! Больцмана это не смущало, он находил, что живое существо всегда будет определять путь от прошлого к будущему как от события маловероятного к более вероятному и не отличит нарушения, как мы не отличаем верха и низа в пространстве. Эта идея Больцмана получила название *флуктуационной гипотезы*: на фоне всеобщей тепловой смерти возникают и эволюционируют отдельные миры, переходя из маловероятных состояний в более вероятные, что обуславливает протекание необратимых процессов.

Астрофизические наблюдения в области эволюции звездных ассоциаций показывают, что процесс образования звезд не может быть сведен к спонтанным флуктуациям, что одни формы энергии непрерывно превращаются в другие. И хотя рамки современных наблюдений позволяют охватить огромное число галактик и они достаточно изолированы друг от друга, пока не наблюдали галактики в состоянии тепловой смерти. Это означало бы необходимость расширить рамки флуктуации, где находимся мы, до размеров всей наблюдаемой Вселенной. По этому поводу Ландау и Лифшиц высказали замечание, что «неизмеримо большей вероятностью обладала бы флуктуация в размере одной только солнечной системы, что было бы достаточно для обеспечения существования наблюдателя». Но флуктуационная гипотеза Больцмана была попыткой объяснить существование необратимых процессов во Вселенной на основе обратимых элементарных законов природы. Русский физик, астроном и метеоролог А.А.Фридман в 1922 г. утверждал, что, если уравнения теории тяготения Эйнштейна применимы ко Вселенной, то она должна меняться со временем — либо расширяться, либо сжиматься, либо пульсировать. Хотя модели расширяющейся Вселенной называют моделями Фридмана, но он не обсуждал начальный момент, считая, что для этого недостаточно данных. В 30-е годы английские астрофизики А.Милн и М.Мак-Кри показали, что и в теории Ньютона можно получить режим сжатия и разрежения мира.

Оценки, проведенные в XX в. П.Дираком, Дж.Уилером, Р.Фейнманом и Р.Пенроузом с учетом собственных гравитационных полей космических тел по строгим формулам общей теории относительности, показали, что в момент, когда сжатие прекращается и начинается разрежение, общекосмическое время поворачивает вспять, и на мгновение могут потухнуть все звезды. Такой вывод должен был

служить доказательством теории «пульсирующей Вселенной», одна из теорем которой утверждает, что в этот момент меняется и знак материи. В 60-е годы А.Д.Сахаров выдвинул гипотезу, по которой до момента рождения Вселенной существовала анти-Вселенная, где все было зеркальным отражением нашего мира, со временем она постепенно сжалась в массу сверхплотного вещества, ставшего нейтральным. Из этой массы при сверхвысоких температуре и плотности возникла наша Вселенная, поскольку в тот момент образовалось больше протонов и нейтронов, чем антипротонов и антинейтронов, поэтому нам неизвестны антиматерия и антигалактики.

В 1922 г. немецкий ученый В.Нернст обратился к *явлению радиоактивности*, которое «познакомило нас с энергией такого могущества, о котором мы ранее не имели представления». Он считал, что тепловая смерть Вселенной невероятна, будут образовываться атомы с высоким атомным номером, они будут скапливаться в холодные звезды, которые за счет высокой радиоактивности постепенно начнут разогреваться и превратятся в раскаленные звезды. Так во Вселенной возникнут центры концентрации энергии, которые будут противодействовать тепловому равновесию. Р.Милликен основывал подобные выводы на свойствах *космических лучей*, под действием которых из протонов и электронов образуются атомы гелия, кремния, железа, кислорода, т.е. происходит пополнение радиации, непрерывно испускаемой звездами. В настоящее время открыты шесть необычных объектов, каждый из которых обладает достаточной мощностью, чтобы быть источником космических лучей. Это сверхновые (взрывающиеся) звезды, радиогалактики (гигантские облака истекающих из них электронов, невероятно богатых энергией), галактики Сейферта (галактики с очень ярким и турбулентным ядром, описанные в 1943 г. американским астрономом К.Сейфертом), источники рентгеновского излучения, пульсары и квазары, выделяющие огромные количества энергии. В ядрах галактик и квазаров столь необычные условия, что на них невозможно распространять сложившиеся представления, т.е. необходимы новые модели.

Идеи непрерывного творения материи возникали неоднократно. Так, в 1948 г. у группы ученых Кембриджского

университета Г.Бонди, Т.Голда и Ф.Хойла родилась гипотеза «стационарной Вселенной». Они оценили число порожденных за 100 лет из «ничего» атомов водорода для восполнения убыли материи из-за разбегания — 1 атом в кубе с ребром 100 м (!), т.е. за 5 миллиардов земных лет должно было образоваться всего 4 кг атомов. Однако открытие в 1865 г. однородно распределенного в пространстве «реликтового излучения» с температурой 2,7 К, истолкованного как оставшееся от Большого Взрыва, ослабило интерес к теории стационарной Вселенной. Пока неясно, существует ли скрытая полевая форма материи, непрерывно порождающая известные нам формы.

К наиболее важным из проблем термодинамики Вселенной относятся теория звездных атмосфер и теория внутреннего строения звезд. Излучение, рождающееся в недрах звезды, покидает ее фотосферу, достаточно тонкую область звездного тела (так, фотосфера Солнца занимает только несколько сотен километров по радиусу). В этой области происходит лучистый перенос энергии, который изучается в теории и сравнивается с данными наблюдений по распределению энергии в непрерывном спектре Солнца и звезд. Предполагается, что атмосферы спокойных звезд находятся в состоянии лучистого равновесия, т.е. каждый элемент объема излучает столько энергии, сколько поглощает. Кроме того, считается, что вещество в элементарном объеме находится в термодинамическом равновесии. Равновесное излучение в полости определяется только абсолютной температурой, его интенсивность не зависит ни от свойств полости, ни от места, ни от направления. Для него выведены законы Вина, Кирхгофа, Стефана-Больцмана. Что касается звездных атмосфер, то здесь ситуация несколько сложнее, хотя и можно допустить локальность равновесного излучения.

Особый раздел современной термодинамики составляет релятивистская термодинамика, лежащая в основе современной космологии. На обобщенных термодинамических принципах построены теория процессов в таких экзотических объектах, как «черные дыры», и модель эволюции Вселенной, в которую необходимо включить и открытое Хабблом красное смещение в спектрах галактик как одно из доказательств расширения Вселенной.

9.4. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ И ВЕРОЯТНОСТЬ, ПРИНЦИП БОЛЬЦМАНА

Термодинамика после установления закона сохранения и превращения энергии, включила в себя изучение превращения энергии во всех ее формах. Ее достоинство в том, что она позволяет рассмотреть общие свойства систем при равновесии и общие закономерности установления равновесия, получить многие сведения о веществе, не зная в полной мере его внутреннюю структуру. Ее законы применимы к любому веществу, к любым системам, включающим электрические и магнитные поля и излучение, поэтому они вошли в физику газовых и конденсированных сред, химию и технику, необходимы в геофизике и физике Вселенной, используются в биологии и управлении процессами.

Термодинамика основана на трех-четырех утверждениях, которые включили в себя огромный опыт человечества по превращению энергии и называются *началами*

термодинамики. Исторически первым установлено второе начало, потом — первое и третье, а последним — нулевое.

Нулевое начало — это уточнение понятия «*температура*». Тепловое равновесие существует в том случае, если две системы приведены в тепловой контакт, но результирующие потоки энергии отсутствуют. Для количественной оценки вводится понятие температуры — если системы имеют одинаковую температуру, то системы находятся в *тепловом равновесии* друг с другом.

Первое начало — это закон сохранения и превращения энергии в изолированной системе, утверждение существования *внутренней энергии*, поэтому его называют *принципом энергии*. Энергия утвердилось как основная сохраняющаяся величина в 1847 г., когда договорились о терминах Кельвин и Джоуль. Теплота и работа характеризуют способы передачи энергии.

Второе начало устанавливает направленность всех процессов в изолированных системах. И, хотя полное количество энергии сохраняется в любом процессе, распределение энергии изменяется необратимо. Второе начало называют *принципом энтропии*. Теплота переходит самопроизвольно только от более нагретых тел к телам, менее нагретым. При этом для направления, в котором происходит изменение распределения энергии, оказывается не важно само количество энергии. Это начало проявилось при преобразовании теплоты в полезную работу, оно сыграло важнейшую роль в преобразовании энергии, запасенной в топливе, в движущую силу. Ограничения, устанавливаемые вторым началом, показали, что трудно выделить *упорядоченное движение из неупорядоченного*. В формулировке Кельвина второе начало таково: «Невозможен процесс, единственный результат которого состоял бы в поглощении теплоты от нагревателя и полного преобразования этой теплоты в работу».

Третье начало определяет свойства веществ при очень низких температурах, утверждая, что нельзя охладить тела до температуры абсолютного нуля за конечное число процессов. Третье начало выделяется из остальных, поскольку *предполагает атомное строение вещества*. Остальные начала являются обобщением опытных данных и не содержат сведений о какой-либо структуре вещества.

Сначала *энтропию* определили как величину, которая возрастает при нагревании системы (убывает — при охлаждении), но остается неизменной при совершении над системой работы. При этом изменение ее $\Delta S = (Q_1/T)$ тем выше, чем температура системы. При нагревании сообщенная теплота $Q > 0$, т.е. и $\Delta S > 0$. Если энергия сообщается только путем работы, то $Q = 0$ и энтропия не меняется. Если нагревание происходит при высокой температуре, то знаменатель оказывается большим, и при заданном Q изменение энтропии незначительно.

С течением времени термодинамика превратилась в стройную теорию, позволив анализировать разнообразные системы в состоянии теплового равновесия и равновесные (или обратимые) процессы. В начале XX в. Гиббс разработал метод термодинамических потенциалов, в котором состояние системы характеризуется той или иной функцией: внутренней энергией, энтальпией, свободной энергией (или потенциалом Гиббса). Термодинамика, безусловно, строилась как динамическая теория, поскольку все устанавливаемые ею связи носили однозначный характер и все описываемые ею явления объясняются как абсолютно необходимые, и, как в механике, случайность не входит в теорию.

Энтропия — мера беспорядка в системах, как и сами понятия порядка и беспорядка, приобретают фундаментальное значение, более глубокое толкование и понимание смысла энтропии и начал термодинамики было дано с позиций *статистической физики*. И каждое макроскопическое состояние газа может быть получено с определенной вероятностью, т.е. вероятность может быть вычислена через *вероятности микросостояний*. Термодинамической вероятностью называют число микросостояний, которыми может быть осуществлено данное макроскопическое состояние. Замена одной микрочастицы на дру-

гую из-за их неотличимости не меняет макроскопического состояния, хотя с микроскопической точки зрения ситуация изменилась. Свойства термодинамической вероятности похожи на свойства энтропии — обе максимальны в состоянии равновесия, и переход к равновесию связан с их ростом. Энтропия является *аддитивной* (лат. *additivus* «придаточный») величиной и, сопоставляя это ее свойство с теоремой умножения вероятностей, можно найти функциональную зависимость между ними: $S = k \ln W$. Это известное выражение определяет **принцип Больдмана**.

Больдман считал *атомистическую гипотезу* обоснованной. Бесконечное или огромное число частиц делает невозможным механическое, а требует статистического описания. Математическим инструментом статистики является исчисление вероятностей. Больдман показал, что поскольку в основе термодинамических процессов лежат обратимые кинетические процессы, то необратимость в термодинамике, измеряемая энтропией, не может быть абсолютной. Поэтому и энтропия должна быть связана с вероятностью осуществления данного микросостояния.

Понятие вероятности, неявно использованное Максвеллом, Больдман применил для преодоления трудностей, связанных с пониманием второго начала термодинамики и гипотезы «тепловой смерти Вселенной» (1878 г.). Вершиной творчества Больдмана явилось установление связи между энтропией и термодинамической вероятностью. Планк записал эту связь через введение константы $k = (R/N)$, которую назвал *постоянной Больдмана*, в виде простой формулы: $S = k \ln W$.

Эйнштейн возвел эту формулу в «принцип Больдмана». Итак, необратимый процесс есть переход из менее вероятного состояния в более вероятное, а логарифм изменения вероятности состояния с точностью до постоянного множителя совпадает с изменением энтропии состояния. Эту связь Больдман установил сначала для идеального газа.

Энтропия является *мерой неупорядоченности* системы многих частиц. Чем выше степень беспорядка в координатах и скоростях частиц системы, тем больше вероятность того, что система будет находиться в состоянии хаоса. Формула Больдмана $S = k \ln W$ может рассматриваться как определение *энтропии*.

Так как S возрастает с ростом W , и все системы стремятся перейти в более вероятное состояние, то и изменение энтропии $S_2 - S_1 = k(\ln W_2 - \ln W_1) = k \ln (W_2/W_1) > 0$. При расширении газа в пустоту (W_2/W_1) было пропорционально изменению объемов в степени числа частиц N , поэтому для изменения энтропии можно записать $Nk \ln (V_1/V_2)$. Умножая и деля это выражение на T , получим: $S = NkT \ln (V_1/V_2)/T$. Но так как $dS = dQ/T$, то в числителе формулы для изменения энтропии стоит подводимое к системе по обратимому пути тепло.

Рассмотрим два одинаковых по массе m и удельной теплоемкости c тела, которые первоначально находились при разных температурах T_1 и T_2 . После установления между ними теплового контакта в результате перехода тепла dQ их температуры изменились на $dT - (T_1 - dT_1)$ и $(T_2 + dT_2)$. Поскольку $dQ = -mc dT_1$ и $dQ = +mc dT_2$ равны, то и $dT_1 = -dT_2 = dT$.

Если $dS = dQ/T$, для каждого процесса можно записать: $dS_1 = -mc dT/T_1$ и $dS_2 = mc dT/T_2$.

Суммарное изменение энтропии равно: $dS = mc dT(1/T_2 - 1/T_1)$, а температуры $-dT = (T_1 T_2 / mc) (dS / (T_1 - T_2))$. Так как $dS > 0$, то и $dT > 0$ или $(T_1 - T_2) > 0$.

Это значит, что при $T_1 > T_2$ тепло будет самопроизвольно перетекать от тела с более высокой температурой к менее нагретому телу. И при увеличении энтропии замкнутой системы, содержащей тела с разными температурами, рост энтропии сопровождается потерями механической работы в количестве, равном величине dS , умноженной на температуру более холодного тела. Можно ли уменьшить энтропии? Второе начало термодинамики применимо только к замкнутым системам, при совместном рассмотрении всех частей системы энтропия не может уменьшаться.

Деятельность человека приводит к локальному изменению — уменьшению энтропии. Холодильники и тепловые

насосы перекачивают тепло от холодного тела к более горячему за счет траты энергии извне, но в полной системе энтропия может только расти. Больцману удалось установить в теории газов основное различие между тепловыми и механическими явлениями — механические явления обратимы, и знак времени в них не играет никакой роли, а тепловые явления так же необратимы, как и выравнивание двух температур. Если теория газов, основанная на механике, приводит к необратимым явлениям, то это связано с гипотезой молекулярного беспорядка, и аналогия с ростом энтропии здесь очевидна. Если обратить время, энтропия замкнутой системы начнет расти, поэтому говорят, что *направление времени задается вторым началом термодинамики* и с ним связана *стрела времени*.

В настоящее время понятие энтропии получило дальнейшее развитие в теории информации, лежащей в основе кибернетики.

9.5. ПОНЯТИЯ ПРОСТОЙ И СЛОЖНОЙ, РАВНОВЕСНОЙ И НЕРАВНОВЕСНОЙ СИСТЕМЫ. ПРОЦЕССЫ ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА, ПРИНЦИПА ЛОКАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

Положению равновесия с молекулярно-кинетической точки зрения отвечает состояние максимального хаоса в *изолированной системе*. По законам термодинамики, полученным как обобщение опыта, такая система вернется в положение равновесия; при удалении от равновесия ее состояние становится все более неустойчивым, и даже малые изменения какого-либо параметра могут перевести систему в новое состояние. Так термодинамика стала фактически термостатикой, все процессы имели обратимый характер. Но требовались обобщения теории на процессы необратимые и на *системы открытые*, которые могут обмениваться с окружающей средой веществом или энергией. Таких обобщений требовала и развивающаяся техника, и многочисленные приложения в физике, химии, биологии.

Учет зависимости параметров от времени и положения при неоднородностях приводил к движению в системах. У. Томсон начал развивать *динамическую теорию теплоты* (1854 г.), когда французский физик Ж. Пельтье предсказал эффект, названный *эффектом Томсона*: при прохождении тока через неравномерно нагретый проводник может наблюдаться или поглощение, или выделение тепла, причем знак зависит от направления тока. Хотя оба эти явления меняют знак при изменении направления тока (обратимы), они сопровождаются *необратимым процессом* — выделением тепла вдоль неравномерно нагретой цепи и *теплопроводностью*. Томсон ввел неравенство во второе начало термодинамики, и связал коэффициенты тепла с температурными коэффициентами электродвижущей силы. Так появилась теория *термоэлектричества*. Расширяли границы применения второго начала Гельмгольц (1878 г.) и Нернст (1889 г.). Онсагер обобщил в 1931 г.: при небольших отклонениях от термодинамического равновесия потоки тепла и вещества могут быть выражены как *линейные функции градиентов температур и химических потенциалов* различных компонентов системы.

Принцип линейности Онсагера: потоки вызываются *обобщенными термодинамическими силами* (градиентами температуры или концентрации), их связывают термодинамические уравнения движения. Законы Фика (*для диффузии*) и Фурье (*для теплопроводности*) имеют похожий вид и определяются соответственно градиентами концентрации и тепла. Принцип позволил рассмотреть единым образом все *явления переноса*. Если в системе имеются флуктуации, то линейный закон приобретает более общее значение. Принцип микроскопической обратимости Онсагер применил к флуктуациям, считая характер их затухания макроскопическим, и пришел к *равенству средних скоростей* в прямом и обратном направлениях, а потом и к *соотношениям взаимности* между коэффициентами. На основе его теории в 40–50-е годы разрабатывались проблема разделения изотопов методом термодиффузии, вопросы физики плазмы, биологии и др. В 1968 г. за создание основ *неравновесной термодинамики* Онсагер стал лауреатом Нобелевской премии по химии.

На выводе уравнений для скорости изменения энтропии развивалось другое направление термодинамики необратимых процессов. Австрийские ученые Г. Яуманн и Е. Лор получили *уравнение непрерывности энтропии*, обобщив (1911 г.) подход, развитый в 1874 г. Умовым для потока энергии. Но из-за несохранения энтропии, уравнение содержало член, отвечающий за *скорость рождения энтропии*. Баланс в том, что изменение энтропии в некотором объеме приравнивалось сумме производства энтропий — воспроизведенной и привнесенной в данный объем.

В гигантской фабрике естественных процессов принцип энтропии занимает место директора, который предписывает вид и порядок исполнения всех сделок. Закон сохранения энергии играет роль бухгалтера, который приводит в равновесие дебет и кредит. Для биологических систем, принципиально *открытых*, такой подход оказался очень плодотворным.

Исследование открытых систем возможно на основе только термодинамики необратимых процессов: *в них энтропия может возникать и переноситься, тогда как возрастание энтропии пригодно только для изолированных систем.* Внутренняя релаксация противостоит процессам, нарушающим равновесие. В разреженных газах — это процессы столкновений. Если возмущающие процессы менее интенсивны, чем релаксационные, то говорят о *локальном равновесии*, существующем в малом объеме. При этом не обязательно, чтобы в других частях системы состояние было близко к равновесию. Например, газ находится между неодинаково нагретыми плоскостями. Процесс теплопроводности крайне медленный, газ находится в неравновесном состоянии, а где-то в системе будет малая область с локальным равновесием. Эту идею высказал И.Пригожин, и она позволила описывать в этой области состояния теми же параметрами, как и при равновесии.

Понятие локального равновесия вводят при медленном изменении внешнего воздействия и для времен, больших характерного времени элементарного релаксационного процесса, формирующего равновесие. Эти условия — из статистического рассмотрения процессов. Принцип локального равновесия ограничивает число систем, доступных термодинамическому рассмотрению. Есть также взаимное влияние друг на друга одновременно происходящих необратимых процессов. Существует *принцип симметрии Кюри*, который в формулировке Вейля гласит: «Если условия, однозначно определяющие какой-либо эффект, обладают некоторой симметрией, то результат их действия не нарушит эту симметрию». Поэтому формально все неравновесные процессы разделяют на *скалярные* (химические реакции), *векторные* (теплопроводность, диффузия) и *тензорные* (вязкое трение). В соответствии с принципом симметрии величины *разных размерностей не могут быть связаны друг с другом*. Так, скалярная величина (химическое сродство) не может вызывать векторный поток (теплопроводность).

Сложные системы описываются большим числом переменных и большим числом связей между ними. В сложной системе появляются свойства, которых нет у ее частей, их называют *эмерджентными*, они есть следствие целостности системы. На пути любой достаточно сложной системы к равновесию, которое характеризуется максимумом энтропии, встречаются обстоятельства, не позволяющие это сделать. В качестве таковых выступают граничные условия. Если они постоянны, например, поддерживают ΔT на границах, то переменные состояния стремятся асимптотически к независимым от времени величинам, достигая *квазистационарного* или *стационарного состояния*.

Стационарные состояния в открытых системах австрийский (впоследствии канадский) биолог-теоретик Л.Берталанфи назвал *текущим равновесием*. Он ввел термин «открытая система», построил теорию биологических организмов на базе обобщений физической химии, кинетики и термодинамики, назвав ее «*теорией открытых систем*». Берталанфи ввел формальное выражение таких важных свойств *системных параметров*, как сумма, целостность, организация, рост, конкуренция и т.д., широко применяя аппарат дифференциальных уравнений. Понятие

локального, или текущего, равновесия он ввел для живого организма — неравновесной открытой системы. Такие состояния, близкие к равновесным, встречаются в различных областях естествознания.

Производство энтропии минимально в стационарных неравновесных состояниях: скорость приращения энтропии $\sigma = dS/dt$ при двух обобщенных силах X_1 и X_2 , соответствующих потокам I_1 и I_2 , определится суммой $I_1 \cdot X_1 + I_2 \cdot X_2$. При равновесии и в отсутствие потоков, энтропия не меняется, $\sigma = 0$. В стационарном неравновесном состоянии при фиксированной X_1 , соответствующей градиенту температуры, исчезает поток I_2 , связанный с другой силой, т.е. уменьшается сумма или производство энтропии. *Теорема о минимуме производства энтропии* в стационарном неравновесном состоянии, отражающая внутреннюю устойчивость неравновесных систем, ее своеобразную инерционность, сформулирована Пригожиным. Если какие-то граничные условия не позволяют системе прийти в устойчивое равновесие, где $\Delta S = 0$, она придет в состояние с минимальным производством энтропии. Этот вывод годится в случае, когда феноменологические коэффициенты (вязкости, диффузии, теплопроводности) не зависят от параметров среды, т.е. при небольших значениях градиентов и линейных зависимостей между потоками и термодинамическими силами.

Устойчивость стационарных состояний с минимальным производством энтропии связана с принципом, предложенным в 1884 г. Ле Шателье и обобщенным в 1887 г. с точки зрения термодинамики немецким физиком Карлом Брауном. Принцип Ле Шателье–Брауна означает, что система, выведенная внешним воздействием из состояния с минимальным производством энтропии, стимулирует развитие процессов, направленных на ослабление внешнего воздействия. В самом деле, внешнее воздействие меняет фиксированные термодинамические силы (ΔT , например), система откликнется на это воздействие изменением потока, связанного с этой силой (потока энергии). Вторая нефиксированная сила (например, градиент концентраций) может испытывать флуктуации. Они увеличат производство энтропии по отношению к ее минимуму в стационарном состоянии. В результате система перейдет в новое стационарное состояние, в котором изменение потока энергии будет меньше первоначального. В 80-е годы принцип был обобщен профессором МГУ Е.В.Ступоченко. В стационарных неустойчивых состояниях, когда фиксирована одна из термодинамических сил, вторая может испытывать флуктуации. При этом производство энтропии возрастет, и система может выйти из стационарного состояния. Однако, в силу самопроизвольного стремления в состояние с наименьшим производством энтропии, она может вновь перейти в стационарное состояние.

Общая теория устойчивости состояний была разработана А.М.Ляпуновым. Устойчивые состояния не теряют своей устойчивости при флуктуациях физических параметров, система за счет внутренних взаимодействий способна погасить возникающие флуктуации. Неустойчивые системы, наоборот, при возникновении флуктуаций способны усиливать их, и в результате такого нарастания амплитуд возмущений система уходит из стационарного

состояния. Критерием эволюции при этом является величина $(d\sigma/dt) < 0$, которая указывает направление развития физической системы к устойчивому стационарному состоянию. Процессы, о которых здесь шла речь, происходят достаточно медленно, так что на каждом этапе достигается равновесие.

Функция диссипации — это прирост энтропии за единицу времени в единице объема в открытых системах, а системы, в которых функция диссипации отлична от нуля, названы *диссипативными*. В таких системах энергия

упорядоченного движения переходит в энергию неупорядоченного движения и, в конечном счете, в тепло. Практически во всех системах трение и прочие силы сопротивления приводят к диссипации энергии. Принцип локального равновесия и теорема о минимуме производства энтропии в равновесных состояниях были положены в основу *термодинамики необратимых процессов*, а их автор, И.Р.Пригожин, стал лауреатом Нобелевской премии по химии за 1977 г.

Глава 10. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ МАТЕРИИ

10.1. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Волновая теория света сложилась при объяснении явления интерференции. Юнг понял, что нельзя ожидать интерференционных эффектов от двух независимых источников света и поставил свой знаменитый опыт с двумя щелями (1807 г.). Он пропустил луч света через узкое отверстие, сделав его расходящимся. Затем с помощью полоски бумаги разделил световой пучок на два и обнаружил на экране равноотстоящие полосы: белую — в центре, окрашенные — по краям. При сдвигании полоски к краю первичного пучка полосы исчезали. Юнг начал с утверждения, что две волны можно заставить интерферировать, если они когерентны, и показал, что все части фронта волны, выходящей из малого отверстия, можно рассматривать как почти когерентные.

Исследованием *интерференции поляризованных волн* занялись Френель и Араго. Они установили, что два луча, поляризованные в параллельных плоскостях, интерферируют, а в перпендикулярных — нет. Аналогии с акустикой тут не могло быть. И Френель предположил, что световые волны *поперечны*, а явление поляризации свойственно только поперечным волнам. Но тогда тончайший и невесомый эфир должен быть и твердым, так как поперечные волны распространяются лишь в твердых телах. Гипотеза была столь смелой, что Араго отказался подписаться под статьей, в которой она излагалась. Френель объяснил в 1821 г. с волновой точки зрения на свет явления двойного лучепреломления и поляризации света. Он начал с описания дифракции и интерференции с помощью принципа Гюйгенса. В опыте с двумя зеркалами, расположенными под углом, он получал с помощью одного источника два мнимых и всегда когерентных (лат. *cohaerentia* «сцепление, связь») источника света. По его теории дифракции получалось, что внутри тени от непрозрачного диска должно быть светлое пятно. На замечание Пуассона, что это противоречит здравому смыслу, Френель ответил, что здравый смысл подчас ошибается, и продемонстрировал появление светлого пятна внутри тени. За эту работу Парижская академия присудила Френелю премию и избрала его своим действительным членом.

Механическая модель света, созданная Френелем, основана на поперечности световых волн, распространяющихся в упругом эфире. Скорость распространения колебаний в среде зависит от длины волны, и при опреде-

ленной длине волны она тем меньше, чем больше преломление среды. Отсюда — преломление света и дисперсия. Все явления поляризации у Френеля прекрасно соответствовали эксперименту и объяснялись как частный случай сложения скоростей. Так пришли к анализу сил, возникающих в упругой среде из-за малых молекулярных перемещений, и это дало основную идею для развития *теории упругости*, созданную Коши, Гринном, Пуассоном и Г.Ламе. Упругий эфир не увлекается движущимися телами, а проходит сквозь них, и коэффициент преломления определяется, по Френелю, как квадратный корень из отношения плотности эфира в веществе к его плотности вне вещества. *Проблема увлечения эфира* при движении в нем тел долгое время находилась в центре всех проблем понимания процессов во Вселенной.

Явление аберрации (лат. *aberratio* «заблуждение, уклонение»), когда координаты всех звезд в течение года смещаются и описывают эллипсы разной вытянутости в зависимости от углового расстояния до плоскости эклиптики, было открыто английским астрономом Дж.Брадлеем в 1728 г. и объяснялось согласно эмиссионной теории света движением Земли по орбите. С принятием волновой теории требовалось ввести гипотезу о покоящемся эфире, способном проходить сквозь движущиеся тела. Френель принял, что меняется *не упругость эфира*, а его *плотность*. В 1823 г. он на основе закона сохранения энергии и своей гипотезы объяснил, что движение, параллельное границе раздела, в обеих волнах одинаково, и вывел все формулы физической оптики. При полном отражении он использовал мнимые величины, что соответствовало изменению фазы в отраженной волне. Итак, начало современной физической оптике положил Френель, она основана на представлении о свете как о поперечной волне, волне электромагнитной.

В электронной теории Г.Лоренц синтезировал идеи *теории поля и атомистики*. Он обобщил формулу Френеля для показателя преломления света, выражающегося через отношение скоростей света в средах, для частично увлеченного телом эфира. Эта скорость в движущемся теле получалась равной $v = v_0 + (1 - (1/n))u$, где v_0 — скорость света в покоящемся теле, u — скорость движения тела, $(1 - (1/n))$ — коэффициент увлечения, введенный Френелем в теории аберрации и подтвержденный опытами Физо, Майкельсона и Морли. Проблема увлечения эфира движе-

нием, проблема его странных свойств привела к отказу от эфира и к созданию *специальной теории относительности*.

Спектр — это совокупность значений какой-либо величины, характеризующей систему или процесс. В физике используют частотный спектр колебаний — электромагнитных или акустических. Спектр энергий, импульсов или масс — также широко распространены. Спектр может быть дискретным или непрерывным (сплошным).

Электромагнитные волны длиной от 10 до 100 м зарегистрировал Г.Герц с помощью искрового разряда. Он сконструировал передатчик, где между шариками проскакивала искра, названный «диполем Герца». Но искра — высокочастотный разряд переменного тока, т.е. в промежутке между шариками устанавливалось переменное электрическое поле. Герц исследовал свойства поля — прямолинейность распространения, отражение, преломление и скорость возникающих волн. Эксперименты показали, что волны могут быть иметь разную длину (или частоту) в зависимости от способа возбуждения колебаний электрических зарядов, а скорость волн оказалась равна скорости света.

Уже давно высказывались предположения о *связи теплового излучения и света*. Швейцарский химик М.А.Питке рассматривал тепловое лучеиспускание с помощью двух вогнутых сферических металлических зеркал. Он помещал в фокусе одного зеркала тело (нагретое или охлажденное), а в фокусе другого зеркала — термометр, и обнаруживал изменение показаний термометра. Рассуждения его соотечественника П.Прево о дискретной природе «лучистого теплорода» оказались плодотворными в электронной теории металлов, в физической и химической кинетике, в законах теплового излучения, позволили понять многие процессы природы. Так, после введенного им понятия *подвижного равновесия* стало понятно, что лучеиспускание и лучепоглощение протекают одновременно и независимо друг от друга, а температура только отражает связь между этими процессами. Через сто лет идеи Прево «проросли» в законах теплового излучения Кирхгофа, Стефана–Больцмана, способствовали идее Планка о введении кванта действия.

Инфракрасное излучение открыл в 1800 г. У.Гершель, исследуя равномерность распределения тепла по солнечному спектру. Перемещая термометр вдоль спектра, он обнаружил, что максимум температуры приходился на область далее красного края видимого излучения (отсюда и название). Исследовав его, Гершель показал преломление невидимого теплового излучения Солнца в линзах. Итальянский экспериментатор М.Меллони, установив, что эти невидимые лучи ведут себя так же, как и свет, приступил к изучению поглощательной и излучательной способностей разных тел. Затем Тиндаль обнаружил сильное поглощение тепловых лучей водяным паром, что оказалось чрезвычайно важным для *метеорологии*. С помощью нового прибора — *болотетра* — было установлено, что максимум солнечного тепла приходится скорее на оранжевую область спектра, а не инфракрасную, что инфракрасное излучение достаточно легко проходит через земную атмосферу и т.д.

Ультрафиолетовое излучение, преломляемое призмой сильнее чем фиолетовое, было открыто немецким физиком И.Риттером (1802 г.). Он начал исследовать химическое действие разных участков спектра солнечного света и обнаружил, что химическое действие света усиливается при перемещении в область более коротких длин волн и становится максимальным за сине-фиолетовой областью.

Новые открытия способствовали появлению *фотографии*. Через год после сообщения Дагера о получении им изображений на металле (1839 г.) Дрейпер сфотографировал Луну, а затем темные линии в спектре Солнца — фраунгоферовы линии, что дало возможность создать более полную картину о составе земной и солнечной атмосферы.

Электромагнитные волны с частотами до 10^{12} Гц позволяют получить электронные методы. В диапазоне радиоволн работают радиовещание, телевидение, воздушная и морская связь, любительские радиостанции. Радиолокация использует микроволновый диапазон.

Частоты рентгеновского излучения лежат выше ультрафиолетового диапазона. Вильгельм К.Рентген, сторонник взглядов Герца и Ф.Ленарда, приступил к изучению катодных лучей, чтобы доказать их волновую природу. Вскоре он заметил, что фотопластинки, находившиеся вблизи разрядной трубки и защищенные черной бумагой, оказались засвеченными. Это не могло быть действием катодных лучей, поскольку они не могли выйти наружу. Замена бумаги черным картоном ничего не меняла, какое-то излучение проходило через любые преграды, хотя его проникаемость убывала с увеличением толщины защитного материала. «Если держать руку между разрядной трубкой и экраном, то видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний руки», — напишет Рентген в 1895 г. Это было первое в мире *рентгеноскопическое исследование*.

Новое излучение, которое Рентген назвал X-лучами, не преломлялось, не испытывало отражения, не фокусировалось линзами и распространялось прямолинейно. Как и катодные, X-лучи вызывали флуоресценцию, но, в отличие от них, не отклонялись магнитным полем и возникали в точке, куда попадали катодные лучи. Рентген находил в них сходство со светом и предположил, что они представляют собой продольные колебания эфира. Он активно распространял информацию о X-лучах, и они стали широко применяться в медицине и хирургии, хотя тогда экспозиция занимала почти 20 мин. За свое открытие Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике в 1901 г. Какова же природа этих лучей? В 1899 г. нидерландские физики Г.Хага и К.Х.Винд обнаружили слабую дифракцию X-лучей при пропускании их через очень узкую щель. Они оценили длину волны рентгеновского излучения в одну стомиллионную сантиметра, или 1 ангстрем, тогда как видимый свет имеет длины волн порядка нескольких тысяч ангстрем.

Ангстрем — внесистемная единица длины, введенная шведским физиком и астрономом Андерсом Йонасом Ангстромом (1814–1874), применяется в оптике, атомной физике, физике твердого тела и т.д. Обозначается начальной буквой фамилии ученого в шведском написании — Angstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м} = 10^{-8} \text{ см} = 0,1 \text{ нм}$).

Рентгеновское излучение является поперечной волной. Это доказал, установив в 1904 г. *поляризацию лучей*, английский физик Ч.Баркла. Ученику Планка, М.Лауэ пришла идея в качестве щели для наблюдения явления дифракции использовать атомы в кристаллической решетке твердого тела. Лауэ поставил эксперимент, доказавший его правоту, и по дифракционным фигурам определил *длину волны излучения*. Она оказалась в 1000 раз меньше средней длины видимого света. Зная длину волны, можно получить сведения о *структуре кристалла*. За открытие дифракции рентгеновских лучей Лауэ стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 1912 г. Опыты по *рассеянию рентгеновских лучей* на пространственных решетках кристаллов доказали и волновую природу открытых Рентгеном лучей, и гипотезу французского кристаллографа О.Браве о строении кристаллов. Русский кристаллограф Г.В.Вульф и У.Брэгг-сын, независимо друг от друга расшифровав дифракционную картину рентгеновского излучения, дали формулу, определяющую отклонение луча при прохождении вещества (или условие Брэгга-Вульфа, связывающее длину волны рентгеновского излучения с периодом кристаллической решетки). За эти работы, положившие начало

рентгеноструктурному анализу, отец и сын Брэгги стали лауреатами Нобелевской премии по физике в 1915 г.

Обычное рентгеновское излучение имеет непрерывный спектр и возникает при резком соударении пучка быстрых электронов с мишенью. В 1906 г. Баркла открыл характеристическое рентгеновское излучение, которое возникало только при очень высоком напряжении и имело узкий спектр определенной длины волны, зависящий от вещества мишени. После создания Бором модели атома это излучение стали объяснять квантовыми переходами электронов с внешних оболочек атома на внутренние. Открытие Баркла, за которое ему присудили Нобелевскую премию по физике в 1917 г., положило начало *рентгеноструктурной спектроскопии*.

С переходами атомов из возбужденного состояния связаны все рассмотренные типы волн — от оптического излучения до рентгеновского. Верхний предел, который могут генерировать атомные системы, составляет 10^{20} Гц. Излучение более высоких частот — гамма-излучение — испускается атомными ядрами. Различные области спектра электромагнитного излучения исследованы различными методами, имеют разные названия и разные источники, но все имеют единую природу, отличаясь только частотами.

10.2. ЯВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СРЕД. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО МАТЕРИАЛЬНОГО ЕДИНСТВА МИРА

Дисперсией называется зависимость фазовой скорости гармонических волн в среде от частоты их колебаний (лат. *dispersus* «рассеянный, рассыпанный»). Дисперсия искажает форму сигнала при распространении в среде. *Дисперсия* — зависимость показателя преломления n электромагнитных волн от их частоты ω — наблюдается в виде разветвления света в спектр, например, при прохождении света через призму. Все среды, кроме абсолютного вакуума, обладают дисперсией. Обычно показатель преломления n растет с увеличением ω , но бывает и наоборот, тогда дисперсию называют аномальной. Ньютон провел много опытов с призмой, восхищаясь яркими цветами спектра. Пропустив получившийся спектр от одной призмы через вторую, он обнаружил, что не призма образует цветовой спектр, как многие считали, а сам белый свет состоит из набора цветов с различной способностью к преломлению. Ньютон доказал это, собрав линзой цветовой спектр в единый пучок белого света. Он выделил диафрагмой зеленый луч и направил его на другую призму, но луч уже не разложился на составляющие. Такие лучи Ньютон назвал *монохроматическими* (греч. *monochromatos* «одноцветный»). Отклонение, вызываемое призмой, зависит *от угла между гранями*, через которые проходит свет, *от направления луча*, падающего на первую грань, *от показателя преломления призмы*. Кроме того, показатель преломления может зависеть *от частоты света* и *от сорта стекла*.

Наблюдения за затмениями двойных звезд показывают, что межзвездное пространство не обладает дисперсией. Еще Араго при наблюдениях за двойной звездой Альголь — глаз Медузы из созвездия Персея (для земного наблюдателя глаз Медузы моргает) — отметил, что разность между скоростями красных и синих лучей во всяком случае не может превышать одной стотысячной скорости света.

Конечно, этот вывод соответствует точности экспериментов. В последнее время наблюдения за пульсарами показали, что современные радиоприемные устройства позволяют обнаружить наличие дисперсии межзвездного пространства в радиодиапазоне.

Теория Максвелла и атомистические представления необходимы для понимания дисперсии. По Лоренцу, дисперсия возникает в результате вынужденных колебаний заряженных частиц в веществе под действием переменного поля электромагнитной волны. Лоренц при расчете колебаний использовал классическую механику. Его теория объясняет дисперсию в газах, а в более сложных средах приходится учитывать взаимодействия внутри среды, и нужна квантовая механика.

Большой вклад в изучение дисперсии и создание ахроматических (греч. *achromatos* «бесцветный») линз внес немецкий физик Й.Фраунгофер — владелец крупнейшей в мире оптической фирмы. Используя для изучения дисперсии света в призмах свечу и лампу, он обнаружил желтую линию в спектре (линию натрия) и заметил, что она находится всегда в одном и том же месте спектра и потому удобна для измерений показателя преломления. В 1815 г. Фраунгофер обратился к изучению *спектра Солнца*, которым до него, еще в 1802 г., занимался Волластон. Пропуская солнечный свет через щель в камере-обскуре и призму, Волластон выделил в спектре Солнца семь линий (которые он посчитал разграничителями областей спектра). У Фраунгофера оказалось много таких линий. Он обозначил их латинскими буквами и обратил внимание на то, что D-линия находится в том же положении, что и яркая линия натрия в спектре лампы. Когда Фраунгофер направил свой спектроскоп на Венеру, то обнаружил такие же темные линии, что и на Солнце.

Для получения спектров Фраунгофер начал изготавливать также *дифракционные решетки*. Он наносил алмазом параллельные штрихи на стеклянные пластинки или изготавливал их из тончайших близко расположенных нитей, что требовало большого искусства — их число на 1 мм доходило до 300. Этот результат был превзойден только в 1883 г. Г.Роуландом — 800 штрихов (сейчас достигается 1800 штрихов). Если в темной камере на такую пластинку направить тонкий пучок света, то на белом экране образуется спектр.

В 1857 г. Г.Кирхгоф и Р.Бунзен, решив выяснить, какая же связь между D-линией на Солнце и яркой желтой линией в спектре лампы, обнаружили, что все *фраунгоферовы линии* поглощения в спектре Солнца совпадают с линиями испускания некоторых газов и паров. Кирхгоф распенил это как доказательство того, что материя и вне Земли представлена теми же элементами. Спектры стали интенсивно исследовать Брюстер, Дж.Гершель и Ф.Тольбот. На этом пути Гершель, как уже говорилось, открыл инфракрасное излучение, а Брюстер — закон поляризации отраженного луча: она максимальна, если отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу. Они также сформулировали основные идеи *качественного спектрального анализа*.

Изобретенная Бунзеном горелка (1855 г.) давала несветящееся высокотемпературное пламя, что позволяло переводить разные химические вещества в парообразное состояние и наблюдать их спектры. Занимаясь спектрами в 1854–1859 гг., Бунзен и Кирхгоф экспериментальным путем получили правило (закон Кирхгофа) о поглощении газами точно таких же длин волн, которые они могут излучать. При исследовании земных источников излучения они открыли два новых металла, названных по характерным для них красной и голубой линиям спектра рубидием и цезием (1861 г.). Затем Крукс открыл таллий (1865 г.), Райх и Рихлер — индий.

Кирхгоф объяснил происхождение фраунгоферовых линий как *линий поглощения атмосферы*. По выражению Гельмгольца, это открытие вызвало восхищение всех людей и возбудило их фантазию в большей мере, чем какое-либо другое, поскольку позволило заглянуть в ранее не доступные миры. Видимая поверхность Солнца ($T = 6000$ К) дает сплошной непрерывный спектр. Над ней расположены менее плотные слои фотосферы ($T = 4000$ К). Атомы газов, расположенные в более холодных областях, создают в сплошном спектре линии поглощения. Во время полного солнечного затмения до наблюдателя на Земле доходит свет, излучаемый только атмосферой Солнца, и сплошной спектр исчезает. В это время остаются только фраунгоферовы линии, при этом они из темных становятся светлыми — закон Кирхгофа.

Каталоги спектральных линий были составлены из всех элементов (длины волн линий и их относительные интенсивности) уже после Кирхгофа и Бунзена. Спектры несут в себе информацию не только о качественном составе исследуемого тела, но и об условиях, в которых происходит излучение. Особое значение для развития науки имело обоснование *спектрального анализа*, проведенное Кирхгофом, которое привело его к открытию закона теплового

излучения, связавшего оптику и термодинамику. В 1862 г. Кирхгоф ввел понятие «*абсолютно черного тела*» и предположил его модель — полость с небольшим отверстием. С этого времени проблема излучения черного тела стала одной из центральных в физике и привела к созданию квантовой теории излучения.

Идея о связи спектров со строением атома сформировалась в научном сознании постепенно. В 1885 г. И.Бальмер обнаружил закономерности в спектральных линиях водорода, а И.Ридберг предложил формулу, описывающую спектральную линию любого элемента. Ридберг отмечал, что из исследования спектров можно получить информацию о внутренних движениях в атомах. Он ввел понятие *спектральных термов*, которые вместе с его формулой, обобщенной Ритцем в принцип Ридберга–Ритца, стали основой для построения теории атома Бора.

Изменение спектров в разных условиях было изучено детально — в электрическом (*эффект Штарка*) и магнитном (*эффект Зеемана*) полях, что приводит к расщеплению спектральных линий, при разных температурах и давлениях (*уширение спектральных линий*) и т.д. В спектрах проявляется и эффект Доплера. Во-первых, тепловое движение излучающих частиц приводит к тому, что каждый такой атом излучается на частоте, смещенной из-за эффекта Доплера, и имеет место уширение спектральных линий. Во-вторых, эффект проявляется при движении всего излучающего тела относительно наблюдателя. Так, во время солнечного затмения видно, как диск Луны постепенно закрывает Солнце и возникает узкий серп из восточного края солнечного диска. На спектрограмме, полученной от этого края, фраунгоферовы линии смещаются к фиолетовому краю спектра. В конце затмения, когда возникает серп от западного края диска, линии смещены в красную сторону. Оказывается, в обоих случаях параметр смещения $\Delta\lambda/\lambda$ одинаков и равен $6,7 \cdot 10^{-6}$. Вращение Солнца объясняет это смещение. По наблюдениям солнечных пятен установлено, что экваториальный пояс Солнца вращается с периодом 25 суток. Так как радиус Солнца равен $7 \cdot 10^8$ м, то скорость получается равной примерно $2 \cdot 10^3$ м/с, и ее отношение к параметру смещения линий порядка $3 \cdot 10^8$. То есть это отношение равно скорости света. Вращение Солнца с запада на восток приводит к тому, что восточный край движется к наблюдателю, а западный — от него. В 1848 г. А.Физо указал на возможность определения лучевых скоростей звезд с помощью эффекта Доплера. Этот метод нашел широкое применение в астрономии. Величайшим открытием XX столетия является обнаружение красного смещения линий в спектрах далеких галактик, объясняемого как расширение Вселенной.

Спектроскопия — наука, основанная на изучении спектров электромагнитного излучения. В зависимости от диапазона изучаемых длин волн различают радиоспектроскопию, инфракрасную, оптическую, ультрафиолетовую, рентгеновскую и гамма-спектроскопию, в каждой спектральной области свои методы. Отличаются спектроскопия и по источникам излучения — твердого тела, атомная и молекулярная. Спектроскопия является теоретической основой *спектрального анализа*. Спектральный анализ находит широкое применение в производстве — в метал-

лургии, химической и пищевой промышленности и других областях техники. Так, в мартеновской печи в расплавленной стали постепенно выгорают различные примеси, содержание которых существенно для качества металла. По эмиссионному спектру можно непрерывно следить за изменением состава металла. Особое значение приобрел спектральный анализ в астрофизике. Так, элемент гелий был открыт сначала на Солнце (поэтому так и назван), а на Земле только через 20 лет. С помощью спектрального анализа сейчас установили, что Солнце состоит на 70% из атомов водорода, на 28% — из атомов гелия, и только на 2% — из других химических элементов (более 70). По спектрам Солнца и звезд определяют не только химический состав, но и многие другие характеристики, которые легли в основу классификации звезд.

10.3. ТЕПЛОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, МОДЕЛЬ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА. КРИЗИС КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ И ПОЯВЛЕНИЕ КВАНТОВОЙ ГИПОТЕЗЫ

Тепловое излучение — наиболее распространенный в природе вид электромагнитного излучения. Оно совершается за счет энергии теплового движения молекул в веществе, поэтому понижает температуру тела. Наряду с излучением происходит и поглощение теплоты, в результате температура тела поддерживается постоянной, в этом случае говорят, что тело находится в *тепловом равновесии*. Исследуя тепловое излучение, М.Питке и Прево заключили, что каждое тело излучает независимо от окружающей среды. Тепловое излучение имеет сплошной спектр. При сравнении спектров испускания со спектрами поглощения оказалось, что в спектрах поглощения ослаблены или отсутствуют участки спектра, представленные в спектрах испускания. Классическая теория поля не могла объяснить этого.

Модель абсолютно черного тела, поглощающего все падающее на него излучение, не отражая, предложил еще в 1860 г. Г.Кирхгоф для изучения равновесного излучения. Если, например, в ящике с непроницаемыми нагретыми стенками в результате многократных испусканий и поглощений света установится равновесное излучение, то это и есть излучение *абсолютно черного тела*. Это излучение можно наблюдать через небольшое отверстие. Интенсивность излучения любого тела может быть определена исходя из излучения «черного тела», если известны поглощение и показатель преломления данного тела (1859 г.). Тем самым проблема излучения свелась к исследованию черного излучения.

Закон равновесного теплового излучения установил Кирхгоф: отношение испускательной способности тела к поглощательной не зависит от природы излучающего тела, а является функцией от температуры и частоты — *функция Кирхгофа* $K(\nu, T)$. Эта функция универсальна для всех тел. Для абсолютно черного тела она равна его испускательной способности. Он вывел этот закон из второго начала термодинамики и показал, что состояние равновесия единственно и характеризуется вполне определенным распределением плотности энергии излучения, заключенной в этой полости.

С появлением новых источников излучения — лазеров — возникли новые возможности спектроскопии. Лазерное излучение монохроматично, ширина линии чрезвычайно мала. Появилась возможность работать под широким доплеровским уширением линии и извлекать уникальную информацию о происходящих в излучающих средах процессах. Лазер концентрирует энергию не только в узкий спектральный интервал, но и по интенсивности. Мощное лазерное излучение способно вызвать нелинейные процессы в среде и многофотонные процессы. Была создана новая наука — нелинейная лазерная спектроскопия. Наука получила возможность изучать глубинную структуру материи и процессы тонкими и точнейшими методами, не возмущающими исследуемую среду.

Измерения теплового излучения нагретых тел начались в конце прошлого века в Германии в связи с развитием ламповой промышленности. Рэлей (У.Стретт) и Джинс, объясняя явления на основе электромагнитной теории, получили, что при распределении энергии излучения по длинам волн на долю длинных волн приходится лишь небольшая часть энергии, но она быстро растет с уменьшением длины волны. Но экспериментальная кривая имела горб, который при повышении температуры поднимался и сдвигался влево, т.е. распределение излучаемой энергии имеет максимум на некоторой длине волны, и чем горячее тело, тем дальше максимум сдвигается в видимую область к синему концу спектра.

В 1884 г. Л.Больцман из термодинамического расчета получил, что энергия черного излучения пропорциональна T^4 , а давление — 1/3 объемной плотности энергии (при оценке на основе классической электродинамики). Так впервые к тепловому излучению применили понятия термодинамики — давление и температуру. Этот расчет подтвердили оценки Дж.Стефана. Их закон говорит о суммарной энергии спектра. **Закон Стефана-Больцмана** имеет вид: $R = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴).

Проблема распределения энергии в спектрах являлась одной из самых важных задач, стоявших перед наукой. Шаг в ее решении сделал В.Вин. Он соединил принципы термодинамики и эффект Доплера. В 1893 г. Вин распространил законы и понятия термодинамики (T и S) на тепловое излучение и на следующий год вывел из расчетов для модели абсолютно черного излучения важный закон — **закон смещения**, согласно которому: $\lambda_{\text{макс}} = b/T$, где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м · К — постоянная Вина (рис.11).

Поэтому максимум излучения должен смещаться в синюю сторону с ростом температуры тела, тогда как по классической электродинамике с уменьшением длины волны энергия должна расти вплоть до бесконечности. В 1896 г. Вин из классических представлений получил закон распределения энергии в спектре черного тела, но позже выяснилось, что он справедлив только для коротких длин волн. Таким образом, показатель цвета звезды характеризует температуру ее фотосферы. Поэтому звезды делят

на спектральные классы по цвету, и цветом выделяют диапазоны температур их фотосферы. Так, голубому классу «О» соответствует 50000–25000 К, а желтому — 7000–4500 К.

За открытие закона теплового излучения Вин стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 1911 г. Как писал Лауэ, «бессмертной заслугой Вилли Вина остается то, что он довел физику непосредственно до ворот квантовой физики, а уже следующий шаг, который предпринял Планк, провел ее через эти ворота». Рэлей пытался вывести функцию в законе Вина, считая распределение энергии по степеням свободы системы равномерным, но получил формулу (1900 г.), согласно которой удельная интенсивность излучения оказалась пропорциональной квадрату частоты и абсолютной температуре. Так как спектральная плотность росла с частотой, то возникал парадокс — полная плотность энергии черного излучения при всех температурах бесконечна! Для малых частот (инфракрасной области спектра) формула Рэрея отвечала эксперименту, но с увеличением частоты она не давала колоколообразной зависимости (рис.12).

Полная энергия, излучаемая черным телом, получалась у Рэрея бесконечной, тогда как закон Стефана–Больцмана давал пропорциональность четвертой степени температуры. Знание этого закона позволяет оценить температуру нагретых тел. Джинс пытался устранить эти противоречия, используя статистические расчеты для волн в полости, но в 1905 г. вновь пришел к формуле Рэрея. Так *формула Рэрея–Джинса, построенная на фундаменте классической физики, не только оказалась непригодной для всего диапазона длин волн, кроме длинных, она имела катастрофическое значение для всей классической физики.*

В то же время при изучении зависимости удельной теплоемкости тел от температуры было выяснено, что с понижением температуры уменьшается и удельная теплоемкость, которая была не зависима от нее. Эта загадка, связанная с поглощением тепла, тоже не получала объяснения в рамках классической науки. Многие ученые искали выход из сложившихся противоречий.

Поскольку было установлено, что закон Вина пригоден только для коротких волн, а формула Рэрея — для длинных, Планк поставил себе достаточно скромную цель — получить эмпирическую формулу, которая бы переходила в предельных длинах волн в формулы Рэрея и Вина. При построении теории равновесного излучения он считал вещество совокупностью электронных осцилляторов, с помощью которых происходит обмен энергией между веществом и излучением. Осциллятор — материальная точка, удерживаемая около своего положения равновесия силой, пропорциональной отклонению от равновесия, а частота колебаний не зависит от величины его амплитуды. В своей работе «О поправке к спектральному уравнению Вина», представленной в Берлинскую академию наук (1900 г.), Планк ввел поправку в теорию Рэрея: интеграл,

который становится бесконечным по мере уменьшения длин волн, он заменил суммой элементов, которые сгруппировал так, что сумма оставалась конечной. Он был доволен, что «удачно угадал промежуточную форму». Но эмпирическая формула Вина, как было выяснено позже, противоречит моделям классической физики. В статистической физике известен закон равномерного распределения энергии по степеням свободы — для теплового излучения на каждое независимое электромагнитное колебание внутри черного ящика приходится в среднем энергия kT .

Можно еще так пояснить ход мыслей: вероятно, неправильность закона Рэрея возникла из-за того, что при обмене энергией между осцилляторами и излучением высокочастотные осцилляторы играют слишком большую роль, именно из-за этого получается монотонный рост спектральной плотности с частотой. Для подавления значения осцилляторов с высокой частотой Планк ввел свой знаменитый постулат: *вещество не может испускать энергию излучения иначе как конечными порциями, пропорциональными частоте излучения. Так Планк совершил шаг от формулы Рэрея к эмпирическому закону Вина. Это был огромный скачок в понимании не только микромира, но и живой природы.*

Остальное в работе Планка вполне соответствовало классической физике. Но Планку пришлось ввести в расчеты две константы: одна имела тривиальный смысл, а вторая, названная им квантом действия h , казалась ему «либо фиктивной величиной, и тогда весь вывод закона излучения был в принципе ложным и представлял собой лишь игру в формулы, лишенную смысла», либо h имеет фундаментальный смысл, и закон верен. Но тогда этот закон «означает нечто совершенно новое и неслыханное, что должно произвести переворот в нашем физическом мышлении, основывавшемся со времен Лейбница и Ньютона, открывших дифференциальное исчисление, на гипотезе непрерывности всех причинных соотношений».

Наука XX в. показала, что дело не в объяснении и спасении закона Вина, а энергия при излучении меняется *дискретными порциями*, скачкообразно. Энергия каждого кванта пропорциональна частоте волны, т.е. цвету излучаемого света: $E = h\nu$. О своем революционном открытии Планк доложил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества, его выводы появились в печати под заголовком «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре». Этот день считается днем создания *квантовой физики*. За открытие кванта действия Планк стал лауреатом Нобелевской премии по физике за 1918 г. Поскольку понятие кванта действия послужило в дальнейшем ключом к пониманию всех свойств атомной оболочки и атомного ядра, то этот день можно считать началом всей атомной физики, химии и биологии, началом новой эры в естествознании. Квант выступал, по словам Бройля, как «возмутитель спокойствия», он принуждал к переосмыслению основ науки.

10.4. КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. ФОТОНЫ ЭЙНШТЕЙНА. РЕАЛЬНОСТЬ СВЕТОВОГО КВАНТА

Когда в конце прошлого века утвердилась теория электромагнитного поля Максвелла, обнаружили световые явления, которые не могли быть объяснены с ее помощью. Трудности, возникшие в распределении энергии по спектру теплового излучения, получившие название «ультрафиолетовой катастрофы», были устранены только введением дискретности порций излучаемой энергии, гипотезы квантов света. Для объяснения законов фотоэффекта пришлось расширить гипотезу Планка.

Явление фотоэффекта впервые наблюдал Генрих Герц (1887 г.) и исследовали русский физик А.Г.Столетов, В.Гальвакс и Ф.Ленард. Примечательно, что в том же году, когда Герц обнаружил, что заряженные отрицательно металлические пластинки при облучении светом дуговой лампы теряют свой заряд, Дж.Дж.Томсон при исследовании катодных лучей открыл электрон. В 1902 г. был обнаружен нижний предел частоты света, до которого ток не появляется и начиная с которого энергия освобожденных электронов возрастает с частотой. Законы фотоэффекта, полученные из опытов, показывали, что между пластинами устанавливается электрический ток, который сначала быстро растет, затем переходит к насыщению, причем *фототок насыщения* зависит только от светового потока, падающего на пластину. Энергия испускаемых электронов определялась только частотой падающего света и природой вещества, а не зависела от интенсивности поглощаемого излучения (от нее зависело лишь полное число электронов). Эти законы не укладывались в представления о волновой природе света — волна не может выбивать электроны из катода. Эйнштейн попробовал приспособить идею Планка к объяснению законов.

Фотоэффект указывает на дискретное строение света, связанное с существованием квантов — решил Эйнштейн. Назвав кванты электромагнитного излучения *фотонами*, он стал рассматривать световой поток как поток фотонов с энергией hn , падающих на пластинку, считая, что каждый электрон освобождается одним квантом. Если hn меньше, чем работа выхода, эффект не наступает; значит, со стороны больших волн существует предел, зависящий от облучаемого тела. Если же hn больше этого предела, то энергия освобожденного электрона равна энергии фотона, уменьшенной на работу выхода. При этом скорость фотоэлектронов увеличивается с частотой падающего излучения и не зависит от его плотности. Красная граница фотоэффекта — определенная длина волны излучения, начиная с которой наблюдается ток, связана с разной работой выхода фотоэлектрона из разных металлов. Частицы света, в отличие от частиц электричества — электронов, не одинаковы, а отличаются энергией, равной hn . Они рождаются при испускании света и исчезают при поглощении, т.е. в отличие от корпускул Ньютона обладают материальной сущностью.

В 1905 г. Эйнштейн распространил дискретность не только на испускание и поглощение, но и на само излучение: «Мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии... “световых квантов”, т.е. небольших порций энергии, несущихся в пустом пространстве со

скоростью света». Правда выводов была подтверждена в 1916 г. Милликоном, определившим постоянную Планка h . В 1921 г. за успехи в объяснении фотоэффекта А.Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике.

Основной фотохимический закон, установленный в 1912 г. Эйнштейном из тех же соображений, утверждает, что при всякой фотохимической реакции происходит сначала поглощение одного кванта света, а затем вызванное им превращение в одном атоме или молекуле. Обратное фотоэффекту явление тоже наблюдается — из-за захвата электрона атомом или молекулой возникает излучение. Этот захват происходит в одном акте, появляется фотон, энергия которого равна кинетической энергии электрона (сложенной с работой выхода). В трубке Рентгена происходит торможение электронов на антикатоде во многих элементарных актах, но наибольшая частота всегда соответствует кинетической энергии электронов. Это — закон В.Дюане и Ф.Л.Гунта, открытый в 1915 г.

В 1916 г., проанализировав статистические закономерности излучения, Эйнштейн, кроме *энергии фотона* $E = h\nu$, стал упоминать и *импульс фотона* $p = h\nu/c$ и подчеркивал, что, несмотря на свою малую величину, импульс излучения весьма важен. Через семь лет справедливость этого вывода подтвердилась. Уже Рентген заметил, что его лучи испытывают диффузное рассеяние во всех телах. Но в 1923 г. американский физик А.Комптон показал, что при рассеянии легкими элементами жестких рентгеновских лучей в рассеянном излучении появляются лучи с измененной длиной волны, при этом длина зависит от угла рассеяния. Этот эффект (разница частот рассеянного и первичного рентгеновского излучения) не мог быть объяснен в классической теории и легко объяснялся в квантовой. Теория явления была построена независимо П.Дебаем и А.Комптоном. Она является, по существу, применением законов сохранения энергии и импульса к взаимодействию между квантом света и свободным электроном. После удара часть энергии и импульса кванта переходит к электрону, а квант летит дальше с другой частотой (уменьшенной энергией) и в другом направлении. Эти представления подтвердились опытами.

Закон сохранения энергии:

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + m_0c^2/(1 - \beta^2)^{(1/2)}.$$

Закон сохранения импульса:

$$h\nu_0/c = h\nu/c + mV,$$

где ν_0 — частота падающих рентгеновских лучей;

m_0c^2 — энергия покоящегося электрона;

ν — частота рассеянных рентгеновских лучей;

$\beta = V/c$ — отношение скорости электрона после соударения с квантом рентгеновского излучения к скорости света c .

Из этих уравнений можно определить $\lambda - \lambda_0 = 2(h/m_0c) \sin^2(\varphi/2)$. Угол φ есть угол между направлениями первоначального и рассеянного рентгеновского излучений. Эффект Комптона являлся прямым подтверждением гипотезы световых квантов. За это открытие Комптон стал лауреатом Нобелевской премии по физике за 1927 г.

Из трех констант h , m_0 , c можно составить комбинацию, имеющую размерность длины h/m_0c , называемую комptonовской длиной волны: $h/m_0c = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} / 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ м/с} = 2,42 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Тогда зависимость изменения длины волны фотона от угла рассеяния можно записать как $\Delta\lambda = h/m_0c(1 - \cos\varphi)$.

Таким образом, квантовые свойства фотона проявляются в *фотоэффекте*, *основном фотохимическом законе*, в *эффекте Комптона*, только в первых двух главную роль играет энергия фотона, в третьем — его импульс. Комптон и почти в то же время Дебай указали, что все основные особенности этого явления объяснены, если рассматривать взаимодействие между электроном и электромагнитной волной как соударение электрона с фотоном. Тем самым была доказана справедливость квантовой теории света.

Открытие комбинационного рассеяния света (в жидкостях и кристаллах) подтвердило гипотезу световых квантов. Суть явления состоит в следующем. Кванты оптического диапазона поглощаются молекулами вещества и вызывают их возбуждение. Возбужденная молекула излучает квант с меньшей энергией, и вторичное излучение

оказывается смещенным в красную сторону спектра. Но при поглощении фотона молекулой, которая в этот момент уже находится в возбужденном состоянии, вторичное излучение может иметь и большую энергию, т.е. будет смещено в фиолетовую сторону спектра. Комбинационное излучение объясняет многие природные явления и широко используется для изучения строения молекул, межмолекулярных взаимодействий, протекания химических реакций, поверхностных явлений, фазовых переходов.

В последние 20 лет в качестве источников света стали широко применяться лазеры, и были получены просто фантастические по точности результаты. Если раньше нужно было подбирать случаи, когда линия комбинационного рассеяния приходилась на край полосы электронного поглощения, что удавалось редко, то с использованием лазерных источников, перестраиваемых по частоте, можно получить узкую спектральную линию в разных областях спектра. Тем самым можно изучать *резонансное рассеяние*, ранее недоступную колебательно-вращательную *тонкую структуру* линий, которая весьма информативна.

10.5. ПОГЛОЩЕНИЕ И ИСПУСКАНИЕ КВАНТОВ СВЕТА. СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Эйнштейн заметил, что равновесное взаимодействие между веществом и излучением не может состоять только из актов передачи энергии от излучения веществу (*поглощения*) или обратной передачи от вещества к излучению (*спонтанного испускания*). Постулат Планка о равномерном распределении энергии в спектре равновесного излучения получается только при введении еще одного излучения — *вынужденного* или *индуцированного* внешним полем и когерентного с ним. Тогда Эйнштейн и не подозревал, что появится возможность усиления этого введенного им излучения и тем самым произойдет революция в оптике, связанная с открытием и созданием мазеров и лазеров (рис.13)*.

Методы статистики применил Эйнштейн к модели атома Бора, и вывел (1917 г.) формулу Планка для равновесного излучения. Так он стал разрабатывать статистическую квантовую теорию испускания и поглощения света отдельным атомом. Самое важное — *введение вероятности для описания микрообъектов*. Кроме *вероятностей спонтанного и индуцированного излучений*, он предположил и случайное направление вылета кванта из молекулы, которое нельзя предсказать. Вероятность спонтанного испускания впервые ввел Резерфорд для вывода уравнения радиоактивного распада (1900 г.). Эйнштейн считал вероятностный подход связанным с недостаточностью знаний о системе. Известны его споры с Бором под названием: «Играл ли Бог в кости при сотворении мира?». Восприятие новых идей происходило постепенно. Используя в своей работе термин «фотон» (1926 г.), Дж.Льюис рассматривал квант света как неделимый атом. Постепенно фотон был признан элементарной частицей с массой покоя, равной нулю, и со спином, равным единице.

Вынужденное испускание должно иметь место при совпадении частоты падающего излучения с одной из возможных частот атомов данного сорта, — заметил в 1927 г. Дирак. В результате получаются два совершенно одинаковых фотона. Вынужденное излучение монохроматично и когерентно. В 1939 г. советский физик В.А.Фабрикант указал, что за счет неравновесных процессов можно сделать отношение числа частиц на возбужденном уровне к числу частиц на невозбужденном больше единицы. Такая среда, называемая *инверсно-заселенной*, вместо поглощения будет усиливать свет. В 1951 г. он вместе с Ф.А.Бутаевой и М.М.Вудинским получил авторское свидетельство на эту идею, осуществление которой позволило бы создать принципиально *новый способ усиления* электромагнитного излучения и открыть явление усиления излучения экспериментально.

Система атомов (или молекул) с инверсной заселенностью уровней при наличии в системе обратной связи способна не только *усиливать*, но и *генерировать* когерентное излучение. Первый квантовый генератор на пучке молекул аммиака был создан в 1954 г. Н.Г.Басов, Прохоров и американский физик Ч.Таунс в одно время предложили и осуществили обратную связь, поместив *активную среду в резонатор* с двумя параллельными зеркалами, получили когерентное монохроматическое излучение, за что стали Нобелевскими лауреатами (1964 г.). Квантовые усилители радиодиапазона стали называть *мазерами*, оптического — *лазерами* (англ. *Microwave (Light) Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) — усиление микроволнового (светового) излучения путем индуцированного излучения.

Прохоров еще в 1951 г. доказал когерентность излучения сантиметровых волн синхротрона Его разработки

* При спонтанных переходах акты излучения атомов неупорядоченны во времени и пространстве, поэтому спонтанное излучение некогерентно. Все естественные источники дают спонтанное излучение. Вынужденное излучение когерентно, частоты, фазы и состояния поляризации совпадают с внешним излучением.

молекулярных стандартов частоты и времени привели к созданию (вместе с Басовым) первого лазера, после чего он сосредоточил свои усилия на создании лазеров и мазеров с разными свойствами излучения и применении их для изучения веществ. Басов предложил в 1955 г. трехуровневый метод создания неравновесных квантовых систем, широко используемый в квантовой электронике. Ему принадлежат перспективные идеи по разработке и созданию полупроводниковых лазеров, лазерного термоядерного синтеза, химических лазеров и т.д. Принципы работы

лазера разработал Ч.Таунс в 1958 г. вместе с А.Шавловым. Они использовали в дальнейшем лазеры для проверки тонких эффектов теории относительности и в приложениях к биологии и медицине. В 1969 г. Таунс открыл *космический лазер*. В настоящее время лазеры созданы на кристаллах, газах и жидкостях. Они концентрируют излучение по направлению испускания, энергии, углу расходимости и в узкий спектральный интервал. Фактически под любую задачу можно подобрать источник излучения с нужными свойствами.

10.6. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА И ЗНАЧЕНИЕ ИХ ОТКРЫТИЯ

Синтез корпускулярных и волновых представлений предложил в 1924 г. французский физик Луи Виктор де Бройль, приписав любой частице некий внутренний периодический процесс и рассмотрев единым образом частицы вещества и света. Развив представления Эйнштейна о двойственной природе света, он распространил их на вещество, объединив формулу Планка $E = h\nu$ и формулу Эйнштейна $E = mc^2$, из чего получил соотношение, показывающее, что любой частице при определенных массе и скорости соответствует своя длина волны. Сама волна не несет энергию, а только *отображает «распределение фаз»* некоего периодического процесса в пространстве.

Эту фиктивную волну Бройль назвал *«фазовой волной»*, форма лучей которой определяется принципом наименьшего времени распространения, выдвинутого еще Ферма. Соотношения Эйнштейна для световых квантов в объяснении фотоэффекта ($E = h\nu$, $p = h/c$) требуют сохранения понятия частоты, поэтому сохраняются и волновые свойства света как колебательного процесса, т.е. в свойствах света присутствует двойственность. Хотя Бройль исходил из аналогий, но они были основаны на идее единства природы, и Эйнштейн сразу понял, что здесь речь идет не просто об аналогии, а можно ожидать волнового явления и для частиц вещества, например, *дифракции электронов*. И в 1929 г., через шесть лет после первых публикаций, за открытие волновой природы электронов Луи де Бройль был удостоен звания лауреата Нобелевской премии. Через оптико-механическую аналогию Бройль хотел вскрыть таинственный смысл *квантовых условий*, введенных в элементарной теории атома Бором, Вильсоном и Зоммерфельдом. Конкретный смысл связи между величинами, характеризующими частицу и волну, сопоставляемую с частицей, связан с квантованием энергии тела.

Длину волны микрочастицы Бройль определил по аналогии с длиной волны фотона. Поскольку импульс фотона равен $p = h\nu/c = h/\lambda$, то длина его волны равна $\lambda = h/p$. По определению, импульс есть произведение массы на скорость, поэтому можно ввести длину волны Бройля $\lambda_B = h/(mv)$. Если электрон есть волна — частица, то стационарная орбита в атоме Бора будет определяться тем, что на ней должно укладываться целое число длин волн электрона. Это означает, что $2\pi R = n\lambda_B$ или через длину волны Бройля

можно записать: $2\pi R = (h/mv)n$. Это и есть первый постулат теории атома Бора.

Оценим длину волны электрона с энергией 10 эВ. Так как $E = mV^2/2$, $p = mV$, имеем: $p = \sqrt{2mE}$ и $\lambda = h/p = h/\sqrt{2mE} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} / 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10 \text{ эВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж/эВ)} = 3,88 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,388 \text{ нм}$. Полученное значение длины волны сравнимо с размером атома. Фотон с такой же длиной волны имел бы энергию: $E = h\nu = hc/\lambda = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ Дж(м/с)} / 3,88 \cdot 10^{-10} \text{ м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ (Дж/эВ)} = 3,2 \text{ кэВ}$. Фотон, обладающий такой большой энергией, соответствует рентгеновскому излучению.

В 1921 г. американский физик К.Дж.Дэвиссон, работавший тогда в фирме «Белл телефон», обнаружил, что электроны, отражаясь от никелевой пластинки, рассеиваются под определенным углом. Тогда он не сумел найти подходящего объяснения этому явлению. Но после появления работ Луи де Бройля Дэвиссон провел дополнительное исследование и в 1927 г. вместе с американским физиком Л.Джермером получил четкую картину рассеяния электронов, которая соответствовала теории Бройля.

Явление дифракции электронов совершенно независимо открыл примерно в это же время Дж.П.Томсон, сын Дж.Дж.Томсона, при рассеянии быстрых электронов через металлическую фольгу. По дифракционным картинам он вычислил длину волны для электронов (аналогичный опыт по дифракции медленных электронов провел в 1932 г. П.С.Тартаковский). Так был экспериментально подтвержден корпускулярно-волновой дуализм электронов. За открытие волновых свойств электрона Дэвиссон, Джермер и Дж.П.Томсон стали Нобелевскими лауреатами по физике за 1937 г.

После успешного обнаружения волновых свойств у электронов были проведены сложнейшие опыты по их обнаружению у атомов и молекул (Германия). Поскольку длина волны Бройля равна h/mV , то у частиц большего масштаба она существенно меньше, но Штерну удалось ее измерить. Впоследствии дифракционные, а значит, и волновые, свойства были обнаружены у атомных и молекулярных пучков.

Хотя гипотеза Луи де Бройля не устранила тех трудностей, с которыми столкнулась теория Бора, но именно она привела Шредингера к созданию волновой механики.

Глава 11. КОНЦЕПЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СТРУКТУР В МИКРОМИРЕ

11.1. СПЕЦИФИКА МИКРОМИРА ПО СРАВНЕНИЮ С ИЗУЧЕНИЕМ МЕГА- И МАКРОМИРА. ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ. ПРИНЦИПЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ И ПРИЧИННОСТИ

Микромир — невидимый мир микрообъектов — атомов, электронов, нейтронов, протонов и пр. Он не может быть описан понятиями и принципами классической физики, которые в некоторой мере соответствуют наглядным представлениям. Классическая физика признает наличие материи в виде как вещества, так и поля. Но она не допускает существование объектов, обладающих свойствами и поля, и вещества. Подчеркивая кажущуюся противоречивость свойств микрообъектов, у которых корпускулярные и волновые свойства дополняют друг друга, Н. Бор выдвинул *принцип дополнительности*.

При одном описании или наблюдении за микрочастицей существенно волновое представление, а при другом — она ведет себя как частица. Единая картина синтезирует эти описания. После доказательства волновых свойств электрона и «полного успеха» корпускулярно-волнового дуализма вещества необходимо было подвести теорию к объяснению явлений. Для макрообъектов длина волны де Бройля, равная (h/mV) , мала, поэтому их движения можно описать законами классической механики как волновые процессы, характеризующиеся волновой функцией ψ . Но для микрообъектов, когда длиной волны де Бройля нельзя пренебречь, закон их движения должен быть аналогичен волновому уравнению в оптике: $\Delta\psi + (\omega^2/u^2)y = 0$. Шредингер, опираясь на *аналогию оптико-лучевого и оптико-волнового описаний*, обобщил гипотезу де Бройля для случая, когда электрон движется не в свободном пространстве, а во внешнем поле. Гамильтон, выразивший идею об *оптико-механической аналогии*, показал, что для математического описания вопрос о природе света не имеет значения. Задачу классической механики можно формально записать как задачу геометрической оптики, с математической точки зрения они одинаковы. Только в приведенном уравнении для фазы вместо w надо поставить циклическую частоту «волн де Бройля» $(2\pi E/h)$, а вместо скорости u — скорость распространения поверхности равного действия $E/[2m(E - U)]^{1/2}$. Тогда уравнение для частицы примет вид:

$$\Delta\psi + (8\pi^2m/h^2)(E - U)\psi = 0.$$

Здесь введен так называемый оператор Лапласа $\Delta\psi \equiv (d^2\psi/dx^2) + (d^2\psi/dy^2) + (d^2\psi/dz^2)$, $(E - U)$ — функция координат и времени, которая характеризует силовое поле, в котором движется микрочастица.

«**Волновая механика**» — вариант механики микромира, разработанный Шредингером. Уравнение Шредингера в микромире играет такую же роль, как уравнения Ньютона в классической механике. Это и есть знаменитое уравнение для *волновой функции*, решение которого в отсутствие внешнего поля дает волны де Бройля. Уравнение Шредингера не может быть выведено из других соотношений, и поэтому может рассматриваться как исходное предположение, справедливость которого доказывается тем, что вытекающие из него следствия согласуются с экспериментальными данными.

Первое слагаемое — вторая производная от ψ -функции по координатам — характеризует скорость изменения скорости ψ . Шредингер считал, что функция ψ описывает только волновые свойства частиц. Решения этого уравнения (их два) для $V = 0$ находятся просто: $\psi = a \sin kx$ и $\psi = b \cos kx$. Они описывают волны де Бройля: $k = 2\pi/\lambda = (2mE/h)^{1/2}$, $\lambda = h/(2mE)^{1/2} = h/p$. Шредингер решил уравнение для простейших квантовых систем — *осциллятора, ротатора* и т.п. Он определил вид волновых функций и возможные значения энергии, сумев уйти от постулатов Бора в строении атома водорода. Целочисленность значений энергии получилась сама собой, как получается целое число узлов при рассмотрении колеблющейся струны. Из условия стремления к нулю ψ -функции на больших расстояниях — быстрое ослабление удерживающего поля, можно найти решения уравнения Шредингера для связанных состояний. Для кулоновского потенциала атома водорода решение получается не для всех энергий, а для определенных дискретных значений, совпадающих с теми, что давала теория Бора. Тем самым проявился смысл правил квантования Бора–Зоммерфельда: допустимые значения энергии соответствуют требованию, чтобы в области движения частицы уложилось целое число волн де Бройля.

Но свойства ψ -функции не сводились только к «волновым пакетам», что экспериментально доказали в 1948 г. советские ученые Л.М. Биберман, Н.Г. Сушков и В.А. Фабрикант. Пропуская пучок электронов чрезвычайно малой интенсивности через кристалл (фактически по одному), они получили на фотопластинке за кристаллом отдельные пятнышки, плотность распределения которых соответствовала распределению интенсивностей в дифракционной картине, которая была бы при большой плотности пучка электронов. Эти «пятнышки» демонстрировали дискретность электронов, а их распределение свидетельствовало о подчиненности их статистическим законам. Борн в книге «Физика в жизни моего поколения» (рус. пер. 1963 г.) подчеркивал: «Все развитие квантовой механики показывает, что совокупность наблюдений и измерений медленно создает абстрактные формулы для их сжатого описания и что понимание их значения приходит впоследствии».

Матричная механика — другой вариант механики микромира создали Гейзенберг, Борн, Дирак и П.Иордан. В своей первой работе Гейзенберг пытался выработать основы атомной механики, построенной на связях между принципиально наблюдаемыми величинами без привлечения моделей.

Эти идеи легли в основу матричного варианта квантовой механики, для которой Борн разработал математический аппарат. По словам Борна, Гейзенберг отказался от «представлений об электронных орбитах с определенными радиусами и периодами обращения, потому что эти величины не могли быть наблюдаемы». Это достижение молодого Гейзенберга Борн сравнивает с подвигом Эйнштейна, упразднившего в 1905 г. понятие абсолютной одновременности и показавшего, что атомную модель Бора

нельзя принимать так буквально, как казалось вначале. Они исходили из изучения закономерностей в спектрах и теории дисперсии, в которой атом представляется моделью — совокупностью виртуальных гармонических осцилляторов. Гейзенберг представил физические величины как совокупность всех возможных амплитуд перехода из одного квантового состояния в другие. Сама *вероятность перехода* пропорциональна квадрату модуля амплитуды, которые и наблюдаются в экспериментах. Тогда каждая величина должна иметь два индекса, соответствующих верхнему и нижнему состояниям. Эти величины называются *матрицами*. Гейзенберг получил и уравнения для наблюдаемых величин, но в первоначальном виде они были сложными. Он считал, что теория явлений микромира должна устанавливать соотношения между величинами, которые непосредственно наблюдаются в эксперименте (частота спектральных линий, поляризация и др.), а «ненаблюдаемые» (скорость, масса, ускорение, положение частицы) не должны быть в ней. В 1926 г. он сумел объяснить отличие двух систем термов для пара- и ортогелия как соответствующих симметричным и антисимметричным решениям его уравнения.

Квантовая механика — теория движений в микромире, основанная на единстве матричной и волновой механики. Шредингер вскоре доказал их математическую эквивалентность. В квантовой механике нет разницы между описаниями частицы с помощью волновых и корпускулярных представлений. Вращающийся вокруг ядра электрон можно представлять в виде волны, длина которой определяется его скоростью. И там, где укладывается целое число длин волн электрона, они складываются, образуя разрешенную орбиту в планетарной модели атома Бора. Если же в орбиту не укладывается целое число волн, гребни их станут компенсировать впадины, такая орбита не будет разрешена. Уравнение Шредингера позволяет однозначно определить волновую функцию в любой момент времени, если известно ее значение в данный момент. Поэтому само уравнение вполне динамично. Но оно было написано по оптико-механической аналогии еще до того, как стал известен смысл этой функции. Появились предположения о связи волновой функции с непрерывно распределенной материей частицы в пространстве или с числом частиц в данной области. Но они оказались несостоятельными. Верную трактовку смысла волновой функции дал М. Борн в 1926 г. Он обратился к работам Эйнштейна по теории фотонов и проанализировал задачу о рассеянии частиц.

Квадрат модуля ψ -функции определяет вероятность dW того, что частица будет обнаружена в объеме $dV/dW = |\psi_1|^2 dV = \psi_1 \cdot \psi_1 dV$, при этом полная вероятность обнаружения частицы во всем объеме, определяемая интегралом по объему, должна равняться (как достоверного события) единице: $\int dW = 1$. Это означает, что квантовая механика носит статистический характер. Она позволяет определить не сами координаты, а только вероятность того, что координаты лежат внутри определенного интервала. ψ -функция позволяет только предсказать вероятность обнаружения частицы в различных точках пространства. Как выразился Р. Фейнман, «приходится признать, что мы изменили нашим прежним идеалам понимания природы. Может быть, это

шаг назад, но никто не научил нас, как избежать его». После истолкования смысла волновой функции дальнейшее развитие интерпретации теории происходило очень быстро.

С позиции статистических методов к созданию формализма квантовой механики подошел М. Борн. Он показал, что интенсивность шредингеровских волн есть мера вероятности положения частицы в определенном месте.

Борн с 1922 г. начал работать над теорией атома Бора, сумев собрать в Геттингене одаренных молодых физиков-теоретиков из разных стран и воодушевить их на разработку новой, квантовой физики. По воспоминаниям Гейзенберга, именно благодаря Борну Геттинген, славившийся своей математической школой (традиции Гаусса, Римана, Вебера продолжали Клейн и Гильберт), стал также центром атомной физики.

Итак, микропроцессам свойственны не динамические, а *статистические закономерности*. Тем самым в области микромира *причинность* реализуется через многообразие случайностей, и характер причинной связи в микромире становится отличным от детерминизма классической науки. Классическая наука, стремясь к объективности законов, игнорировала случайность. В ней отражались только средние данные, а в реальных процессах всегда происходил отклонения от средних — случайные флуктуации; а пренебречь ими можно лишь в некоторых ситуациях. Динамические теории не могут описывать явления с большими флуктуациями, связь со случайностью сглажена, огрублена. Поэтому статистические законы глубже, чем динамические. Поэтому и вероятностная причинность оказывается глубже, чем динамическая.

Положение о первичности статистических законов выдвинули сначала создатели квантовой механики. Это положение сначала многие связывали с индетерминизмом, поскольку детерминизм в привычном понимании в микромире оказался не достижим. Большая часть ученых воспринимала статистические законы как недостаточность наших знаний и микрообъектах, т.е. как промежуточный этап развития знаний. Но когда оказалось, что вероятностная теория подтверждается многими экспериментами, стали говорить о *равенстве динамических и статистических закономерностей в микромире*. Эти законы дополняют друг друга и, в то же время, не могут быть сведены друг к другу. Статистические закономерности являются объективными законами природы, они отражают реальные связи в микромире. В макромире поведение индивидуальных объектов подчинено динамическим законам, а совокупности объектов — статистическим. В микромире и объекты, и их совокупности описываются как динамическими, так и статистическими законами. История науки показывает, что динамические законы постепенно сменяются законами статистическими, представляющими более глубокий уровень понимания. Поднимаясь на него, получаем более глубокое понимание сущности и более широкий охват явлений природы. Статистические закономерности приводят к более хорошему согласию с экспериментом. Ее результаты при определенных условиях согласуются с результатами динамических теорий, что и предполагает принцип соответствия Бора.

До создания квантовой механики Борн вместе с учениками получил выдающиеся результаты в твердых телах и кристаллах, используя понятие кристаллической решетки и применяя теорию групп, поэтому он сразу же применил появившееся уравнение к различным проблемам строения атома, физики твердого тела и молекулярной физики. В 1926 г. Борн предложил способ расчета электронных оболочек атома и методы решений для задач столкновения частиц по теории возмущений, которые известны как *борновское приближение*, и вместе с Н. Винером ввел в квантовую механику понятие *оператора*. В отличие от ситуации классической механики, некоторые величины (момент импульса, энергия при движении в замкнутой области пространства и др.) могут принимать лишь дискретный ряд значений. Возможные значения физических величин являются собственными значениями операторов, которые сопоставляются в квантовой механике каждой физической величине. Эта величина может принимать определенные значения с вероятностью, равной единице, только в случае, если система находится в состоянии, изображаемом собственной функцией этого оператора. Тогда вероятность превращается в достоверность.

Зная волновую функцию, можно вычислить среднее значение любой физической величины и ее отклонение от среднего значения — дисперсию. В отличие от классической механики статистический характер имеет поведение отдельной частицы, т.е. это уже не связано с наличием очень большого числа частиц. Но при формулировке квантовой механики пришлось ввести еще один принцип —

фундаментальный принцип неотличимости или *тождественности частиц*. В классической механике частицы можно отличить по их состояниям, в этом смысле они не теряют индивидуальности. В квантовой механике это невозможно, так как микрочастица не имеет траектории. Если волновые функции двух частиц перекрываются, то в области перекрытия нет возможности отличить одну частицу от другой. Поэтому получается, что тождественными оказываются и свойства частиц, и их состояния. В природе реализуются лишь те состояния совокупности одинаковых частиц, которые не меняются при обмене местами одинаковых частиц. Поэтому и состояния описываются лишь симметричными или антисимметричными волновыми функциями, при этом характер симметрии определяется собственным моментом импульса частицы (ее спином). Сформулированный на этой основе *принцип Паули* позволил сформировать статистические правила для *частиц с целым и полуцелым спином* и *понять построение Периодической таблицы химических элементов*. В 1927 г. Борн разработал, при участии американского физика Р. Оппенгеймера, теорию строения двухатомных молекул.

Квантовая механика явилась *теоретической основой химии*. С ее помощью удалось построить теорию твердого тела, многих его свойств в различных полях. На ней базируется квантовая статистика, квантовая электродинамика, квантовая теория излучения и др. Она легла в основу теории радиоактивного распада и стала базой *атомной и ядерной физики*.

11.2. ПРИНЦИПЫ СООТВЕТСТВИЯ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ. РОЛИ ПРИБОРА И ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ В МИКРОМИРЕ

Границы применимости существуют у каждой теории. Так, классическая механика описывает движение макроскопических тел при скоростях, существенно меньших скорости света. Эти границы выяснились только после создания СТО. Теория Эйнштейна расширила классическую механику на случай больших скоростей, и ее область применимости стала шире. Ценность механики Ньютона уменьшилась — для скоростей тел, которые много меньше скорости света, поправки теории относительности малы. При создании квантовой механики было важно построить новую теорию так, чтобы соотношения между ее величинами были аналогичны соотношениям классических величин. То есть каждой классической величине нужно было поставить в соответствие квантовую величину, а потом найти соотношение между квантовыми величинами, пользуясь классическими законами. Такие соответствия можно было найти только из операций измерения. В 1923 г. Н. Бор сформулировал принцип построения новых теорий в других областях.

Принцип соответствия — новая теория не может быть справедливой, если не будет содержать в качестве предельного случая старую теорию, относящуюся к тем же явлениям, если она уже подтверждена опытом в этой области. Этот принцип отражает диалектику соотношения абсолютной и относительной истин. Смена теорий (относительных истин) есть шаг на пути приближения к абсолютной истине.

Гейзенберг шел от наглядных феноменологических моделей. В 1927 г. он при поддержке Бора и его школы предложил устранить противоречие «волна — частица», которое он понимал как аналогию. Считая, что «совокупность атомных явлений невозможно непосредственно выразить нашим языком», он предложил отказаться от представления о материальной точке, точно локализованной во времени и пространстве. Либо точное положение в пространстве при полной неопределенности во времени, либо наоборот — таково требование квантовых скачков.

Принцип неопределенности, сформулированный Гейзенбергом, — это фундаментальное положение квантовой теории, отражая ограничение информации о микрообъектах самими средствами наблюдения. Гейзенберг подсчитал точность определения положения и скорости электрона из так называемых *перестановочных соотношений* квантовой механики.

Пусть в какой-то момент нам нужно узнать положение и скорость электрона. Самый точный метод — осветить электрон пучком фотонов. Электрон столкнется с фотоном, и его положение будет определено с точностью до длины волны используемого фотона. Для большей точности нужно использовать фотоны наименьшей длины (или большей частоты, или обладающие большими энергией E и импульсом $h\nu/c$). Но чем больше импульс фотона, тем сильнее он исказит импульс электрона. Для точного знания положения электрона нужно использовать фотоны бесконечной час-

тоты, но тогда и импульс его будет бесконечным, совершенно неопределенным. И, наоборот, желая определить точно импульс электрона, из аналогичных рассуждений приходим к неопределенности положения. Выразив ее как Δq , а неопределенность импульса как Δp , получим $\Delta q \Delta p \geq h$. Если взять сопряженные величины — энергию E и время t , то квантовомеханическое соотношение неопределенности для них будет $\Delta t \Delta E \geq h$.

Значит, чем точнее фиксирован импульс, тем большая неопределенность в значении координаты. Аналогично связаны энергия и время. Точность измерения энергии пропорциональна длительности процесса измерения. Причина этого — *взаимодействие с макроскопическим прибором*. Нет возможности одновременно измерить точно каждую из находящихся в паре сопряженных величин. Конечно, в реальности неточности выше, чем указанный минимум. Но принцип дает ограничения, которые нельзя устранить никакими усовершенствованиями прибора. В классической науке приборы и наблюдения тоже искажали измерения, но эти искажения можно было уменьшать. Принципиальная разница в том, что соприкасаются и взаимодействуют объекты разных миров: для изучения микромира используются приборы и наблюдатели из макромира. Они-то и вносят искажения в состояния микрообъектов, которые не устранимы. Отсюда — будущее состояние микрочастицы *не может быть достоверно и точно предсказано*. Повышение точности в знании одного параметра влечет увеличение неточности в знании другого параметра. Отсюда дискуссии о непредсказуемости явлений микромира, о «свободе воли» электрона, о победе случайности над детерминизмом, нарушении принципа причинности в микромире и др. В настоящее время принцип неопределенности считается общепризнанным.

Основа интерпретации квантовой механики — принцип Гейзенберга — устанавливает границы применимости классической физики. Принцип неопределенности часто называют следствием принципа дополнительности, что до сих пор вызывает дискуссии.

Применим соотношения Гейзенберга, например, к электрону в атоме. Так как скорость электронов при движении вокруг ядра порядка 10^6 м/с, то максимально допустимая неопределенность скорости не должна превышать самой скорости. Пусть они равны, тогда из соотношения неопределенности для координат и импульсов $\Delta p \Delta x \geq h$, $x = h/mv$. Или в числах: $x = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж с/9,1 · 10^{-31} кг 10^6 м/с = $7 \cdot 10^{-10}$ м, т.е. неопределенность в координате имеет порядок размеров самого атома. Отсюда следует вывод: электрон размазан по всему объему атома в виде пульсирующего облачка, и его боровская орбита — геометрическое место точек, в которых корпускулярные свойства электрона наиболее выражены.

Опыты дают набор возможных значений с распределением их вероятности, которое теоретически может быть предвычислено. Понятие вероятности становится первичным, и вокруг него строится наука XX столетия. Детально исследуя сложившуюся ситуацию специфики физического взаимодействия микрообъекта с тем или иным классическим средством наблюдения, Гейзенберг в работе «О наглядном содержании квантовой кинематики и механики»

(1927 г.) рассмотрел основные положения квантовой механики, ориентируясь на возможности измерения величин, характеризующих состояние микрообъекта. Он пришел к выводу, что в области микрообъектов «чем точнее определяется местоположение, тем менее точными становятся сведения об импульсе». Или, в отличие от «лапласовского детерминизма», поскольку мы не можем знать настоящего во всех деталях, то не можем достоверно предсказать будущее. Природа накладывает на понятия координаты и импульса принципиальные ограничения, которых не было в классической науке, возможно, из-за малой величины h .

«Бог не играет в кости» — считал Эйнштейн. Споры Бора с Эйнштейном проясняют многое в истолковании смысла квантовой механики, фактически они отражают продолжавшуюся более двух десятилетий борьбу двух мировоззрений, двух теорий познания. Вероятностное толкование волновой функции было подготовлено работами Бора, который применял идею вероятности к переходам электронов, но еще раньше Эйнштейн ввел понятие вероятностей для спонтанного и индуцированного излучений. От них вероятностные представления вошли в науку XX столетия.

Дирак отмечал: «Бор считал, что высшая мудрость должна быть выражена обязательно такими словами, смысл которых не может быть определен однозначно. Следовательно, истинность высшей мудрости является не абсолютной, а только относительной в соответствии с одним из значений двухзначных слов: поэтому противоположное высказывание также правомерно и мудро». *Принцип дополнительности* как вершину диалектики Бора относят к копенгагенской школе.

К Бору постепенно примкнули Гейзенберг, Борн, Иордан, Паули, а в некоторых вопросах и Дирак. Паули даже предложил (1932 г.) для квантовой механики иное название — «теория дополнительности». Иордан в своей книге «Наглядная квантовая теория» (1937 г.) тоже свел все сущее квантовой механики к идее дополнительности и утверждал, что «представление об объективной картине процессов теряет свою справедливость». Представители копенгагенской школы не признавали реальность микрообъектов и микропроцессов, что вытекало из их отрицания причинности в элементарных процессах. Эти вопросы неоднократно обсуждались на Сольевевских конгрессах, «копенгагенцам» резко возражали Лоренц, Эйнштейн, Ланжевен, Планк, Лауэ и другие. Ланжевен, например, писал: «Я уверен, что, отказываясь от детерминизма, мы лишим науку ее основного движущего начала — того, что до сих пор составляло ее силу и залог ее успеха: веры в конечную познаваемость Вселенной. Ничто в переживаемых нами трудностях не оправдывает и не требует изменения наших установок, что, по моему глубокому убеждению, было бы равносильно отречению».

Мысленный эксперимент Эйнштейна, Бориса Подольского и Натана Розена должен был доказать ошибочность квантовой механики. Они задались вопросом, что случится, если состоящая из двух протонов частица распадется так, что протоны разлетятся в противоположных направлениях. По квантовой механике при отсутствии наблюдателя свойства протонов остаются неопределенными и могут

быть представлены как суперпозиция всех возможных состояний. Означает ли это, что каждый протон движется во всех возможных направлениях? Из-за общности происхождения их свойства связаны (коррелируют) друг с другом. Так, по закону сохранения импульса, если один протон полетит вверх, то второй — обязательно вниз. Поэтому, измерив импульс одного, мы узнаем импульс и второго даже в том случае, если он уже улетел на другой конец Вселенной. Эйнштейн назвал это «*действием призраков на расстоянии*», которое нельзя сопоставить ни с какой реалистической моделью из обычного опыта: все свойства каждого из протонов должны быть зафиксированы с того момента, когда они только начали свой разлет.

Допустим, неопределенность в поведении электрона зависит не только от импульса, координаты и спина, но и от каких-то других «скрытых» параметров, которые нам удалось познать. Можно ли в этом случае достичь полного описания, как в классической механике? Это можно осуществить для единичного измерения, но оно так ограничит область значений скрытых параметров, что уже ко второму измерению их будет недостаточно для согласия с квантовой механикой. В работах Гейзенберга и Бора были тщательно проанализированы возможности одновременного измерения двух канонически сопряженных величин (E, t и q, p) и проведены мысленные эксперименты, которые подтверждали принцип неопределенности. Получалось, что микроскопический объект в квантовой механике при использовании одних экспериментальных приборов представляется нам как локализованная во времени (t) и в пространстве (x) материальная точка, не обладающая определенным импульсом (p) и энергией (E), а при использовании других приборов — как нечто, обладающее E и p , но не локализованное по x и t . Бор и его школа, получившая название «копенгагенской», методологически обобщила принцип Гейзенберга. Они утверждали, что в естественных науках можно пользо-

ваться только теми величинами, для измерения которых известна или придумана определенная измерительная процедура и созданы соответствующие приборы. Но результат измерения получается всегда в классических величинах и понятиях, поэтому все объекты уже не существуют сами по себе, как в классической науке, а связаны с экспериментальной установкой вместе с наблюдателем и как бы теряют свою самостоятельную реальность. Впоследствии известный советский физик-теоретик В.А.Фок назвал это свойство «относительностью к средствам наблюдения».

Гейзенберг активно участвовал в обсуждении философских проблем, связанных с квантовой физикой и теорией познания. Вместе с Дираком он выдвинул идею *обменного взаимодействия*, позволившую (независимо от Френкеля) разработать первую квантово-механическую теорию ферромагнетизма, основанную на обменном взаимодействии. В начале 30-х годов они создали теорию дырок Дирака и постулировали эффект поляризации вакуума. За создание плодотворных вариантов квантовой механики Гейзенберг, Шредингер и Дирак стали Нобелевскими лауреатами по физике за 1933 г.

Пользуется вниманием предложенная в 50-е годы Хью Эвереттом гипотеза «множественности миров», в которой считается, что каждое проведение измерения заставляет частицу сделать выбор, например, пойти в правую или левую щель. При каждом таком выборе вся Вселенная как бы расщепляется на две. Но есть и иное мнение. Возможно, квантовая теория требует большей перестройки нашего мышления, нашей логики. Булева логика, основанная на двойности мышления, на утверждениях типа «или-или» не дает нам возможности понять свойств частицы, проходящей через две щели, и квантовая теория может изменить наши представления о мире в большей степени, чем изменились наши понятия пространства и времени с появлением теории относительности.

11.3. ПОСТРОЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ. ПРИНЦИП ПАУЛИ

Убедительным подтверждением теории атома Бора стали опыты Франка и Густава Герца по возбуждению атома потоком электронов. Они доказали существование дискретных энергетических уровней в атоме ртути. Впоследствии они определили энергии возбуждения и для других атомов. И неудивительно, что за блестящие опыты Дж.Франк и Г.Герц стали лауреатами Нобелевской премии по физике за 1925 г. Примерно в это же время Мозли провел опыты по определению зависимости между частотой спектральных линий характеристического рентгеновского излучения и порядковым номером элемента, которые доказали равенство *порядкового номера и заряда ядра*.

В своей Нобелевской речи Бор отметил, что его теория объясняет молекулярные спектры, удовлетворительно согласуясь с опытом. При переходе к объяснению строения элементов таблицы Менделеева он предположил, что замкнутые конфигурации энергетически более выгодны, и после заполнения одной оболочки начинают заполняться следующие. Это предположение помогло Паули прийти (1925–1926 гг.) к принципу запрета, согласно которому в каждом квантовом состоянии может находиться только один электрон. После создания Бором квантовой теории

атома водорода и успехов квантовых представлений в других областях науки активно развивалась спектроскопия, которая явилась ключом в мир внутриатомных явлений. Среди неразрешенных проблем была интерпретация *аномального эффекта Зеемана*, когда возникало отличное от триплетного расщепление линии в магнитном поле. Паули в течение двух лет работал у Бора над этой проблемой. В 1924 г. он выдвинул гипотезу *ядерного спина* для объяснения сверхтонкой структуры спектральных линий, считая, что необъясненные явления «возникают вследствие двузначности свойств электрона, которую нельзя описать классически». Фактически это и была гипотеза существования спина электрона, которую робко высказывал еще Комптон (1921 г.).

В октябре 1925 г. Гаудсмит и Уленбек по представлению физика-теоретика П.Эренфеста (1880–1933) опубликовали статью с предложением гипотезы *спина электрона*, ссылаясь на работу Паули, а после обсуждения с Бором, Эйнштейном и Эренфестом опубликовали большую статью в «Nature» (1926 г.), где понятие спина использовали для объяснения многих явлений в спектре водорода.

Спин электрона имеет размерность вращательного момента-импульса, умноженного на расстояние. Поэтому он имеет размерность постоянной Планка \hbar . Вращательный момент L кратен \hbar , является целым, и ему отвечают $(2L + 1)$ различных состояний с различными значениями проекций на данную ось. Спин электрона в единицах \hbar равен $1/2$ и может иметь два значения: $+(1/2)$ и $-(1/2)$, соответствующие двум значениям проекции на эту ось. Иногда говорят, что он может иметь состояния «вверх» и «вниз». В магнитном поле он направлен по полю или против него. В том же 1924 г. Паули сформулировал принцип, согласно которому на одной орбите не могут одновременно находиться более двух тождественных частиц с полужелыми спинами. Спин электрона в некотором смысле аналог того свойства фотона, которое называют поляризацией света. Он описывает определенную асимметрию электрона, неизотропность его свойств. И этой аналогией, вероятно, руководствовался Паули во время написания работы о спине электрона, поскольку для введения спина в волновую механику он предложил приписать Ψ -функции две компоненты, имеющие смысл двух взаимно перпендикулярных компонент вектора, как для света. Мы не будем обсуждать формализм, введенный Паули, тем более, что вскоре его усовершенствовал Дирак, но интересные соображения Паули о введении спина в волновую механику.

Принцип Паули отражает антисимметрию волновых функций электронов, наличие у них полужелого спина. Согласно принципу Паули, в силу неотличимости микро-частиц исключается вероятность того, что внутри одного атома одинаковые орбиты могут быть заняты одинаковыми электронами. Или: в одном атоме не может быть двух электронов, находящихся в одинаковом состоянии по всем четырем квантовым числам, характеризующим состояние (например, электронов только с противоположными спинами). Этот принцип позволил объяснить химические свойства элементов, определяемые электронами внешних незаполненных оболочек, что, в свою очередь, дало фундаментальное физическое обоснование периодической таблице элементов.

Запрет Паули привел к новым открытиям, к пониманию тепло- и электропроводности металлов и полупроводников. К 1927 г. Паули сумел объяснить *парамагнетизм электронного газа* в металле и структуру электронных оболочек в атоме.

Электронные оболочки атомов строились с помощью принципа Паули. Так была понята таблица элементов Менделеева. Каждый слой представлялся совокупностью стационарных орбит. По Бору, электроны только после заполнения оболочки начинают занимать более высокие орбиты. Методы нахождения допустимых орбит определялись правилами квантования Бора–Зоммерфельда, позволившими продвинуть модель Бора от водорода к другим атомам. Оказалось, что электроны движутся не по окружностям, а по эллипсам, поэтому находящиеся на одном эллипсе электроны должны отличаться ориентацией, а эллипсы одного слоя — эксцентриситетом. В этом случае электроны, находящиеся в одном слое, отличаются энергетическим состоянием. На основании квантово-механического рассмотрения микрообъектов стало ясно, что их

состояние описывается с помощью квантовых чисел. Например, состояние электронов описывается четырьмя квантовыми числами.

Квантовые числа — это целые или полужелые числа, определяющие возможные дискретные значения физических величин или параметров, описывающих состояние микрообъекта.

Главное квантовое число (n) определяет значения энергии, которые может принимать движущаяся частица ($n = 1, 2, 3, \dots$). Электронные слои обозначают большими буквами латинского алфавита K, L, M, N, O, \dots . Наибольшее количество электронов в слое равно $2n^2$, поэтому в самом близком к ядру слое K ($n = 1$) может находиться не более двух электронов, в слое L ($n = 2$) — не более восьми и т.д. Чем больше заряд ядра или порядковый номер в таблице, тем сильнее притягиваются электроны, особенно внутренних слоев, поэтому диаметры слоев с ростом номера элемента уменьшаются, и все атомы имеют почти одинаковые размеры порядка 10^{-10} м. Атомы, относящиеся к одной группе элементов таблицы Менделеева, имеют одинаковую валентность, обуславливающую их сходные химические свойства. На внешних оболочках они имеют одинаковое число электронов, которые называются валентными.

Азимутальное (орбитальное) квантовое число (l) определяет возможные значения орбитального момента импульса в силовом поле, $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Этим числом характеризуют движение электронов в атомах и молекулах, а также нуклонов в ядрах атомов. Состояния с различными значениями l отличаются величиной момента импульса, им присвоили специальные обозначения. Для электрона в состоянии с $l = 0$ — s -состояние, в $l = 1$ — p -состояние или называют его p -электроном; далее с ростом квантового числа — d -электрон или f -электрон. Поскольку орбитальное число всегда меньше главного, то существуют состояния электрона $1s; 2s, 2p; 3s, 3p, 3d, \dots$. Состояние $1s$ является основным состоянием водорода. Этому состоянию соответствует минимум потенциальной энергии, оно самое устойчивое. Возбуждению соответствует переход на более высокое состояние, обладающее большей энергией. Поэтому для возбуждения необходимо затратить энергию. Если это энергия теплового движения, переданная при соударении, то имеем тепловое излучение — обратный переход из возбужденного состояния в основное.

Магнитное квантовое число (m) определяет величину проекции момента импульса на выделенное направление по формулам квантования, $m = -1, \dots, -1, 0, +1, \dots, +l$. Выделенное направление обычно выбирают по направлению внешнего поля. Чаще всего это поле магнитное, откуда и название квантового числа.

Спиновое квантовое число m_s связано с собственным моментом импульса электрона, не связанным с движением электрона в пространстве, которое получило название спина; $m_s = +1/2; -1/2$. Спином обладают все элементарные частицы (кроме мезонов), это внутреннее свойство микро-частицы. Значения спинового квантового числа определяются принципом Паули.

Так, принцип Паули позволил объяснить насыщение уровней и «дал запрет» электронам находиться в одина-

ковом состоянии. В соответствии со свойствами симметрии ψ -функции при перестановке двух частиц (электронов) для электронов возможны только антисимметричные состояния. В дальнейшем принцип Паули сыграл решающую роль при построении статистики Ферми–Дирака для частиц с полуполным спином — *фермионов*. Для частиц с целым спином (в единицах $\hbar/2\pi$) — *бозонов* — была построена статистика Бозе–Эйнштейна. Принцип Паули не имеет аналога в классической физике, и физические причины существования этого запрета не полностью еще понятны. Паули предложил сначала простое правило, автоматически объясняющее наличие групп из 2, 8, 18 и 32 элементов. Он постулировал, что одну электронную орбиталь (или стоячую волну) могут занимать не более двух электронов. Вскоре было обнаружено наличие спина у электрона, и получилось, что принцип Паули имеет основание.

Если идти по системе химических элементов в направлении увеличения их номера, то оказывается, что электронами сначала заполняются низшие уровни энергии. Так, атом висмута выглядит так же, как и атом свинца, но с одним отличием — у висмута на $6p$ -оболочке на один электрон больше. Существует еще одно правило заполнения оболочек — *правило Хунда*. Согласно ему, при заполнении s , p , d и т.д. уровней их сначала занимают электроны с одинаковой ориентацией спина, и только потом — с противоположной. Так можно построить модели 92 стабильных атомов периодической системы.

Так, *атом азота* имеет 7 электронов; из них по два (в «правом» и «левом» спином) располагаются на уровнях $1s$ и $2s$, а остальные три — на уровне $2p$, который может вместить только 6 электронов. По правилу Хунда последние три электрона азота имеют одинаковую ориентацию спина. В волновой модели каждому из p -электронов соответствует волновая функция из двух симметричных «яйцевидных» половинок; три из них могут быть ориентированы вдоль любой из трех осей прямоугольной системы координат, в результате атом выглядит сферически симметричным. Следующий атом — кислород — должен содержать в одном из этих « p -пространств» еще один электрон с противоположно направленным спином. Это можно представить так: две полностью конгруэнтные p -орбитали проникают друг в друга, совершенно не влияя одна на другую.

Понимание устройства атомов еще не позволяет понять физические свойства тел. Ведь применительно к отдельному атому нельзя говорить ни о давлении, ни о температуре, ни о плотности. Все эти качества тел присущи только совокупности свободно двигающихся атомов или молекул — это газы. Поэтому «целое» не является суммой «частей», оно обладает более сложными свойствами.

Молекула — следующая за атомами структурная единица. Она образуется за счет соединения атомов с помощью *химической связи*. Способность атома образовывать химические связи называется *валентностью*. Инертные газы с трудом образуют химические соединения, поскольку имеют устойчивую электронную оболочку. Внешняя оболочка атома, содержащая орбитали самых высоких энергий атома, называется *валентной оболочкой*. Современные представления о химической связи основаны на теории валентности. Атомы при образовании химической связи при-

ближаются к достижению наиболее устойчивой электронной конфигурации, т.е. имеющей более низкую энергию. При этом атомы могут терять (приобретать) электроны или обобществлять их до достижения такой же конфигурации, как у благородного газа этого же периода, т.е. до значения 2 или 8.

Ионная связь основана на переносе валентных электронов от одного атома к другому и электростатическом притяжении этих образовавшихся ионов. Это — самый распространенный вид связи. Молекула представляется электрическим диполем, а центры ионов в нем расположены на определенном расстоянии друг от друга, называемом *длиной связи*. Для хлорида калия, например, длина связи равна $1,3 \cdot 10^{-10}$ м. Силы электростатического притяжения могут возникнуть и между нейтральными атомами. Это происходит так: при сближении атомов возникает отталкивание из-за отрицательно заряженных их электронных оболочек. Но при этом смещается центр тяжести отрицательных зарядов относительно положительных, и каждый из атомов индуцирует в другом электрический диполь, что ведет к взаимному притяжению. Это притяжение связывают с действием сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса), которые на порядок меньше по величине, но имеют радиус действия, превосходящий размеры молекул.

При ковалентной связи прочное соединение нейтральных атомов достигается за счет более глубокого взаимодействия между ними. Пример: молекула H_2 . По квантовой механике прочность такой связи обусловлена *обменным резонансом* — атомы колеблются с одинаковой собственной частотой, и при связывании их суммарная энергия становится меньше, чем в изолированном состоянии. Электрон 1 притягивается ядром 2, и электрон 2 притягивается ядром 1. Важно, чтобы электроны имели противоположно направленные спины, тогда по принципу Паули они находятся в наименьшем состоянии, и орбиты отдельных атомов сливаются в одну орбиталь, охватывающую пространство обоих атомов водорода. Она имеет почти эллиптическое сечение. Говорят, что происходит «перекрывание» собственных функций обоих электронов. (При ионной связи электрон остается принадлежащим лишь одному из атомов.) Это становится энергетически выгодно, системы удерживаются вместе. В молекулах газов сохраняется вероятность порядка 5% того, что электрон несколько смещен к одному из атомов. Молекулы щелочно-галогидных соединений имеют небольшой дипольный момент, их центры тяжести расположены на некотором расстоянии. В молекуле воды две однократно занятые p -орбитали атома кислорода частично сливаются с p -орбиталью атома водорода, но из-за электростатического отталкивания между обоими ядрами водорода валентный угол не 90°, а 105°. Форма молекул с ковалентными связями определяется формой электронных орбиталей. Большинство органических соединений существует благодаря ковалентной связи.

Водородная связь слабее ковалентной или ионной связи в 15–20 раз. Она возникает, если атом водорода помещен между двумя электроотрицательными атомами. Водородная связь определяет ассоциацию молекул типа диме-

ров воды — $(\text{H}_2\text{O})_2$. На слабой водородной связи «держатся» полимеры, входящие в состав биомолекул, т.е. и жизнь.

Ионная и ковалентная связи — это предельные случаи химических связей. Чаще всего встречаются молекулы с

11.4. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ АТОМА УГЛЕРОДА И ЕГО РОЛЬ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Примерно из ста химических элементов, встречающихся в земной коре, для жизни необходимы только 16, причем четыре из них — водород (H), углерод (C), кислород (O) и азот (N) наиболее распространены в живых организмах и составляют 99% массы живого. Биологическое значение этих элементов связано с их *валентностью* (1, 2, 3, 4) и способностью образовывать прочные ковалентные связи, которые оказываются прочнее, чем связи, образуемые другими элементами той же валентности. Следующими по важности являются фосфор (P), сера (S), ионы натрия, магния, хлора, калия и кальция (Na, Mg, Cl, K, Ca). В качестве микроэлементов в живых организмах присутствуют также железо (Fe), кобальт (Co), медь (Cu), цинк (Zn), бор (B), алюминий (Al), кремний (Si), ванадий (V), молибден (Mo), йод (I), марганец (Mn).

С точки зрения химии *жизнь* — это всевозможные превращения разнообразных крупных и сложных молекул, главным элементом которых является углерод. Он важен не с точки зрения распространенности на Земле, в земной коре углерода всего 0,055%, в то время как кислорода 60,50%, кремния 20,45% и даже титана 0,27%. В атмосфере двуокиси углерода 0,03%, т.е. углерода всего 0,008%. Все биологически функциональные вещества, кроме нескольких солей и воды, содержат углерод. Это *белки, жиры, углеводы, гормоны, витамины*. Число соединений углерода огромно. Они называются органическими соединениями, поскольку когда-то считалось, что такие молекулы могут образовываться только в живых организмах.

Соединениями углерода занимается *органическая химия* — одна из важнейших областей химии. Органика разлагается, горит при не очень высокой температуре, при сгорании в воздухе углерод окисляется до CO_2 . Громадное большинство органических соединений содержит водород, который тоже окисляется до воды. Чистый углерод встречается в природе в виде графита и алмаза. До 1829 г. сторонники витализма считали, что без участия живого нельзя получить органические соединения, только «жизненная сила» способна изготовить уксусную кислоту или спирт. Немецкий химик Ф.Велер доказал ложность этого учения. Велер получил мочевины выпариванием раствора циановокислого аммония NH_4NCO — соли, которую можно изготовить из простых веществ, не связанных с жизнедеятельностью организмов. Этот синтез был первым примером искусственного получения органики.

Сегодня синтезированы сложнейшие вещества, которые не созданы и в природе. В технике углерод занимает все большее место: природные и синтетические волокна, природный и синтетический каучук, пластмассы, нефтепродукты, бумага, красители, чугун, медикаменты...

Идею о четырехатомности углерода высказал в 1858 г. шотландский химик А.С.Купер, его поддержал Ф.Кекуле в статье «О строении и превращениях химических

промежуточными типами связей. Более полное представление о типах связей получают из карт электронных плотностей, получаемых из расчетов на ЭВМ. Так квантовая механика атома объяснила проблемы химической связи молекул с позиции физики.

соединений и химической природе углерода». Кекуле исходил из того, что атом углерода всегда связан с четырьмя атомами одновалентного элемента или двумя атомами двухвалентного, т.е. сумма единиц сродства элементов, связанных с углеродом, равна четырем. Ясное понимание четырехвалентности углерода определило создание теории строения органических соединений, развитой А.М.Бутлеровым. Он сформулировал определение понятия *химического строения как способа связей в молекуле*. Бутлеров считал, что химический характер веществ зависит от природы и количества его составных частей и химического строения соединения. С помощью структурной теории развивалась систематика органических соединений. *Структурные формулы* наглядно отражали связь формулы со свойствами вещества, объяснили изомерию и предсказали свойства неизвестных еще соединений.

Органическая химия посвящена изучению углерода и его соединений. Атомный номер углерода — 6, ядро содержит 6 протонов и 6 нейтронов, вокруг ядра вращаются 6 электронов, масса атома равна 12. При химических реакциях углерод способен присоединить 4 электрона и образовать устойчивую оболочку из 8 электронов, т.е. имеет валентность, равную четырем, и способен к прочной ковалентной (присоединением электронов) связи. Например, эмпирическая формула одного из таких прочных соединений, метана, — CH_4 , а в структурном изображении — это тетраэдр (четыре симметричные связи углерода).

Зная *валентность углерода*, можно достаточно просто изобразить положение всех недостающих водородных атомов, что позволяет сосредоточить внимание на наиболее важных связях и химических группах. Такие прочные ковалентные связи углерод может образовывать и с атомами других элементов (H, O, P, N, S), и с углеродными (C — C связь). Внутреннее отличие органики от большинства неорганических соединений выражается в том, что химические связи, как правило, в органических соединениях валентные, а ионные связи — очень редки.

Способность углерода образовывать стабильные цепи и кольца, которые обеспечивают разнообразие органических соединений, и эти связи могут быть кратными, является уникальным его свойством (рис.14).

Октан — это восемь атомов углерода в окружении водородных, образующих цепочку, в которой атомы лежат не на прямой, а зигзагообразно, свободно вращаясь в местах сочленения. Октан и его изомеры, состоящие из того же числа атомов, но имеющие разветвленную структуру из-за боковых углеводородных групп, входят в состав бензина. Маленькая капелька этой жидкости имеет больше молекул, чем Галактика звезд. Некоторые молекулы свернуты в клубок, некоторые вытянуты в длину, большинство же находится в промежуточном состоянии. «Молекулы октана корчатся и извиваются, скручиваются и раскру-

чиваются, так что галлон бензина больше похож на вместилще молекулярных личинок, чем на коробку с короткими палочками». Молекула тринитротолуола симметрична. Ее шесть атомов кислорода готовы к окислению: реакция внутримолекулярного высвобождения энергии происходит мгновенно и начинается от легкого толчка.

Понятие о двойной связи углерода ввел австрийский физик Й. Лошмидт при рассмотрении расположения атомов в пространстве (1861 г.). Для изображения бензола он использовал окружность, в которой наметил шесть точек для расположения атомов водорода. Чередуя одинарные и двойные связи, Кекуле соединил шесть атомов углерода в ячейки, подобные пчелиным сотам, и у каждого из атомов С осталось по одной свободной валентности для каждого из шести атомов водорода. Так, у Кекуле формула C_6H_6 превратилась в *структурную формулу бензола*, его знаменитое «бензольное кольцо», отражающее наглядно четырехвалентность углерода. Свой успех он называл «игрой воображения» и говорил, что картина «бензольного кольца» возникла у него перед глазами во время размышлений перед камином. И на «Празднике бензола» (1890 г.), еще при жизни Кекуле, и на торжествах, посвященных столетию Кекуле в 1929 г., отмечалось не только важное научное, но и промышленное значение установления строения бензола. Без этого невозможно было понять и строение сложных углеводов, и их соединений, и производных. Правда, структурные формулы Кекуле были двухмерными и не могли отразить такое свойство молекул, как *изомерию*.

Разница в строении молекул крахмала (источника энергии) и целлюлозы (строительного материала клеток растений) заключается лишь в небольшом изменении конфигурации водородной связи между мономерными звеньями в цепи. Другой пример: отличие в окраске алых маков от синих васильков связано с отличием одного атома из тридцати, составляющих пигмент окраски. Фиолетовый краситель цианидин, которым особенно богата ежевика, входит в состав обоих цветов. Кислый сок васильков богат ионами водорода, способными в определенном месте присоединяться к молекулам цианидина. Насыщенная водородом молекула активно поглощает красные лучи, отражая синие. У маков щелочная среда практически не содержит свободных катионов водорода, краситель оказывается ненасыщенным, поэтому они поглощают синие лучи, отражая красные. Отличие мужских половых гормонов (тестостеронов) от женских (эстрадиолов) состоит в замене атома кислорода молекулой гидроксильной группы (ОН) и убиении метильной группы (CH_3) в одном из нескольких колец, состоящих из десятков атомов молекулы холестерина.

Сравнивая *оптические свойства* винной и виноградной кислот, Пастер (1848 г.) заметил, что кристаллы двойных солей виноградной кислоты *вращают плоскость поляризации* на одну и ту же величину, но одни — вправо, а

другие — влево. Отсюда он сделал вывод об асимметричном строении кристаллов и о различном пространственном строении образующих их молекул. После установления строения бензола и создания структурной теории на *изомерию* обратили особое внимание.

Немецкий химик-органик Й. Вислиценус обнаружил существование двух форм молочной кислоты — оптически активной и неактивной. Он попытался объяснить это явление на основе геометрической изомерии и писал (1875 г.), что это связано, вероятно, с неодинаковым пространственным расположением атомов. Асимметричное расположение атома углерода в это же время отметил и Вант-Гофф, расположив четыре валентности углерода в направлении вершин тетраэдра и поместив атом С в центре. В 1888 г. также немецкий химик-органик В. Мейер назвал такое построение «*стереохимическим строением*» и дал тем самым название новой области химии.

В 1890 г. А. Ганч и швейцарский химик-неорганик А. Вернер распространили такое изображение на азот, посчитав атом азота находящимся в одной из вершин тетраэдра, а его валентные связи направленными к трем другим вершинам. Впоследствии гипотеза Вернера о *координационных соединениях металлов* была подтверждена результатами рентгеноструктурного анализа. В 1896 г. петербургский академик П. Вальден открыл явление, названное «*обращением*» знака *оптической активности*, — можно изменить направление вращения плоскости поляризации заменой одного из атомов (или радикалов) при тетраэдрическом асимметричном атоме углерода. Так структурная химия перешла от изображения формул на плоскости к их изображению в трехмерном пространстве.

Кратные связи, кроме углерода, могут образовывать *фосфор* и *кислород*. Размеры органических молекул определяются углеродным скелетом, а химические свойства — присоединенными к нему элементами и химическими группами, насыщенностью скелета и формой молекул, которая зависит от углов связей. Среди «строительных блоков» — простых органических соединений — крупных молекул можно выделить *аминокислоты*, из которых синтезированы белки; *моносахариды* и *азотистые основания*, синтезирующие нуклеиновые кислоты; жирные кислоты, *глицерол* и *холин*, синтезирующие липиды. Таким образом, небольшое число органических молекул дает начало крупным молекулам и структурам живых клеток. Эти немногие виды молекул могли синтезироваться в «первичном бульоне» мирового океана еще до появления жизни на Земле из простых неорганических молекул — диоксида углерода, азота и воды.

Биохимия, или химия живых организмов, которая сначала развивалась как подспорье медицины, со временем выделилась в отдельную область знания. Она является не только фундаментом физиологии, объясняя работу биосистем, но и играет объединяющую роль для всей биологии.

Глава 12. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА (ОТ МИКРОМИРА К МАКРОМИРУ)

12.1. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СОСТАВЕ ВЕЩЕСТВ. ЗАКОНЫ СТЕХИОМЕТРИИ

Учение о составе веществ — первая концептуальная система химии. Свойства вещества оказались зависящими от четырех факторов: 1) элементного и молекулярного состава; 2) структуры; 3) кинетических факторов протекания химического процесса; 4) степени организации вещества.

Понятие «*химия*» изменялось с течением времени. Менделеев в конце определил ее как учение об элементах и их соединениях, теперь кажется, что самым важным в химии является учение о процессах, а не о готовых формах материи. Химию делят по предмету исследования на *органическую* и *неорганическую*. Выделение *аналитической* химии связано с методами исследования. Появление *биологической* и *физической* химии обусловлено близостью предметов и методов исследования со смежными науками. Появились *химия твердого тела*, *химия поверхности*, *химия комплексных соединений*, *химия растворов*, *химия полимеров*, *химия нефти* и другие. Одна цель объединяет химию — **задача получения веществ с необходимыми свойствами**. Поэтому и история химии есть единый закономерный процесс решения основной проблемы, а не совокупность разных химических наук. Связь науки с требованиями человеческой практики подтверждает вся история химии.

Химические знания копились с древнейших времен, поскольку человек искал необходимые вещества для обеспечения своей жизнедеятельности. Этот путь можно условно разделить на несколько этапов, каждый из которых связан с ценностями общества и возможностью их достижения в выбранное время.

Первый этап — донаучный, был ориентирован на поиски «философского камня», «эликсира долголетия», на получение золота и серебра из других веществ. Родиной алхимии считается Древний Египет. Там в строжайшей тайне сохранялись способы выплавки металлов, получения сплавов для монет. Расширение торговли требовало научиться превращать свинец или железо в золото. Алхимическая направленность знаний и рецептов связывалась с астрологией и магией. Семь планет связывали с семью известными тогда металлами. Арабы, вторгнувшись в VII в. в Египет, перефразировали слово «хеми» в «аль хеми», так впоследствии и появилась алхимия. Джабир (европейское имя Гебер) считал, что все семь металлов образованы из элементов — серы и ртути. В XIII–XIV вв. в связи с поисками *эликсира*, помогающего превращению в золото, была открыта серная и азотная кислоты, изучены процессы брожения, появились вино и уксус. Постепенно возникали и иные цели. Так, Парацельс считал, что равновесие в организмах можно достичь с помощью определенных химических соединений, использующих минералы. Болезни вызывает избыток или недостаток каких-то элементов. Он создал *ятрохимию* на основе серы, ртути и соли как горючести, летучести и твердости, сопоставив каждому из этих свойств микрокосм человека — душу, дух и тело. Так ятрохимия отделялась от алхимии.

Во второй половине XVII в. этот период *алхимии* исчерпал себя. Но был накоплен огромный опыт по различным превращениям веществ, по конструированию приборов и технике экспериментов, были открыты новые вещества и исследованы их свойства, хотя цель не была достигнута. Были открыты новые металлы (платина, висмут), изучены необычные свойства многих веществ. Все более ощущалось, что существует какой-то предел превращаемости веществ. В то же время больших успехов достигла техническая химия — развивалась металлургия, производство стекла, бумаги. Развитие ремесел, фармацевтики, промышленности требовало получение новых веществ. В это время возрождение П. Гассенди идей атомизма привело к формулировке понятия *молекулы*, как мельчайшей частички, сохраняющей свойства вещества.

Формирование химии как науки связано с Р. Бойлем. Он отделил химию от ремесленных и медицинских целей, развил атомистические представления, объясняя самими частицами, их формой, расположением и движениями превращения веществ и их свойства. Бойль поставил вопрос о происхождении свойств веществ, при этом выделял мельчайшие частички («атомы»), которые могут образовывать большие — «кластеры». Так свойства веществ связывались с **составом вещества**. Бойль понимал под *химическим элементом* предел химического разложения вещества и выдвинул программу изучения химических элементов. По выражению Ф. Энгельса: «Бойль делает из химии науку». Бойль сумел ввести в химию индуктивный метод. Видя основную задачу химии в изучении состава тел, он требовал, чтобы элементы состава при соединении давали исходное вещество, т.е. ввел *синтез как критерий верности анализа*. На идее *атомистического строения* были созданы кинетическая теория газов Бойля, Ломоносова, Д. Бернулли. Ломоносов сумел соединить корпускулярные представления о строении веществ и кинетическую теорию теплоты и пришел к формулировке *закона сохранения вещества и движения*.

Понятие химического элемента связывалось у Лавуазье с веществами, не подвергающимися дальнейшему разложению (как и у Бойля), и он включил в свою систему помимо азота, водорода, кислорода, серы и др. известь, магнезию, глинозем. Но он понял важность точного измерения количества веществ, участвующих в реакции. Количественные методы привели к открытию новых элементов — кобальта (1735 г.), металлического никеля (1751 г.), водорода (1776 г.) (ранее наблюдаемого Бойлем в 1766 г., Ломоносовым в 1745 г., Г. Кавендишем в 1766 г.), кислорода (1771–1774 гг.) (Пристли в Англии, Шееле — в Швеции, Лавуазье — во Франции), фтора (1771 г.) и т.д. Проводя точные измерения, Лавуазье установил *закон сохранения массы*, не зависящий от характера реакции.

В XVIII в. основной проблемой химии была *проблема горения*. Для объяснения процесса И. Бехером и Г. Шталем была предложена теория *флогистона*. Так называли неведомую субстанцию, содержащуюся во всех горючих телах

и выделяющуюся при горении. Теория флогистона, будучи качественной, описательной, стимулировала введение количественных методов анализа состава веществ. После открытия Шееле *сложного состава воздуха* Лавуазье создал теорию образования металлов из руд и пришел к *кислородной теории горения*. Тем самым флогистон был изгнан из химии, как и теплород из физики. Опыты Кавендиша, проведенные в это время, показали, что образующиеся при горении газы конденсируются в воду. Так Лавуазье понял, что вода есть сложное вещество и является продуктом соединения двух газов. Он назвал второй газ «водородом», так как он образует воду, и доказал, что он горит в присутствии кислорода.

На пути *рационализации химии* Лавуазье предпринял первую попытку *систематизировать химические элементы*. *Классификация Лавуазье* основана на соединениях кислорода (*кислоты, основания, соли, органические вещества*). Так учение о составе веществ стало частью рациональной науки, но до XIX в. оно составляло всю химию. Развитие промышленного производства требовало расширения сырьевой базы, понимания происходящих в химических реакциях процессов.

Понятие химического соединения отражало развитие представлений об элементах. В 1773 г. И.Рихтер показал, что химические элементы взаимодействуют между собой в строго ограниченных количествах, сохраняющихся в виде пропорциональных чисел при переходе от одного сложного вещества к другому. Эта упорядоченность была названа Рихтером *стехиометрией*, т.е. мерой элементов, входящих в состав химического вида. Сам закон Рихтера стали называть *законом эквивалентов*. Известна дискуссия, поднятая Прустом и Бертолле о возможности существования химических соединений постоянного и переменного состава, которая не окончена и сейчас.

Закон постоянства состава установил французский химик Ж.Пруст (1799 г.). По этому закону любое *химическое соединение* обладает строго неизменным составом, атомы прочно притягиваются, и этим химическое соединение отличается от смесей. Всякое чистое соединение имеет неизменный состав, не зависящий от способа получения этого вещества.

Дж.Дальтон теоретически обосновал этот закон. Он развил атомистические представления, показав, что все вещества состоят из молекул, а молекулы — из атомов. Дальтон ввел обозначения атомов — составных частей молекул, и отметил возможность «обмена» атомами при реакциях. Так Дальтон пришел к *закону кратных отношений*, согласно которому если определенное количество одного элемента вступает в соединение с другим элементом в нескольких весовых отношениях, то количества второго элемента относятся между собой как целые числа. Он полагал, что все атомы каждого отдельного элемента одинаковы и обладают определенным атомным весом. Поскольку абсолютное значение атомного веса нельзя установить, можно использовать относительные веса. Выбрав за единицу вес атома водорода, Дальтон составил *первую таблицу атомных весов*.

Атомные веса элементов более точно определял шведский химик Й.Берцелиус. Он отметил, что в солях

имеют место простые и постоянные отношения между атомами кислорода основания и атомами кислорода кислоты. В 1826 г. он опубликовал свою таблицу атомных весов, где они определялись по отношению к кислороду, вес которого был принят за 100. Почти все значения атомных весов были столь точны, что сохранились до сих пор, но в отличие от определений Дальтона они не были целыми числами. Берцелиус ввел и обозначения элементов по первым буквам греческого или латинского названия, которые используются сейчас.

Эти три закона стехиометрии (эквивалентов, постоянства состава и кратных отношений) стали основанием химии. Утверждение дискретности химической организации вещества стало ведущим представлением вплоть до создания квантовой химии.

Развитие молекулярной физики позволило к этому времени иначе взглянуть на свойства вещества в простейшем агрегатном состоянии, появились эмпирические газовые законы, связывающие параметры газов. Эти эмпирические законы Бойля–Мариотта, Гей–Люссака и Шарля удалось вывести из идеи молекулярного строения вещества Д.Бернулли и Ломоносову. В 1811 г. А.Авогадро установил, что при одинаковых условиях равные объемы газов содержат одинаковое число молекул. Это значит, что грамм-молекула любого газа при одинаковых условиях (давлении и температуре) занимает одинаковый объем. При нормальных условиях он равен 22,41 л, и в этом объеме содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул газа. Это число получило название числа *Авогадро*.

Молекулой называли наименьшую частичку вещества, сохраняющую его свойства. Но молекулы становились все сложнее, к ним стали относить полимеры, кристаллы, т.е. агрегаты. Значит, проблема состава веществ оставалась актуальной.

Основные принципы, теории и законы химии, единые понятия были утверждены на первом Международном конгрессе химиков (1860 г., Карлсруэ). Химия тесно связана с производством, поэтому ее основная задача — *получение веществ с нужными свойствами*. Реализация этой задачи требует умения осуществлять качественные превращения веществ, т.е. решить задачу *происхождения свойств веществ*. Поэтому на первом этапе свойства веществ определялись *элементным и молекулярным составом*.

Учение о составе веществ сильно зависело от возможностей анализа, поэтому понятие химического элемента изменялось с развитием методов. От эмпирико-аналитической концепции сформировывалась атомно-теоретическая концепция.

В середине XIX в. из сопоставления периодичности химических свойств веществ и атомных весов элементов была построена *Периодическая таблица элементов* Менделеевым и Мейером. По выражению Зелинского, открытие периодического закона явилось «открытием взаимной связи всех атомов в мироздании». Показателем химического элемента стало его место в периодической системе. В то время было известно всего 62 химических элемента, но на основе установленной зависимости Менделееву удалось предсказать свойства еще не открытых

элементов, и они вскоре были найдены. Уже в XIX в. периодический закон стал «фундаментом общей химии», упорядочил химические свойства, придал новое содержание проблеме соотношения состава и свойства.

Периодичность свойств элементов и их атомная масса есть функция порядковых номеров элементов в таблице, заключил в 1897 г. Ридберг. Поэтому понятие *химического элемента* связано с *одинаковым зарядом ядра атомов*. В эту совокупность включаются и разные *изотопы* — атомы с различной атомной массой. Поскольку при химических превращениях любой атом сохраняет заряд ядра, то он остается атомом данного элемента. Сам атом меняется, так как меняется его электронная оболочка, отвечающая за химические свойства. Квантовая теория периодичности свойств элементов создавалась в 30-е годы.

В связи с пониманием природы химических связей как обменных взаимодействий валентных электронов четко определилось понятие *химического соединения* — это качественно определенное вещество, состоящее из одного или нескольких элементов, атомы которых за счет химической связи объединены в частицы (молекулы, комплексы,

монокристаллы или другие агрегаты). Впоследствии были открыты *макромолекулы полимеров*, которые состоят из повторяющихся, химически связанных структурных единиц — частей мономерных молекул с одинаковыми химическими свойствами. Сложно организованной единицей являются *молекулярные ассоциаты*. Более крупная структурная единица, называемая *молекулярным агрегатом*, состоит из атомов и молекулярных блоков, причем при образовании агрегата происходит изменение фазового состояния вещества.

Аналитическая химия развилась из учения о составе веществ. Учение о составе дало ключ к решению проблемы генезиса свойств веществ, появилась возможность планировать и осуществлять реакции, выполняющие определенную цель. Появились новые технологии, с 1804 г. в России стал издаваться специальный «Технологический журнал», где печатались статьи по химии и химической технологии производства кислот, щелочей, солей. Так первая концептуальная система химии привела к новой технологии.

12.2. ПОНЯТИЯ «ВАЛЕНТНОСТЬ» И «ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ». РАЗВИТИЕ СТРУКТУРНОЙ ХИМИИ

Понятие валентности, введенное в науку для описания свойства одного изолированного атома, постепенно стало отражать свойства связанного атома, т.е. атома, находящегося в молекуле и тем самым изменившего свои свойства под влиянием других атомов.

Английский химик Э.Франкленд использовал впервые понятие валентности в 1853 г. Тогда валентность водорода считалась общепринятой, поэтому для другого элемента она выражалась числом атомов водорода, которое может присоединить или заменить один атом рассматриваемого элемента. Вместе с немецким химиком А.Кольбе он установил трехвалентность азота, фосфора, мышьяка и четырехвалентность углерода. При этом они отметили, что валентность зависит от состояния атомов как рассматриваемого элемента, так и от химической природы другого реагента: углерод в соединении с кислородом может образовывать и CO, и CO₂. Значит, валентность позволяет оценить формулу химического соединения. Так пришли к понятию *стехиометрической валентности*.

В 1857 г. немецкий химик Кекуле пришел к выводу, что отдельные элементы могут замещать в ряде соединений три атома водорода, а другие — только один или два. Он ввел понятие *химического сродства*, которое означало число атомов водорода, которое может заменить данный элемент. Число единиц сродства он и назвал *валентностью*. Под валентностью понимали целочисленную величину, отражающую количество единиц сродства свободного атома любого элемента. Считалось, что атом водорода имеет одну единицу сродства, атом кислорода — две и т.д. Поэтому говорили, что атом углерода при образовании диоксида связывает все четыре единицы сродства, а при образовании оксида — только две: O = C = O и =C =O. Теории Кекуле и Купера легко объясняли строение и «сложных радикалов», и органических соединений — молекула представлялась целостным образованием, которое складывается из атомов за счет полного взаимного насыщения единиц сродства.

Простота и наглядность объяснений вела к *аддитивному мышлению*.

Энергетическую неравноценность разных химических связей определяла в теории Бутлерова *химическую активность веществ*. В некотором роде Бутлеров осуществил синтез представлений атомистики с непрерывностью химических отношений, идеей, отвергнутой Прустом и Дальтоном. Появилась новая характеристика — *непрерывность изменения энергии химических связей*. Под *химической связью* теперь понимают такой вид взаимодействия атомов, который обусловлен совместным использованием их электронов. Существуют разные виды химической связи — *ковалентная, ионная, полярная, металлическая, водородная*.

Теория Бутлерова называется *теорией химического строения* потому, что в ней химическая связь и химическая энергия — основа объединения атомов в молекулы. С 70-х годов приняли, что **валентность** — это *число химических связей*, осуществляемых атомом при образовании соединений. Так валентность стала *структурной* характеристикой связанного атома. Так, водород при переходе из одного соединения в другое меняет свои признаки: в HCl он предстает как катион, в H – CH₃ и H – H — как ковалентно связанный атом, а в H – Na — как анион. Теперь понятно, что реакционная способность отдельных фрагментов молекулы определяется энергией связи: для H – CH₃ энергия E = 412 кДж/моль; для H – C (CH₃)₂ E = 335 кДж/моль; для H – C (C₆H₅)₃ E = 67 кДж/моль.

Установив порядок связей, теория Бутлерова стала действенным орудием *органического синтеза*. Были синтезированы многие лекарства, красители, взрывчатые вещества. Но в производстве использовалось дорогое органическое сырье, пути получения многих необходимых веществ не были понятны. Фактически если нужно было выращивать кристаллы с определенными дефектами в решетке, то было непонятно, как избавиться от других дефектов.

Энергетическая прочность химических связей вошла в понятие *структуры*. В результате понятие свойств вещества расчленилось на два понятия — химических свойств макроскопического тела и реакционной способности отдельных структурных элементов, всей молекулы и всего вещества, как совокупности молекул. Свойства веществ оказались зависящими не только от его состава, но и от *структуры молекул*. На основе учения о валентности была разработана теория строения молекул.

Под *молекулярной структурой* понимают сочетание определенного числа атомов, закономерно расположенных в пространстве и связанных друг с другом посредством химической связи.

Вскоре были открыты *оптические* и *геометрические изомеры органических соединений*, различие таких свойств можно объяснить только разным пространственным расположением молекул. В 1874 г. Вант-Гофф и Бель выдвинули стройную концепцию, получившую название *стереохимии*. Им удалось расширить теорию Бутлерова, описать изменения свойств вещества под влиянием таких факторов, как зеркальная изомерия, эффекты вращений вокруг какой-то связи и др. Вант-Гофф в книге «Химия в пространстве» высказал мысль о том, что четырехвалентный атом углерода в органических соединениях, расположенный в центре тетраэдра, в вершинах которого находятся связанные с углеродом атомы или атомные группы, является асимметрическим. Из анализа оптических свойств органических соединений он заключил, что любое соединение, вызывающее в растворе поворот плоскости поляризации, содержит атом углерода.

Изучением структур неорганических соединений занялся швейцарский химик А.Вернер (1866–1919). Он создал *координационную теорию комплексных соединений*. В «комплексах» вокруг центрального атома группируются в большом количестве атомы, радикалы и даже молекулы из-за возникновения так называемых вторичных валентностей. На основе его теории в наши дни объясняется химическое строение таких веществ, как гемоглобин, хлорофилл, ферменты, лаки. В 1911 г. он обнаружил ранее предсказанные оптически активные неорганические изомеры — соединения железа, кобальта и хрома. *Оптическая активность* перестала быть связанной только с атомами углерода. За свои работы, расширившие представления о химических связях, Вернер стал лауреатом Нобелевской премии по химии за 1913 г.

Сразу же после открытия электрона начали предприниматься попытки связать его с природой химической связи. Немецкий физик Й.Штарк, начавший развивать идеи Дж.Дж.Томсона в этом направлении, ввел понятие валентных электронов, связав *валентность* элемента с числом электронов на периферии атома. За открытие расщепления спектральных линий в электрическом поле он был удостоен Нобелевской премии в 1919 г.

Начало квантовой химии было положено работами Ф.Лондона и В.Гайтлера (1927 г.). Они уже не считали электрон двигающимся по определенной орбите, а говорили об *электронном облаке*, и вероятность его нахождения в какой-то области определяли как квадрат волновой функции. Первые расчеты молекулы водорода показали, что

ковалентную связь образуют два электрона с антипараллельными спинами, и при этом увеличивается электронная плотность между двумя атомами почти до 20%, что приводит к уменьшению энергии системы и ее стабилизации. Поэтому пребывание двух таких электронов энергетически более выгодно, чем нахождение одного электрона в поле своего ядра. Так, один неспаренный электрон — у атома водорода, и он функционирует как одновалентный элемент. У гелия в нормальном состоянии их нет — два электрона находятся на одной орбитали. Поэтому возбуждение атома гелия требует больших затрат энергии — 1672 Дж/моль. Такие энергии в ходе обычных химических реакций не наблюдаются, и гелий ведет себя как инертный газ.

Метод атомных орбиталей усовершенствовал и применил для расчета достаточно сложных молекул в 30-е годы американский физик и химик Л.Полинг. Наибольшую известность ему принесли расчеты атомной структуры молекул белков. Но огромные вычислительные трудности «заморозили» выполнение намеченной обширной программы химических исследований (точные расчеты были сделаны только для водорода, а остальные — на приближенных к водороду), и особого прогресса в развитии химии как науки до широкого использования ЭВМ не произошло. Исследования молекулярных структур с помощью рентгеновского излучения начались в результате работ Лауэ, отца и сына Брэггов, П.Дебая и др. Развивался *рентгеноструктурный анализ*, стали широко использоваться дифракция рентгеновских лучей и электронов, спектроскопические методы и метод ядерного магнитного резонанса, что позволило определить строение огромного числа молекул. Это, в свою очередь, повлияло на развитие методов молекулярной спектроскопии, для наблюдений стали использоваться высокочувствительные спектрографы, а для обработки данных — быстросрабатывающие ЭВМ.

Наличие или отсутствие связи между атомами изображают в виде графических или структурных формул. Иногда используют термин «*топология молекул*». Как известно, топология — это раздел математики, который изучает свойства тел, не зависящие от их формы и размеров. Молекулы же обладают как метрическими (длины химических связей, углы между ними и т.п.), так и неметрическими (могут быть циклическими и нециклическими, как бензол и н-бутан соответственно, и т.п.) свойствами. Топология молекулярных систем связана с их свойствами.

При обсуждении теории строения молекул Бутлерова выяснилось, что связи не должны быть «жесткими», на усилении *динамических факторов* в понятии структуры настаивал известный химик Н.А.Меншуткин. И только в первой половине XX в. в результате появления новых методов исследования удалось снять противоречия их споров. Информацию о динамических аспектах молекул дали *масс-спектроскопические* и *радиоспектроскопические методы*. Они не поколебали основных положений структурной химии. В 60-е годы выяснилось, что часть систем, которые ранее интерпретировались как качественно отличные друг от друга изомеры, «можно описать как процессы миграции определенной группы атомов между атомными центрами в качественно неизменной молекуле», — как написано Ю.Ждановым, Л.Олехновичем и В.Минкиным в

их книге. Так структурная химия поднялась на более высокий уровень понимания химических процессов. Переход от структурной химии к учению о химических процессах — переход на еще более высокий уровень знаний, когда объекты изучаются более разносторонне.

В самом конце XIX в. в новых соединениях обнаружилось, что валентность может быть не целочисленной. Введение *координационного числа* не прояснило ситуацию. Квантовая химия вместо валентности свободного атома

ввела понятие *спин-валентности* — числа электронов с неспаренными спинами на внешних орбитах. Понятие валентности в соединениях отражено в методе МО ЛКАО, разработанном в 1975 г. Вместо подсчета целого числа связей атома с другими рассчитывается сумма кратностей всех его связей, которая может быть и не целочисленной. Таким образом, *современное понятие валентности* основано на представлениях квантовой химии и фактически приводит к разным понятиям.

12.3. ВЕЩЕСТВО В РАЗНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯХ И СИЛЫ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Все вещества могут находиться в разных *агрегатных состояниях* — твердом, жидком, газообразном и плазменном. В древности считали: мир состоит из четырех стихий — земли, воды, воздуха и огня. Агрегатные состояния веществ соответствуют этому наглядному разделению. Опыт показывает, что границы между агрегатными состояниями весьма условны. Газы при низких давлениях и невысоких температурах рассматриваются как идеальные, молекулы в них соответствуют материальным точкам, которые могут только сталкиваться по законам упругого удара. Силы взаимодействия между молекулами в момент удара пренебрежимо малы, и сами соударения происходят без потерь механической энергии. Но с уменьшением расстояния между молекулами (например, при переходе из газообразного состояния в жидкое или твердое) приходится учитывать и их взаимодействия. *Силы межмолекулярного взаимодействия* отличаются от сил химического взаимодействия атомов, приводящего к образованию молекул, они не обладают насыщенностью.

В их основе — как электростатическое взаимодействие между заряженными частицами, так и описываемое квантовой механикой, зависящее от расстояния и взаимной ориентации молекул. Опыт показал, что последнее пренебрежимо мало при расстояниях между молекулами более 10^{-9} м, и в случае разреженных газов им можно пренебречь. Если обратиться к графику взаимной потенциальной энергии двух молекул, то видно, что при небольших расстояниях энергия мала, при $r > r_0$, действуют силы взаимного притяжения ($F < 0$), при $r < r_0$, — взаимного отталкивания ($F > 0$), а при $r = r_0$ силы притяжения и отталкивания молекул уравновешены и $F = 0$. Здесь силы определены из связи их с потенциальной энергией $F = -dE/dr$. Но частицы находятся в движении. Пусть одна из молекул неподвижна, а другая сталкивается с ней, имея запас кинетической энергии. При сближении молекул силы притяжения совершают положительную работу, и потенциальная энергия их взаимодействия уменьшается до расстояния r_0 . При этом кинетическая энергия (и скорость) растет. Но когда расстояние станет меньше r_0 , силы притяжения сменятся силами отталкивания. Работа, совершаемая молекулой против этих сил, отрицательна. Молекула будет сближаться с неподвижной молекулой до тех пор, пока ее кинетическая энергия не перейдет полностью в потенциальную.

Эффективным диаметром молекулы называют минимальное расстояние σ , на которое могут молекулы сближаться. После остановки молекула начнет удаляться под действием сил отталкивания с возрастающей ско-

ростью. Пройдя вновь r_0 , молекула попадет в область сил притяжения, которые замедлят ее удаление. Эффективный диаметр зависит от начального запаса кинетической энергии, т.е. это величина не постоянная. При расстояниях, равных r_0 , потенциальная энергия взаимодействия имеет бесконечно большое значение или «барьер», препятствующий сближению центров молекул на меньшее расстояние.

Отношение средней потенциальной энергии взаимодействия к средней кинетической α и определяет агрегатное состояние вещества: для газов $\alpha \ll 1$, для жидкости $\alpha = 1$, для твердых тел $\alpha \gg 1$.

Конденсированные среды — это *твердые тела и жидкости*. В них, в отличие от газов, атомы и молекулы расположены близко и практически соприкасаются. Среднее расстояние между центрами молекул в жидкостях и в твердых телах порядка $(2-5) \cdot 10^{-12}$ м. Примерно одинаковы и их плотности. Межатомные расстояния совсем немного превышают расстояния, на которых электронные облака проникают друг в друга настолько, чтобы возникли силы отталкивания. А в газах при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами порядка $33 \cdot 10^{-10}$ м.

В жидкостях межмолекулярное взаимодействие сказывается сильнее, тепловое движение молекул проявляется в слабых колебаниях около положения равновесия и даже перескоках из одного положения в другое. Поэтому в них имеет место только ближний порядок в расположении частиц, т.е. согласованность в расположении только ближайших частиц, и характерная текучесть.

В твердых телах возможны состояния аморфное и кристаллическое. Твердые тела характеризуются жесткостью структуры, обладают точно определенными объемом и формой, которые под влиянием температуры и давления меняются много меньше. Большинство элементов и соединений обнаруживают под микроскопом кристаллическую структуру. Так, зерна поваренной соли имеют вид идеальных кубиков. В кристаллах атомы закреплены в узлах кристаллической решетки и могут только колебаться вблизи узлов решетки. Кристаллы составляют истинно твердые тела, а такие твердые тела, как пластмасса или асфальт, занимают как бы промежуточное положение между твердыми телами и жидкостями. Аморфное тело имеет, как и жидкость, ближний порядок, но вероятность перескоков мала. Так, стекло можно рассматривать как переохлажденную жидкость, у которой повышена вязкость. Существуют и промежуточные вещества — жидкие кристаллы. Они обладают текучестью жидкостей, но сохраняют

упорядоченность расположения атомов и обладают анизотропией свойств.

Химические связи атомов (ионов) в кристаллах такие же, как и в молекулах. Механизм, связывающий атомы в молекулы, может приводить к образованию твердых периодических структур, которые можно рассматривать как макромолекулы. Подобно ионным и ковалентным молекулам, существуют *ионные* и *ковалентные кристаллы*. При ионной связи вещества состоят из противоположно заряженных ионов, скрепленных силами электростатического притяжения. Центры ионов находятся на определенном расстоянии друг от друга. Ионные решетки в кристаллах скреплены ионными связями. Структура поваренной соли такова, что у каждого иона натрия имеется шесть соседей — ионов хлора. Этому пространственному распределению соответствует минимум энергии или, что то же самое, при образовании такой конфигурации выделяется максимальная энергия. Поэтому при понижении температуры ниже точки плавления наблюдается стремление образовывать чистые кристаллы. С ростом температуры тепловая кинетическая энергия достаточна для разрыва связи, кристалл начнет плавиться, структура разрушается. Но силы электростатического притяжения могут возникать и между нейтральными атомами, тогда никаких перестроек в электронных оболочках атомов не происходит. Взаимное отталкивание при сближении электронных оболочек смещает центр тяжести отрицательных зарядов относительно положительных. Каждый из атомов индуцирует в другом электрический диполь, и это приводит к их притяжению. Это действие *межмолекулярных сил*, или *сил Ван-дер-Ваальса*, имеющих большой радиус действия. Ковалентная связь (или атомная) достигается из-за внутреннего взаимодействия нейтральных атомов.

Примером ковалентной связи служит связь в молекуле метана. Разновидностью углерода с сильной связью является алмаз — четыре атома водорода заменяются четырьмя атомами углерода.

Так, углерод в форме *алмаза* образует кристалл, построенный на ковалентной связи. Каждый атом окружен четырьмя другими атомами, образующими правильный тетраэдр. Но каждый из них является одновременно вершиной соседнего тетраэдра. В других же условиях те же атомы углерода кристаллизуются в *графит*. В графите они соединены тоже атомными связями, но образуют плоскости их шестиугольных сотовидных ячеек, способных к сдвигу. Расстояние между атомами, расположенными в вершинах шестигранников, равно 0,142 нм. Слои расположены на расстоянии 0,335 нм, т.е. связаны слабо, поэтому графит пластичен и мягок. В 1990 г. возник бум исследовательских работ, вызванный сообщением о получении нового вещества — *фуллерита*, состоящего из молекул углерода — фуллеренов. Эта форма углерода является молекулярной, т.е. минимальным элементом является не атом, а молекула. Она получила свое название в честь архитектора Р.Фуллера, который в 1954 г. получил патент на строительные конструкции из шестиугольников и пятиугольников, составляющих полусферу. Молекула из 60 атомов углерода диаметром 0,71 нм была открыта в 1985 г., потом были обнаружены молекулы C_{70} , C_{76} , C_{84} и т.д. Все они имели

устойчивые поверхности, но наиболее устойчивыми оказались C_{60} и C_{70} . Логично предположить, что графит использован как исходное сырье для синтеза фуллеренов. Если это так, то радиус шестиугольного фрагмента должен быть 0,37 нм. Но он оказался равным 0,357 нм. Это различие в 2% связано с тем, что атомы углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестигранников, унаследованных от графита, и 12 правильных пятигранников, т.е. конструкция напоминает футбольный мяч. Получается, что при «сшивании» в замкнутую сферу часть плоских шестигранников превратилась в пятигранники. При комнатной температуре молекулы C_{60} конденсируются в структуру, где каждая молекула имеет 12 соседей. Расстояние между ближайшими соседями 0,3 нм. При понижении температуры до 349 К происходит фазовое превращение 1 рода — решетка перестраивается в кубическую. Сам кристалл — полупроводник, но при добавлении щелочного металла в кристаллическую пленку C_{60} возникает сверхпроводимость при 19 К. Если в эту полую молекулу внедрить тот или иной атом, перспективно использовать его как основу для создания запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации. При этом плотность записи достигнет $4 \cdot 10^{12}$ бит/см². Для сравнения — пленка ферромагнитного материала дает плотность записи порядка 10^7 бит/см², а оптические диски, т.е. лазерная технология, дает 10^8 бит/см². Этот углерод обладает и другими уникальными свойствами, особенно в медицине и фармакологии. За открытие этого «нового углерода» — фуллерена в 1996 г. ученым Г.Крото, Р.Смолли и Р.Керлу присуждена Нобелевская премия. В начале 1995 г. 1 г фуллерита, который пока получают со скоростью 1 г/ч, стоил 100 долл. США. Способность образовывать состояния с разной кристаллической структурой называется *полиморфизмом* кристаллов.

Некоторые твердые тела существуют благодаря еще одному виду связи — *металлической*. В металлах (кроме ртути) связь образуется при перекрывании вакантных орбиталей атомов металла и отрыва электронов из-за образования кристаллической решетки. Получается, что катионы решетки окутаны электронным газом. Металлическая связь возникает, когда атомы сближаются на расстояние, меньшее размеров облака внешних электронов. Согласно принципу Паули, при такой конфигурации растет энергия внешних электронов, и ядра соседей начинают притягивать эти внешние электроны, тем самым размывая электронные облака. И внешние электроны в конце концов равномерно распределяются по металлу, образуя электронный газ. Так возникают электроны проводимости, объясняющие *большую электрическую проводимость металлов*. В ионных и ковалентных кристаллах внешние электроны практически связаны, и проводимость этих твердых тел очень мала, их называют *изоляторами*.

Внутренняя энергия жидкостей состоит из суммы внутренних энергий макроскопических подсистем, на которые можно мысленно разделить всю систему, и энергии взаимодействия этих подсистем. Взаимодействие осуществляется через молекулярные силы с радиусом действия порядка 10^{-6} мм. Поскольку для макросистем энергия взаимодействия пропорциональна площади соприкосно-

вения, ее называют *поверхностной энергией*. Обычно она мала, так как мала доля поверхностного слоя, но это не обязательно. В задачах, связанных с поверхностным натяжением, ее следует учитывать. Обычно жидкости занимают больший объем при равном весе, т.е. имеют меньшую плотность. Но почему объемы льда и висмута уменьшаются при плавлении и даже после точки плавления некоторое время сохраняют эту тенденцию? Получается, что эти вещества в жидком состоянии более плотны. В жидкости на каждый атом действуют его соседи, и он колеблется внутри потенциальной ямы, которую они создают. В отличие от твердого тела, эта яма неглубока, так как дальние соседи почти не влияют. Ближайшее окружение частиц в жидкости меняется, т.е. жидкость течет. При достижении определенного значения температуры жидкость закипит, во время кипения температура остается постоянной. Поступающая энергия расходуется на разрыв связей, и жидкость при полном их разрыве превращается в газ.

Плотности жидкостей значительно больше плотностей газов при тех же давлениях и температурах. Так, объем воды при кипении составляет только 1/1600 объема той же массы водяного пара. Объем жидкости мало зависит от давления и температуры. Так, при 20°С и давлении 1 атм. вода занимает объем в 1 л. При понижении температуры до 10°С объем уменьшится только на 0,0021, при увеличении давления до 2 атм. — на 0,000049.

Хотя простой идеальной модели жидкости пока нет, микроструктура ее достаточно изучена и позволяет качественно объяснить большинство ее макроскопических свойств. То, что в жидкостях сцепление молекул слабее, чем в твердом теле, заметил еще Галилей; его удивило, что на листьях капуты скапливаются большие капли воды и не растекаются по листу. Так и пролитая ртуть или капли воды на жирной поверхности принимают из-за сцепления форму маленьких шариков. Если молекулы одного вещества притягиваются к молекулам другого вещества, говорят о *смачивании*. Примеры: клей и дерево, масло и металл (несмотря на огромное давление, масло удерживается в подшипниках). Но вода поднимается в тонких трубочках, называемых капиллярами, и поднимается тем выше, чем тоньше трубка. Иного объяснения, кроме эффекта смачивания воды и стекла, тут не может быть. Силы смачивания между стеклом и водой больше, чем между молекулами воды. Со ртутью — эффект обратный: смачивание ртути и стекла слабее, чем силы сцепления между атомами ртути. Галилей обратил внимание и на то, что смазанная жиром иголка может держаться на воде, хотя это противоречит закону Архимеда. Когда иголка плавает, можно заметить небольшой прогиб поверхности воды, который как бы стремится распрямиться. Силы сцепления между молекулами воды достаточны, чтобы не позволить иголке провалиться в воду. Поверхностный слой подобно пленке защищает воду, это и есть поверхностное натяжение, которое стремится придать форме воды наименьшую поверхность — шаровую. Но по поверхности спирта иголка уже не будет плавать, поэтому при добавлении спирта в воду уменьшается поверхностное натяжение, и иголка тонет. Мыло тоже уменьшает *поверхностное натяжение*, поэтому горячая мыльная пена, проникая в трещины

и щели, лучше отстирывает грязь, особенно содержащую жир, тогда как чистая вода просто свернулась бы в капельки.

Плазма — четвертое агрегатное состояние вещества, представляющее собой газ из совокупности заряженных частиц, взаимодействующих на больших расстояниях. В соответствии с четырьмя стихиями, или элементами древних, плазма соответствует огню. Чтобы перевести газ в состояние плазмы, нужно его *ионизовать*, оторвать электроны от атомов. При этом число положительных и отрицательных зарядов примерно равное, так что плазма *электрически нейтральна*. Ионизация может быть сделана путем нагревания, воздействия электрическим разрядом или жестким излучением. Вещество во Вселенной находится в основном в ионизованном состоянии. В звездах ионизация вызывается термически при температурах порядка 10^6 К, в разреженных туманностях и межзвездном газе — ультрафиолетовым излучением звезд. Из плазмы состоит и наше Солнце, излучение которого ионизует верхние слои земной атмосферы, называемые ионосферой. От состояния ионосферы зависит возможность дальней радиосвязи. В земных условиях плазма встречается редко, мы наблюдаем плазму в лампах дневного света или в дуге электросварки. В лабораториях и технике чаще всего получают плазму с помощью электрического разряда. В природе это делают молнии. При ионизации разрядом возникают электронные лавины, подобные процессу цепной реакции. На путях получения термоядерной энергии используют метод инжекции: разогнанные до очень больших скоростей газовые ионы впрыскиваются в магнитные ловушки, притягивают к себе электроны из окружающей среды, образуя плазму. Используют и ионизацию давлением — ударными волнами. Этот способ ионизации имеет место в сверхплотных звездах и, возможно, в ядре Земли.

Всякая сила, действующая на ионы и электроны, вызывает электрический ток. Если он не связан с внешними полями и не замкнут внутри плазмы, имеет место *поляризация плазмы*. Плазма подчиняется *газовым законам*, но при наложении магнитного поля, которое упорядочивает движение заряженных частиц, она проявляет совершенно необычные для газа свойства. В сильном магнитном поле частицы начинают крутиться вокруг силовых линий, а вдоль магнитного поля они движутся свободно. Говорят, что это винтообразное движение смещает структуру силовых линий поля, и *поле «вморожено» в плазму*. Разреженная плазма описывается как система частиц, тогда как более плотная — моделью жидкости.

Высокая электропроводность плазмы — главное отличие от газа. Даже холодная плазма поверхности Солнца (0,5 эВ) по проводимости достигает металлов, а при термоядерной температуре (10 кэВ) водородная плазма проводит ток в 20 раз лучше меди при нормальных условиях. Поскольку плазма способна проводить ток, к ней часто применяют *модель проводящей жидкости*. Она считается сплошной средой, хотя сжимаемость отличает ее от обычной жидкости, но это отличие проявляется только при течениях, скорость которых больше скорости звука. Поведение проводящей жидкости исследуется в науке, называемой *магнитной гидродинамикой*. В космосе всякая плазма является идеальным проводником, и законы вморо-

женного поля имеют широкое применение. Модель проводящей жидкости позволяет понять *удержание плазмы магнитным полем*. Так, из Солнца выбрасываются плазменные потоки, влияющие на атмосферу Земли. Сам поток не имеет магнитного поля, но и постороннее поле не может в него проникнуть по закону вмороженности. Плазменные солнечные потоки выталкивают посторонние межпланетные магнитные поля из окрестностей Солнца. Возникает магнитная полость, где поле слабее. Когда эти корпускулярные плазменные потоки приближаются к Земле, они сталкиваются с магнитным полем Земли и вынуждены обтекать его по тому же закону. Получается некая каверна, где собрано магнитное поле и не проникают плазменные

потоки. На ее поверхности скапливаются заряженные частицы, которые были обнаружены ракетами и спутниками — это наш *внешний радиационный пояс* Земли. Эти идеи использовались и при решении задач удержания плазмы магнитным полем в специальных устройствах — *токамаках* (от сокращения слов: тороидальная камера, магнит). С полностью ионизованной плазмой, удерживаемой в этих и других системах, связывают надежды на получение на Земле управляемой термоядерной реакции. Это дало бы практически чистый и дешевый источник энергии (морская вода). Ведутся работы и по получению и удержанию плазмы при помощи сфокусированного лазерного излучения.

12.4. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ. ПОНЯТИЕ О ПРОВОДНИКАХ, ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ

Твердые тела, как и *жидкости*, относят к конденсированным средам. В них частицы близко расположены и почти соприкасаются. Среднее расстояние между центрами молекул в них порядка $(2 - 5) \cdot 10^{-12}$ м, а в газах при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами порядка $33 \cdot 10^{-10}$ м. Представления о твердых телах, описанные еще Платоном, изменились незначительно к XVII в., фактически новых данных не дала и молекулярная динамика, и только изучение электрических и магнитных явлений привело к созданию теории. Разрабатываемые представления о геометрическом строении кристаллов, завершенные в XX в. Е.С.Федоровым и А.Шенфлисом, не касались их физических свойств твердых тел. Открытие электрона (1897 г.), дифракции рентгеновских лучей в кристаллах (1912 г.), открытие строения атома (1913 г.) положили начало *микроскопическим теориям* в области физики твердого тела.

В твердых телах атомы и молекулы не могут свободно перемещаться, так как закреплены электромагнитными взаимодействиями с соседними частицами. При уменьшении расстояния между соседними частицами атомы начинают отталкиваться, при увеличении — притягиваться, т.е. каждый атом находится в *потенциальной яме* и способен колебаться вокруг точки равновесия. При поступлении тепла в такое тело энергия распределится между всеми атомами, вынуждая их колебаться с большей амплитудой. Но в силу жесткости связей колебания в одной точке изменяют воздействие на соседние атомы, обусловив распространение энергии. Колебания ионов в узлах кристаллической решетки — фононы — не индивидуальны, для них характерна коллективная динамика.

Внутренняя энергия твердого тела состоит из кинетической энергии колебаний и потенциальной энергии связи, поэтому подведенная к телу энергия расходуется примерно поровну на эти две части внутренней энергии.

Изобразим *потенциальную яму*, в которой находится атом внутри твердого тела. При усилении колебаний атомы начинают смещаться, колебания происходят уже около нового положения равновесия, и среднее расстояние между атомами возрастает. Этим объясняется расширение тел при нагревании, но его нельзя просто объяснить увеличением амплитуды, меняются сами равновесные состояния, поэтому и потенциальная яма должна быть асимметричной.

Химическая энергия связи, приходящаяся на один атом, порядка 1 эВ. Средняя энергия теплового движения при комнатной температуре примерно равна $1/26$ эВ. Это значит, что атомы в твердом теле находятся в глубокой потенциальной яме, и их колебания в среднем не позволяют им подняться высоко по стенке ямы. Связь между кинетической энергией колебаний атомов и температурой примерно такая же, как связь между кинетической энергией поступательного движения и температурой в газах.

Продолжим аналогию: атомы газа при бомбардировке поверхности стремятся прийти к равновесию так же, как и атомы, колеблющиеся в твердом теле около своих положений. Обычно хорошие *проводники электричества* являются и хорошими *проводниками тепла*. В металлах один или несколько электронов могут свободно перемещаться по телу проводника, образуя *электронный газ*. В изоляторах же электроны лишены свободы — они прикреплены к своему атому. *Электроны проводимости* более подвижны, чем закрепленные атомы, и они быстрее переносят тепло по образцу проводника.

Металлическая связь возникает при сближении атомов на расстояние, меньшее размеров облака внешних электронов. Согласно принципу Паули, при такой конфигурации растет энергия внешних электронов, и ядра соседей начинают притягивать эти внешние электроны, размывая электронные облака. И внешние электроны равномерно распределяются по металлу, образуя *электронный газ*. Если даже от каждого атома высвободится всего по одному электрону, то концентрация свободных электронов будет равна числу атомов — в 1 м^3 металла окажется 10^{28} – 10^{29} свободных электронов. Тот факт, что носителями тока являются именно электроны, был доказан экспериментально только в 1938 г. И.К.Кикоиным и С.В.Грабарем. Так возникают *электроны проводимости*, объясняющие большую электрическую проводимость металлов.

В соответствии со способностью проводить ток все вещества подразделяются на *проводники*, *полупроводники* и *изоляторы (диэлектрики)*. В ионных и ковалентных кристаллах внешние электроны практически связаны, и проводимость этих твердых тел очень мала, их называют изоляторами.

Классическая теория металлов разработана в 1900 г. немецким ученым П.Друде на основе представлений о

носителях тока в металлах — электронах, впоследствии теорию усовершенствовал голландский ученый Г.А.Лоренц. Электроны ведут себя, как атомы идеального газа, но сталкиваются не между собой, а с ионами кристаллической решетки, чем объяснялось сопротивление металлов. Средняя скорость теплового движения электронов равна 10^5 м/с, но наложение электрического поля вводит упорядоченное движение, скорость которого меньше, чем скорость теплового движения. Плотность тока прямо пропорциональна напряженности поля (закон Ома) с коэффициентом σ (проводимость): $\sigma = n e^2 \lambda / 2 m V$ (здесь n — плотность электронов, e — заряд электрона, m — его масса, V — скорость теплового движения, λ — длина свободного пробега). К концу свободного пробега электрон приобретает дополнительную кинетическую энергию, которую теряет при столкновении с ионом. Эта энергия переходит во внутреннюю и приводит к повышению температуры. Количество этой энергии пропорционально квадрату напряженности поля (закон Джоуля–Ленца).

Но сопротивление металлов при увеличении температуры росло быстрее, чем предсказывала эта теория. В 1819 г. французские ученые П.Дюлонг и А.Пти установили, что теплоемкость почти всех твердых тел не зависит от температуры, одинакова и равна 6 кал/моль. Этот закон подтверждался опытами при обычных и высоких температурах. Согласно классической теории, один грамм-моль вещества, содержащий N частиц, должен обладать энергией $3RT$ или теплоемкостью в 6 кал/моль. В конце XIX в. появилась возможность проверить этот закон при низких температурах, и оказалось, что теплоемкости металлов при очень низких температурах стремятся к абсолютному нулю.

Квантовая теория металлов сняла эти и другие несоответствия классической теории. Первым успехом явилось объяснение А.Эйнштейном в 1906 г. *малой теплоемкости твердых тел при низких температурах*. Он предположил, что все атомы колеблются с одинаковой частотой, которая квантована по гипотезе М.Планка. П.Дебай и М.Борн уточнили: теплоемкость твердых тел при низких температурах пропорциональна T^3 , что привело к согласию с опытом и вывело гипотезу Планка из области процессов излучения на просторы физики.

Грюнайзен вывел *новое уравнение состояния твердых тел* и получил из него зависимость между линейным коэффициентом расширения твердого тела и его сжимаемостью. В 1924 г. Я.И.Френкель показал, что классическая концепция газа электронов, приписывающая им среднюю кинетическую энергию $3/2$ кТ, ошибочна. Внешние электроны обладают *коллективными свойствами*, и их кинетическая энергия должна быть порядка ионизационного потенциала, т.е. (5–10) эВ вместо $3 \cdot 10^{-2}$ эВ. Впоследствии была учтена разработанная для электронов в соответствии с принципом Паули статистика Ферми–Дирака, волновая природа электронов, и движение их в решетке металла стали рассматривать как рассеяние электронных волн. «Валентные электроны» в металле приобрели черты сжатого газа, который подчиняется статистике не Максвелла, а Ферми–Дирака.

Итак, энергетическое состояние любого электрона определяется четырьмя квантовыми числами. Невозбуж-

денное состояние соответствует минимуму свободной энергии. Каждый энергетический уровень при сближении атомов расщепляется, образуя при наличии металлической связи целую зону плотно расположенных уровней. Эти *зоны разрешенных уровней* разделены промежутками — *зонами запрещенных уровней*. Ширина зон не зависит от размеров кристалла. Но чем плотнее атомы расположены в нем, тем теснее располагаются уровни в зоне. Валентные электроны заполняют нижние энергетические уровни разрешенной зоны, а более высокие уровни этой зоны остаются свободными. В зависимости от степени заполнения зоны возможны различные ситуации. Они и лежат в основе разделения твердых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики (рис.15).

Металлы характеризуются неполным заполнением электронами зоны проводимости. Чтобы перевести электроны на более высокие уровни, достаточно сообщить им небольшую энергию (например, подействовать электрическим полем).

Полупроводники характеризуются тем, что электроны полностью занимают валентную зону. Поэтому для увеличения энергии электрона ему нужно сообщить энергию, достаточную для преодоления запрещенной зоны. Поэтому электрические свойства кристалла определяются шириной запрещенной зоны. Электрическое поле не в состоянии сообщить такую энергию, и для небольшой ширины зоны может быть достаточно тепловой энергии.

Изоляторы имеют большую ширину запрещенной зоны, и тепловой энергии уже недостаточно для перевода электронов через нее.

Полупроводники стали активно входить в технику с 20-х годов. Появились выпрямители и фотоэлементы, но теории не было. Развита в конце 30-х годов теория в Ленинградском физико-техническом институте дала физическую основу, на которой во всем мире стала развиваться быстро полупроводниковая технология. В этих исследованиях установили, что примеси могут менять не только электропроводность, но и ее знак. *Собственная проводимость* возникает в результате переходов электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. Освобождаемое место стали называть *дыркой*. Так идут два процесса: появление попарно свободных электронов и дырок и рекомбинация, которая приводит к попарному исчезновению электронов и дырок. В отсутствие поля они движутся хаотически. При включении поля происходит перенос заряда в кристалле, который накладывается на хаотическое движение. Каждой температуре соответствует определенная концентрация электронов и дырок. *Примесная проводимость* полупроводников возникает, если некоторые атомы в узлах кристаллической решетки заменить на другие, валентность которых отличается на единицу. Так, при введении в кристалл германия пятивалентного фосфора пятый электрон оказывается «лишним» и может легко отщепиться от атома за счет теплового движения. Атомы примесей, которые могут поставить электрон проводимости, называют *донорами*. Если же введен элемент с меньшей валентностью, он может поставить только дырку, и называют его *акцептором*.

Сегнетоэлектрики — особая группа кристаллических диэлектриков, которая способна к самопроизвольной поляризации в отсутствие внешнего электрического поля. У пластинки кварца, вырезанной перпендикулярно его кристаллографической оси, например, при сжатии вдоль оси на гранях появляются связанные заряды. Название связано с сегнетовой солью, у которой это свойство было обнаружено. В этих кристаллах нет центра симметрии. Для каждого сегнетоэлектрика существует область, когда эти особые свойства проявляются. Так, для сегнетовой соли это диапазон температур от -15°C до $+22,5^{\circ}\text{C}$ (точка Кюри). Поляризация в них возникает при механической нагрузке в степени, пропорциональной степени упругой деформации. В этом состоит *пьезоэлектрический эффект*. Кристаллическая решетка может быть представлена в виде нескольких простых решеток, вставленных друг в друга. Если у

кристалла нет центра симметрии, при деформации происходит относительное перемещение простых решеток, и возникает поляризация.

Сейчас в связи с широкой распространенностью в природе и практическими применениями вызывают интерес конденсированные среды, для которых характерно неупорядоченное расположение атомов. Это стекло, сталь, сплавы. Среди твердых сред — это аморфные металлические сплавы с неупорядоченным расположением атомов в пространстве. Оказалось, что свобода расположения атомов в пространстве изменяет электрические, магнитные, сверхпроводящие свойства этих тел. Такие сплавы используют для изготовления магнитных головок и высокочувствительных датчиков, сенсорных устройств и малогабаритных трансформаторов.

12.5. СТРУКТУРА ВОДЫ И УНИКАЛЬНОСТЬ ЕЕ СВОЙСТВ ДЛЯ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ

Одно из самых распространенных веществ на Земле — вода. Вода покрывает большую часть поверхности нашей планеты, из нее в основном состоят почти все живые существа. Свойства воды настолько важны для живых организмов, что известная нам форма жизни без нее вообще невозможна. Уникальные свойства воды связаны со структурой ее молекул: атом кислорода связан ковалентно с двумя атомами водорода, молекула изогнута под углом, в вершине которого и находится кислород. Из-за того что кислород притягивает электроны сильнее, чем водород, молекула воды всегда *полярна*: кислород частично заряжен отрицательно, водород — положительно, поэтому молекула воды удерживается водородными связями. Когда вода находится в жидкой фазе, эти слабые связи легко рвутся и разрушаются при столкновениях молекул, тем не менее водородные связи играют большую роль, обеспечивая особое значение воды для жизни (рис.16).

Тепловые свойства воды уникальны для обеспечения жизни. Испарение требует значительной траты энергии, так как температура кипения воды достаточно высока. Скрытая теплота испарения, или количество тепла, необходимое для превращения воды в пар (или преодоления сил молекулярного сцепления в воде, обусловленных водородными связями), относительно других веществ необычайно велика. Поскольку эту энергию приходится брать из окружения, то испарение воды сопровождается охлаждением.

Пример — потоотделение у животных или тепловая одышка у млекопитающих или рептилий (сидят на солнце с разинутым ртом). Относительно большая энергия требуется воде и при плавлении (таянии льда). И наоборот, при замерзании вода должна отдать большое количество тепловой энергии. Это уменьшает вероятность замерзания и клеток, и их окружения. Кристаллизация воды в клетках губительна для жизни, и большая теплота плавления обеспечивает стабильность внешних условий, необходимых для жизнедеятельности.

Известно, что лед легче воды и не тонет в ней. Плотность воды в жидком состоянии больше, чем в твердом, и никакое другое вещество таким свойством не обладает. Поскольку плотность воды от 4 градусов тепла до нуля понижается, лед образуется, как более легкий, сначала у

поверхности воды и только под конец — около дна. Это обеспечивает сохранение жизни в водоемах, что было важно в ледниковый период: лед покрывает толщу воды, как одеяло, и тает быстрее, находясь на поверхности. Слои воды при температуре, меньше 4 градусов, поднимаются вверх, перемешиваются и переносят питательные вещества по всей толще воды, что позволяет распространяться живому на больших диапазонах глубин.

Высокая теплопроводность воды, достаточно высокие температуры кипения и замерзания, понижение температуры тел при испарении воды с их поверхности — все это важно для стабильности условий жизни. Даже тот факт, что плотность воды максимальна при 4°C , что несколько выше точки ее замерзания, (т.е. при охлаждении от 4° до 0° вода расширяется), и лед легче жидкой воды, играет важную роль — предотвращает образование кристаллов в клетках и не повреждает ткани. Низкая плотность льда спасает водных животных — лед плавает на поверхности и не допускает холодный воздух вглубь, где находятся живые организмы. Поэтому вода является вместе с растворенными в ней солями необходимой средой для химических процессов, составляющих жизнь.

Из-за большой теплоемкости воды требуется большое количество энергии даже для небольшого повышения ее температуры. Объясняется это тем, что энергия расходуется на разрыв водородных связей, обеспечивающих ее «клейкость». Поэтому биохимические процессы протекают в меньшем интервале температур, с более постоянной скоростью. Вода служит стабильной средой обитания для многих клеток и организмов, обеспечивая значительное постоянство внешних условий.

Вода обладает *большим поверхностным натяжением*, поскольку ее молекулы слипаются друг с другом (*когезия*) посредством водородных связей. Полярные молекулы притягиваются любой поверхностью, несущей электрический заряд, отсюда ее способность подниматься по тонкой трубке или порам, называемая *капиллярностью (адгезия)*. Кроме того, у воды самое *большое поверхностное натяжение* из всех других жидкостей — сильное сцепление между молекулами. Многие мелкие организмы извлекают из этого пользу, поэтому могут скользить по водяной

поверхности. Это уникальное свойство играет важную роль в живых клетках и при движении воды по сосудам ксилемы у растений.

Вода — активный участник *процессов метаболизма*. При фотосинтезе она — источник водорода, участвует в реакциях гидролиза. Вода — наиболее важный и по объему компонент тканей животных и растений: она одновременно является и средой, в которой происходят все биохимические реакции, и их участником. Было установлено, что фазовые переходы в воде могут управлять скоростью протекания биохимических реакций. После открытия

Полингом (1961 г.) взаимосвязи между явлением наркоза и кристаллизацией гидратов наркотических веществ прояснилась роль перестроек *связанной воды* в явлениях наркоза, а в последнее время и в возникновении важнейших свойств гидратированных веществ — глины, гипса, цемента, некоторых типов сегнетоэлектриков.

Вода имеет огромное значение при естественном отборе и видообразовании в живой природе. Все наземные организмы, например, приспособились к добычанию и сбереганию воды, даже в пустынях. Не вызывает сомнения, что жизнь зародилась на Земле в водной среде.

Глава 13. КОНЦЕПЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ

13.1. ХИМИЧЕСКИЙ КАТАЛИЗ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Реакционная способность вещества лишь наполовину определяется его составом и структурой, и наполовину — его *реагентом по реакции*. Так, если реагент — сильная кислота, то вещество ведет себя как основание, и наоборот. Эту *двойственность поведения* в реакции объяснил Буллеров, считая, что вещество расщепляется на два изомера, и это влияет на равновесную изомерию (таутомерия). Впоследствии А.Н.Несмеянов установил, что это — *раздвоенные свойства изомера как целого*.

Химические реакции — основа химии. Молекулы непрерывно движутся и сталкиваются друг с другом. Их электронные оболочки отталкиваются. При сильных соударениях может высвободиться достаточное количество энергии для перегруппировки электронов в столкнувшихся молекулах и формирования нового набора связей, т.е. образования новых соединений. Химические реакции представляют в виде уравнений. Принято слева записывать исходные вещества, справа — продукты реакции. Обычно стрелка в химическом уравнении обращена в сторону более низкой суммарной энергии связей, т.е. показывает, в какую сторону реакция стремится идти самопроизвольно. Они могут идти в обе стороны и представляют собой перераспределение химических связей. Если какое-то вещество является *катализатором*, то, как известно, происходит целый комплекс реакций. Отсюда вывод: в реакциях принимают участие все вещества, оказавшиеся в зоне реакции. В присутствии катализаторов или *ингибиторов* могут получиться различные побочные продукты. Определение характера химического процесса предстало некоей задачей многих тел, решить которую почти невозможно. Выход был найден в создании *химической термодинамики и кинетики*.

Законы термодинамики дают принципиальный ответ на вопрос, от чего зависит возможность осуществления реакции, перестройки химических связей. Например, для получения тепла требуется топливо, а переход тепла от нагретого тела связан с распределением энергии: атомы вещества отдают энергию тепловому движению окружающим атомам, не меняя своего состояния. При химических реакциях энергия тоже рассеивается, но меняется окружение атомов, меняется исходное вещество, и может возникнуть новое вещество. Термодинамика объясняет:

реакция пойдет только *при уменьшении энергии веществ и увеличении энтропии*. Реакция возможна, если уменьшается величина *свободной энергии* $F = E - TS$. Понятие свободной энергии в 1877 г. ввел Г.Гельмгольц, он показал, что эта функция может быть *критерием термодинамического равновесия*. Сейчас ее часто называют *функцией Гиббса–G*. Когда камень падает, уменьшается его потенциальная энергия. И в химической реакции: когда она идет, ее свободная энергия переходит на более низкий уровень. В этих примерах аналогия полная, так как нет изменения энтропии. Но в химических реакциях его нужно учитывать, и возможность реакции еще не означает, что она самопроизвольно пойдет.

Принцип подвижного равновесия выдвинул Ле Шателье (1884 г.). Сейчас его формулируют так: *внешнее воздействие, которое выводит систему из состояния термодинамического равновесия, вызывает в ней процессы, направленные на ослабление результатов такого влияния*.

Ле Шателье применял его в промышленных условиях для оптимизации синтеза аммиака, производства стекла и цемента, выплавки металлов, получения взрывчатых веществ. Почти столетие, например, не удавалось осуществить синтез аммиака из элементов, хотя реакция кажется простой. Оказалось, что эта важная реакция идет на поверхности твердого катализатора, и равновесие смещается в сторону аммиака при высоких давлениях. Появилась возможность сознательно влиять на ход реакции.

При *термодинамическом подходе* управление ходом реакции осуществляется изменением термодинамических параметров системы — температуры, давления, концентрации. Этими методами можно *стеснить направление реакции*. В 1886 г. появилась работа Гиббса, содержащая *правило фаз* и новые методы исследования и описания *условий равновесия через термодинамические потенциалы*. Термодинамический подход не дает скорости реакции, время не входит в уравнения. Поэтому сведения *о скорости дает только кинетика*.

Некоторые ростки *кинетических теорий* можно отыскать в XVIII–XIX вв. Спор Бертолле с Прустом и победа атомистических взглядов Пруста оставили в стороне идеи Бертолле об *обратимости химических реакций* и о влия-

нии на ход реакций действующих масс. О законе действующих масс вспомнил Вант-Гофф, введя принятый сейчас термин «концентрация». Если реакция происходит между компонентами A , B , C , то этот закон принимает вид: скорость реакции $V = k(A)^\alpha (B)^\beta (C)^\gamma$, где k — константа скорости реакции, в скобках — концентрации реагентов, α , β , γ — коэффициенты степени участия. Изменяя концентрации веществ, можно менять *скорость и направление реакции*, т.е. *управлять процессом*. Выразив константу равновесия через концентрации реагентов, Вант-Гофф подвел теоретический фундамент под закон действующих масс (1884 г.).

Среди всех возможных соединений реагентов есть образования с разной *степенью устойчивости*. Менее устойчивое соединение обладает большей свободной энергией, т.е. вновь образованная группировка менее устойчива, чем исходные компоненты. Чтобы преодолеть эту разницу в значениях свободной энергии, нужна дополнительная энергия, называемая энергией *активации*. Она определяет скорость протекания реакции. Для осуществления многих технологических процессов ее снижают катализаторами. Значение энергии активации рассчитывают в квантовой химии для нахождения оптимального пути осуществления нужных химических реакций. Большинство биохимических процессов — *каталитические*.

Молекулы обладают разным *химическим средством*. Химические реакции могут протекать с разной скоростью, с поглощением или выделением тепла, быть обратимыми или нет и т.д. Уравнение Вант-Гоффа показывает, что с ростом температуры атомы и молекулы движутся быстрее, их энергия при столкновениях растет и может оказаться достаточной для начала химической реакции. Если знать величины энтропии веществ, то можно реально определить условия, при которых возможно протекание химической реакции. Вант-Гофф исследовал много причин, меняющих скорость протекания реакций. В 1901 г. Вант-Гофф первым среди химиков был удостоен Нобелевской премии за исследование законов зависимости химического средства от условий протекания реакции. Зависимость скорости реакций от температуры основана на исследованиях С.Аррениуса, который предложил (1889 г.) использовать следующий закон: вероятность накопления энергии активации определяется формулой, полученной Больцманом: $W = \exp(-E/kT)$. Развитие *квантовой химии* позволило рассмотреть на микроуровне протекание реакций, отдельные молекулы и их электронные структуры. Использование термодинамического подхода, описывающего не отдельные объекты, а систему в целом, позволяет глубже понять тенденции течения реакций.

Каталитические процессы были известны давно. Так, еще в XVIII в. знали о каталитическом действии селитры при получении серной кислоты, но смысл этого явления в то время не поддавался объяснению. *Явление катализа* было открыто еще в 1812 г. К.Кирхгофом, в 1835 г. Берцеллиус связал природу взаимодействия агентов с электрохимическими потенциалами, обозначив силу «для вызывания химической деятельности» понятием *каталитической силы*. Затем Либих предположил, что из-за взаимодействия с катализатором меняется химическая

связь атомов в молекуле. Взгляды Либиха активно поддержал Менделеев. Оствальд, сравнивая относительную активность различных кислот, пришел к выяснению *условий химического равновесия* и к развитию катализа. Он определил *катализатор* как вещество, «которое изменяет скорость реакции, но не входит в состав конечного продукта реакции». За успехи в изучении стимулирующего действия некоторых ионов на скорость развития межмолекулярных взаимодействий и условий химического равновесия Оствальд стал лауреатом Нобелевской премии по химии за 1909 г. Физические теории обращали внимание на *процесс адсорбции* в катализе, а химические — на наличие валентных взаимоотношений между реагентами и катализатором. Синтез этих подходов привел к формулировке *теории промежуточной хемосорбции*. Третьи теории отделяли химическое взаимодействие от каталитического. *При катализе происходит активация молекул реагента при контакте с катализатором. Он делает связь в веществе более подвижными, «подталкивает» вещества к взаимодействию.*

К концу XIX в. стало понятно, что в химической реакции участвуют *стенки сосуда, растворители и случайные примеси*. Изучение *катализа* позволило к середине XX в. получать широкий круг органических продуктов, регулировать скорость и заданную направленность химических реакций. Считают, что удельный вес каталитических процессов в химической промышленности достигает 80%. За полвека катализ превратился в мощное орудие синтеза веществ. Природным катализатором является хлорофилл — комплексное металлоорганическое соединение в живой ткани зеленого листа. Поэтому можно считать, что процесс фотосинтеза происходит при фотобиокатализаторе, и эти реакции изучаются в целях получения еще одного источника энергии. За идеями строения эффективных *биокатализаторов* химики часто обращаются к живой природе.

В начале XX в. были открыты *биокатализаторы*. Благодаря работам французских химиков П.Сабатье и Ж.Б.Сандерана в промышленности при гидрировании органических веществ вместо благородных металлов стали использовать никель, медь, кобальт, железо. Русский химик-органик В.Н.Ипатьев исследовал каталитическое действие оксидов металлов при высоких давлениях и температурах и установил, что при использовании смеси катализаторов их действие усиливается. Каталитический способ синтеза аммиака из атмосферного азота и водорода под давлением открыл немецкий химик Ф.Габер. Вскоре химик-технолог К.Бош и А.Митташ предложили промышленный способ синтеза аммиака с использованием смеси катализаторов — железа, едкого калия и глинозема — при повышенных температурах и высоком давлении.

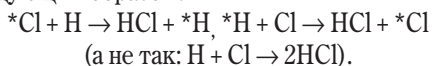
Подбор катализаторов долгое время шел эмпирическим путем, да и сами механизмы химических реакций, особенно быстрых, не поддавались объяснениям. Особенно быстро происходят реакции *фотохимического типа*, когда фотоны, разрушая равновесие, вызывают новые реакции и создают новые условия равновесия. Это устанавливалось по вторичному рассеянию молекул. В 20-е годы фотохимические реакции начал исследовать английский физик и химик Р.Дж.Норриш, но успех пришел к нему только после

1945 г., когда он привлек к работе молодого сотрудника Дж.Портера, специалиста по электронике и радиолакации. Они использовали сверхкороткие световые импульсы мощностью в 600 МВт, излучаемые в 10^{-6} с. Предназначенный для изучения вторичного свечения молекул и радикалов спектроскоп был соединен с фотоумножителем. Впоследствии ученые уменьшили временной интервал исследования до наносекунд, или до миллиардных долей секунды, и стали использовать лазеры, имеющие мощность в тысячи раз большую.

13.2. ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ И СВОБОДНЫЕ РАДИКАЛЫ

Свободный радикал обнаружил в 1900 г. уроженец Украины М.Гомберг, создатель антифриза для автомобилей. Он выделил некое соединение, способное вступать в реакции, и доказал, что оно представляет из себя половину молекулы. Эмигрировав в США, где он неоднократно избирался президентом Американского химического общества, Гомберг практически всю жизнь занимался изучением свободных радикалов. До этого только два типа частиц считали участвующими в химических реакциях — молекулы и атомы. Если происходит реакция типа замещения, то выделяющаяся энергия перераспределяется между продуктами реакции. Но многие реакции идут через промежуточные продукты реакции, при этом энергия активации понижается. Если промежуточные продукты имеют ненасыщенные валентности, это понижение особенно заметно. Такие атомы или соединения называют радикалами и обозначают точкой над символом.

Известный химик М.Боденштейн обнаружил (1913 г.), что при взаимодействии хлора и водорода один поглощенный фотон света вызывает образование около 10^5 молекул хлороводорода. Реакция соединения хлора с водородом идет следующим образом:



Первая ненасыщенная валентность при комнатных температурах не образуется, нужно, чтобы с какой-то внешней помощью произошло расщепление молекулы хлора на два атома, после этого реакция самопроизвольно и быстро осуществится по заданной схеме. Каждый раз вместо ненасыщенной валентности одного свободного атома появляется валентность другого атома, и этот процесс происходит поочередно. Реакция идет цепным образом, отсюда название — *цепная реакция*.

Понятие разветвленных цепных реакций ввели через 10 лет И.А.Кристиансен и Г.А.Крамерс, показав, что цепные реакции могут наблюдаться не только в фотохимических реакциях. Это понятие позднее заимствовали физики для описания ядерных процессов.

Советские ученые Харитон и Вальтер, исследуя реакции между парами фосфора и кислородом (1926 г.), не могли понять, почему они не шли при низких и высоких давлениях кислорода, тогда как при средних происходил взрыв. Объяснение этому явлению дал основатель научной школы по химической кинетике Н.Н.Семенов. Причиной является разветвленная цепная реакция, когда вместо одной ненасыщенной валентности получаются несколько.

Управление ходом химической реакции достигается и за счет привлечения внешнего источника энергии — световой или тепловой. С ее помощью удастся расшатать атомы в исходной молекуле и побудить их к участию в нужной реакции. Этим занимается область химии, получившая название *химии экстремальных состояний*. Использованием для этой цели более жесткого электромагнитного излучения (для молекул с крепкими внутримолекулярными связями) занимается *радиационная химия*.

Окисление водорода, например, идет по такой схеме: $H + O \rightarrow *H + *HO$ (зарождение цепи), $*H + O \rightarrow *OH + *O$ (разветвление цепи), $*O + H \rightarrow *OH + *H$ и $*OH + H \rightarrow HO + *H$ (продолжение цепи).

Возникающий на этапе зарождения цепи радикал $*HO$ мало активен. Итак, из одного активного центра с ненасыщенной валентностью $*H$ получаются три гидроксида $*OH$ и два $*H$. Если последние радикалы $*H$ могут дать вновь по три радикала, то скорость реакции нарастает лавинообразно. Воспрепятствовать этому бурному процессу может только рекомбинация $*H$ на стенках сосуда или переход валентности на неактивный радикал $*HO$ внутри объема. Значит, меняя условия протекания реакции, можно управлять и скоростью ее протекания. При этом важную роль играет существование критических размеров сосуда — успеют ли радикалы дойти до стенки и рекомбинировать на ней или разветвление реакции произойдет раньше, закончившись взрывом.

К тем же выводам пришел и английский ученый С.Н.Хиншелвуд, открывший вещества, которые могут реагировать двойко. При быстром нагревании активные молекулы начнут разлетаться с большими скоростями, при столкновениях дадут начало химическому превращению, и процесс будет развиваться от слоя к слою, образуя волну реакции. При малых концентрациях молекул реакция может и погаснуть. Значит, процессом горения можно управлять.

Теорию цепных реакций Семенов построил и изложил в монографии «Цепные реакции» (1934 г.). Она охватывала большое число явлений, происходящих при *взрывных процессах и горении*.

Мерой скорости цепной реакции служит число активных центров, существующих в данный момент в единице объема и вступающих в реакцию за единицу времени. Для подсчета этой величины он ввел два понятия — коэффициенты продолжения цепи и обрыва цепи. Если число активных центров, рождающихся в единицу времени, обозначить N , то скорость цепной реакции будет равна $V = (1/(1 - \omega))N = IN$.

Коэффициент I Семенов назвал длиной цепи. Отсюда коэффициент обрыва цепи получится в виде: $\phi = 1 - \omega$. Для подсчета длины цепи Семенов предложил два способа. Первый основан на формуле Смолуховского, дающей среднее число столкновений, испытываемых частицей при диффузии на заданное расстояние. Вместо частицы речь идет о диффузии активного центра. Второй способ более формален и основан на решении уравнения диффузии при

определенных граничных условиях. При разветвленных реакциях подсчет длины цепи сводится к решению уравнения диффузии с источниками при отсутствии связей между цепями. С ростом давления начинает преобладать процесс обрыва цепи из-за появления тройных столкновений, приводящих к появлению малоактивных радикалов, которые обычно исчезают при рекомбинации.

Примером цепной реакции является и *реакция деления ядер* урана, происходящая аналогично химической, только вместо закона сохранения масс действует закон сохранения и изменения энергии (и массы). Работы, начатые в 1934 г.

13.3. ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРЕНИЯ В ВОДЕ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

В современную эпоху все воды на Земле образуют водную оболочку — *гидросферу*. Значение воды как мощного фактора, преобразующего планету, изучено хорошо. Действия воды на поверхности и в глубинах Земли связано с ее свойствами. Вода может находиться в трех агрегатных состояниях и способна растворять в себе многие вещества.

Природные воды содержат различные вещества разных концентраций. Так, самая чистая дождевая вода содержит около 50 мг/л растворенных веществ. Масса воды на Земле всего около 0,025% общей массы Земли. Она проникает повсеместно: содержится в атмосфере в виде паров, составляет океаны, моря и континентальные воды, образует подземные воды в толщах осадочных пород. Большая часть воды сосредоточена в Мировом океане (до 86,5%). Средняя глубина океана 3,8 км, общая масса воды в нем $1420 \cdot 10^{18}$ кг. Океаническая вода содержит примерно 3,5% растворенных веществ. Количество растворенного вещества в граммах, содержащегося в 1 кг морской воды, получило название *солености океана*.

Среди растворенных веществ (расположены по степени убывания количества) катионы: Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Sr^{++} , анионы: Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , Br^- , F^- , соляная и серная кислоты. Несмотря на малое количество других элементов, они играют важную роль в химических процессах океана и в жизни морских организмов. Среди них азот, фосфор, кремний, которые усваиваются морскими растениями и животными. В морской воде растворены и природные газы — кислород, азот, сероводород, углекислота. Они тесно связаны с атмосферой и живыми объектами моря. Среди них первое место по концентрации занимает углекислота, которая присутствует в разных формах, образуя *карбонатную систему динамического равновесия*. В мировом океане ее в 60 раз больше, чем в атмосфере. С карбонатной системой связаны ионы кальция и весь комплекс растворенных веществ. Верхней границей гидросферы является поверхность открытых водоемов, а нижняя — в глубинах Земли, в слоях с температурой порядка 374°C .

Воду с древних времен считали основой жизни. У Аристотеля она входила в число четырех «начал». Ее соединение с другими «началами» — землей, огнем и воздухом — порождало все многообразие мира. К XIX в. это свойство воды трансформировалось в свойство быть *растворителем* и важнейшим компонентом объектов природы. Изучение молекулярной структуры веществ вело к пониманию исключительной способности молекул воды образовывать связи с частицами почти всех веществ. Вода — простейшее

под руководством Э.Ферми, показали, что ядра атомов большинства элементов способны поглощать медленные нейтроны и становиться радиоактивными. К 1938 г. было обнаружено, что в уране, активизированном нейтронами, присутствует элемент, сходный с танталом. Этому одно объяснение — под действием нейтронов атом урана делится на две примерно равные массы. Если в уране отношение числа нейтронов к числу протонов равно 1,6, а в тантале — между 1,2 и 1,4, то при делении обязательно возникнут элементы с «лишними» нейтронами. Это значит, что нейтроны играют роль спичек, возбуждающих реакцию деления.

соединение водорода с кислородом. Из-за существования изотопов — 3 водорода и 6 кислорода — существует 36 изотопных разновидностей воды.

Физические свойства воды аномальны. В отличие от большинства других жидкостей, с ростом температуры ее удельный объем уменьшается, а *плотность увеличивается*, достигая минимума (соответственно, максимума) при 4°C . Обычно с ростом температуры растет средняя тепловая скорость молекул воды, они сильнее расталкивают друг друга, но в воде при этом плотность растет, а не уменьшается. При замерзании объем воды увеличивается до 10%. Плотность воды больше плотности льда, да еще испытывает такой скачок значения. При плавлении кристаллов, когда регулярность упаковки ионов нарушается, плотность уменьшается, причем на 2–4%. Аномальна вода и в отношении распространения в ней звука. Под действием жесткого излучения вода распадается на свободные радикалы $^*\text{H}$, $^*\text{OH}$, $^*\text{HO}_2$, при этом образуется водород и перекись водорода.

Очень *высока теплоемкость* воды, при плавлении льда она увеличивается от 9 до 18 кал/моль·К. Значит, в воде появились очень энергоемкие процессы, на которые нужно истратить подводимое тепло. И эти процессы сохраняются, пока вода находится в жидком состоянии. У переохлажденной воды эта аномалия теплоемкости еще больше. В отличие от обычных жидкостей с ростом температуры в интервале от 0 до 150°C *теплопроводность* воды растет, а *вязкость уменьшается*. *Электропроводность* воды сильно зависит от примесей, но даже в очищенной воде она не равна нулю. Это связано с частичной диссоциацией ее на ионы H^+ и OH^- .

Тройная точка воды, т.е. равновесие воды, льда и пара, имеет место при температуре $0,01^\circ\text{C}$ и давлении 612 Па. Переохлажденная вода, т.е. остающаяся в жидком состоянии ниже точки замерзания 0°C , ведет себя странно — с одной стороны, плотность ее уменьшается при понижении температуры, с другой — приближается к плотности льда. Переохлажденную воду получают в тонких капиллярах или в масляной эмульсии. Обычно с ростом температуры растет *сжимаемость* жидкостей (степень уменьшения объема с ростом давления), но так вода себя ведет только при высоких температурах. При низких температурах вода ведет себя иначе, и при 45°C сжимаемость минимальна. Значит, в ней идут противоположные процессы — обычные и аномальные.

Аномальность свойств воды связана со строением ее молекул и структурой в разных агрегатных состояниях. Сравнение с родственными воде жидкостями — гидридами шестой группы таблицы Менделеева показывает, что вода выпадает из плавной зависимости температур кипения и плавления этих жидкостей. Если бы она была обычной, то кипела бы при -76°C , а замерзала бы при -100°C .

Главное отличие воды — в водородных связях. Хорошая модель — правильный тетраэдр: ядра в молекуле H_2O образуют равнобедренный треугольник с кислородом в вершине и двумя протонами в основании, угол НОН равен 105° , расстояние О-Н равно $0,957 \cdot 10^{-8}$ м, а Н-Н только $1,54 \cdot 10^{-8}$ м. Электронное облако окружает эту конструкцию; причем каждая молекула во льду связана четырьмя водородными связями с ближайшими молекулами, а расстояние между молекулами $2,76 \cdot 10^{-8}$ м. Поэтому можно считать, что радиус молекулы воды порядка $1,38 \cdot 10^{-8}$ м, т.е. ее дипольный момент равен 1,87 дебая. Примерно такая же упорядоченность сохраняется и при плавлении льда, данные исследований показывают, что расстояние между молекулами не более $2,9 \cdot 10^{-8}$ м. Отсюда некоторая рыхлость структуры, которая и вызывает часть аномалий в свойствах. При росте температуры возникает аномальная плотность, рост давления разрушает связи между молекулами — аномальная вязкость.

Химические свойства воды связаны с полярностью самой молекулы и со строением ее электронной оболочки. Вода легко вступает в химические соединения, образуя гидроокиси. Щелочные и щелочно-земельные металлы разлагают воду при обычной температуре (образуется водород и гидроокись), с другими металлами такая реакция происходит при повышенной температуре. Взаимодействие с водой приводит к коррозии металлов. В воде растворяется гораздо больше веществ, чем в любой другой жидкости. Молекулы растворяемого вещества отделяются друг от друга и смешиваются с молекулами растворителя. Из-за своей полярной природы вода растворяет ионные вещества и другие полярные соединения. А соединения, не имеющие заряда, в воде не растворяются, между ними образуется поверхность раздела. Это очень важно для процессов внутри живых структур. Распадение вещества на ионы при растворении называется **диссоциацией**.

Вещество является кислотой, если оно диссоциирует в воде с образованием ионов водорода, и основанием — если

способно в растворе присоединять ионы водорода или образовывать гидроксидионы ОН. Если в растворе не образуется ни то, ни другое, то вещество называют солью. Кислотность или щелочность раствора характеризуется показателем рН, шкала которого охватывает значения от 0 до 14. Эта шкала логарифмическая, т.е. на ней отложены логарифмы концентрации водородных ионов. Кислотность раствора с рН 5 в 10 раз больше, чем с рН 6, и в 100 раз больше, чем с рН 7. Раствор с рН 6 содержит одну миллионную моля ионов водорода на 1 л, нейтральной среде соответствует рН 7, ниже идут более кислые среды, а выше — щелочные.

Уникальные свойства воды в живой материи связаны с *малыми размерами ее молекул, их полярностью* (неравномерным распределением зарядов в молекуле — дипольностью воды) и способностью соединяться друг с другом *водородными связями*. Водородные связи слабее, чем ионные, но оказываются важными при свойствах воды как превосходного растворителя, особенно для полярных молекул. К таким веществам относятся ионные соединения, например, соли, у которых заряженные частицы (ионы) диссоциируют в воде при растворении, или неионные соединения — сахара и простые спирты, в молекулах которых есть заряженные группы (типа ОН-группы).

Когда вещество переходит в раствор, его молекулы или ионы получают возможность более свободно двигаться, и реакционная способность возрастает. Поэтому большая часть реакций в клетке идет в водном растворе. Такие гидрофильные свойства полярных молекул важны в обеспечении стабильности мембран, белковых молекул, нуклеиновых кислот и других субклеточных структур. неполярные вещества, такие как липиды, с водой не смешиваются и разделяют водные растворы на отдельные компоненты, как их разделяют мембраны. Поэтому неполярные части молекул водой отталкиваются и в присутствии воды притягиваются друг к другу, или обладают *гидрофобным* эффектом. Пример — сливание капелек масла в большую каплю и нерастворение ее в воде. Свойство воды — растворителя важно для транспортировки по организму разных веществ. Эту роль вода выполняет в крови, в лимфатической и экскреторной системах, в пищеварительном тракте и во флоэме и ксилеме растений.

13.4. ЯВЛЕНИЯ ДИФфуЗИИ И ОСМОСА, ИХ РОЛЬ В ПРОЦЕССАХ, ПРОИСХОДЯЩИХ В КЛЕТОЧНЫХ МЕМБРАНАХ

Из-за непрерывных столкновений друг с другом ни одна из молекул (или их групп) газа или жидкости не перемещается из одного участка сосуда в другой с большой скоростью. Если небольшой кристаллик йода поместить в сосуд с воздухом, то очень медленно начнут распространяться пары рыжего цвета, т.е. пары йода диффундируют сквозь молекулы воздуха. Этот процесс называется **диффузией**, он аналогичен процессу распространения тепла в стержне при наличии градиента температуры ΔT , но для диффузии необходим градиент концентрации c . Его наличие позволяет рассчитать скорость изменения числа молекул в объеме $\partial N/\partial t$, которая пропорциональна площади

площадки S , через которую будет происходить диффузия. Коэффициент диффузии D определяется уравнением: $(\partial N/\partial t) = -DS(\partial c/\partial x)$. Это уравнение, похожее на уравнение распространения тепла (знак минус показывает, что диффузия происходит противоположно росту концентрации), получил немецкий физиолог А.Фик (1855 г.). В 1822 г. французский инженер Л.Навье математически описал движение вязкой жидкости. Через 100 лет выяснилось, что уравнения Фурье, Навье и Фика являются частными случаями общего уравнения, описывающего неравновесные процессы.

Скорость диффузии зависит от скоростей диффундирующих молекул с учетом коэффициента диффузии D . В кинетической теории среднеквадратичная скорость молекул пропорциональна $\Delta T/m$, поэтому можно ожидать, что и D будет так же зависеть от температуры и массы. Опыты подтвердили это с хорошей точностью. Можно проверить зависимость D от m по данным для некоторых небольших молекул в воздухе при атмосферном давлении: для водорода при $T = 0$, $D = 6,34$; для воды при $T = 8$, $D = 2,39$; для кислорода при $T = 0$, $D = 1,78$; для углекислого газа при $T = 0$, $D = 1,39$; для дисульфида углерода при $T = 20$, $D = 1,02$ (здесь T — в градусах Цельсия, D — в $0,00001$ м/с).

Диффузия в растворах, особенно в воде, важна для биосистем. Здесь также можно записать закон Фика, но коэффициент диффузии $D = kT/6\pi a\eta r$, поэтому из-за пропорциональности массы m кубу радиуса r частиц $D \sim m$, в жидкостях коэффициент диффузии становится сильно чувствительным к массе диффундирующих частиц. Приведем некоторые значения D для молекул в воде при 20°C (D в 10 м/с): кислород — 18 а.е.м., $D = 1$; мочевины — 60 а.е.м., $D = 1,1$; глюкоза — 180 а.е.м., $D = 0,67$; рибонуклеаза — 13683 а.е.м., $D = 0,12$; гемоглобин — 68000 а.е.м., $D = 0,069$; уреаза — 480000 а.е.м., $D = 0,035$ (а.е.м. — атомная единица массы). Используя связь коэффициентов диффузии отдельных молекул в воде и измеряя их, можно найти размеры молекул. Поскольку плотность многих больших биологических молекул в сухом виде примерно равна $1,27$ г/см³, а при погружении в воду к их поверхности налипают молекулы воды, увеличивая их эффективный объем, то масса увеличивается почти в полтора раза. С учетом этого обстоятельства можно найти массы молекул по их размерам и средней плотности: $D = kT/6\pi a\eta r$; $m = 1/3\pi a^3 r$; $m = m/1,5$.

Диффузия молекулярных ионов через мембраны, образующие клеточные стенки, осуществляется при наличии определенного электрического потенциала внутри клетки. Кроме того, определенные химические процессы, происходящие внутри мембраны, меняют направление скорости диффузии различных ионов так, что по нервным волокнам распространяются электрические сигналы, представляющие нервный импульс. Процесс диффузии ответствен за 98% необходимого кислорода, поглощаемого легкими. Стенки небольших емкостей внутри легких (альвеол),

в которых происходит диффузия, имеют у взрослого человека площадь порядка 70 м, а их толщина всего $0,5$ мкм. Эти стенки плотно обвиты капиллярами, поэтому кровь циркулирует через мембраны легких только тоненькими струйками, причем ее общее количество около 100 мл. Так как площадь поверхности, через которую кислород диффундирует в кровь, а углекислый газ — обратно, очень велика, а толщина мембран мала, становится понятна эффективность процесса диффузии.

Осмозом названа диффузия через полупроницаемую перегородку. Мембрана *полупроницаема*, если она пористая и через нее возможна избирательная диффузия. Биологические мембраны часто проницаемы для воды, но непроницаемы для других веществ, растворенных в воде. Например, молекулы воды, имеющие диаметр $0,38$ нм, проходят сквозь поры, а молекулы глюкозы диаметром $0,88$ нм задерживаются и не позволяют молекулам воды свободно подходить к мембране, замедляя скорость прохождения воды. Возникает разное осмотическое давление по разные стороны мембраны, а общее давление раствора равно сумме парциальных давлений разных составляющих. В 1887 г. Вант-Гофф установил, что осмотическое давление пропорционально концентрации растворенного вещества c и температуре T . *Осмотическое давление* раствора зависит от концентрации частиц, которые не могут пройти через мембрану, при этом ионизированные вещества создают большее давление, чем неионизированные. Например, если при растворении в воде поваренной соли происходит разделение на две осмотические частицы. Принято считать, что 1 моль NaCl соответствует 2 осмолям, а осмолярность, равная 1 , отвечает 1 осмолю растворенного вещества в 1 л воды. Нормальная осмолярность клеточной жидкости равна 300 осмолей/м, поэтому при нормальной температуре тела ($T = 310$ К) осмотическое давление равно $Vc T = 8,27 \cdot 300 \cdot 310 = 7,7 \cdot 10^5$ Па. Получилось огромное значение давления, и оно останется таким, если вокруг клетки будет чистая вода. На самом деле это не так: окружение имеет концентрацию, близкую к той, что внутри клетки, и, если поместить клетку в чистую воду, разность осмотических давлений будет столь высока, что вода с большим напором устремится внутрь клетки и разорвет ее.

Осмоз не обязательно связан с наличием мембран. Набухание — тоже осмотический эффект.

13.5. ПОНЯТИЯ ФАЗЫ И ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА. ПРИМЕРЫ

Фазы — это различные однородные части физико-химических систем. *Вещество однородно*, когда все параметры состояния вещества одинаковы во всех его элементарных объемах, размеры которых велики по сравнению с межмолекулярными состояниями. Смеси различных газов всегда составляют одну фазу, если во всем объеме они находятся в одинаковых концентрациях. Одно и то же вещество в зависимости от внешних условий может быть в одном из трех агрегатных состояний — *жидком*, *твердом* или *газообразном*. Фазы — это устойчивые состояния определенного агрегатного состояния. Понятие фазы более широкое, чем понятие агрегатного состояния. В зависимости от внешних условий система может находиться в равновесии

либо в одной фазе, либо сразу в нескольких. Их равновесное существование называется *фазовым равновесием*.

Испарение и конденсация — часто наблюдаемые фазовые переходы воды в окружающей природе. При переходе воды в пар происходит сначала испарение — переход поверхностного слоя жидкости в пар, при этом в пар переходят только самые быстрые молекулы: они должны преодолеть притяжение окружающих молекул, поэтому уменьшаются их средняя кинетическая энергия и, соответственно, температура жидкости. Наблюдается в быту и обратный процесс — конденсация. Оба эти процесса зависят от внешних условий. В некоторых случаях между ними устанавливается динамическое равновесие, когда

число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул, возвращающихся в нее. Молекулы в жидкости связаны силами притяжения, которые удерживают их внутри жидкости. Если молекулы, имеющие скорости, большие средней, находятся вблизи поверхности, то они могут ее покинуть. Тогда средняя скорость оставшихся молекул понизится, и температура жидкости уменьшится. Для испарения при постоянной температуре нужно сообщить жидкости некоторое количество теплоты: $Q = r m$, r — удельная теплота парообразования, которая уменьшается с ростом температуры. При комнатной температуре для одной молекулы воды теплота парообразования составляет 10^{-20} Дж, а средняя энергия теплового движения $6,06 \cdot 10^{-21}$ Дж. То есть в пар переходят молекулы, энергия которых в 10 раз больше энергии теплового движения. При переходе через поверхность жидкости потенциальная энергия быстрой молекулы растет, а кинетическая уменьшается. Поэтому средние кинетические энергии молекул пара и жидкости при тепловом равновесии равны.

Насыщенный пар — это пар, находящийся в динамическом равновесии, соответствующем данной температуре, со своей жидкостью. Опыт показывает, что он не подчиняется закону Бойля–Мариотта, его давление не зависит от объема. Давление насыщенного пара — наибольшее давление, которое может иметь пар при данной температуре. Процессы испарения и конденсации воды обуславливают сложные взаимодействия атмосферы и гидросферы, важные для формирования погоды и климата. Между атмосферой и гидросферой происходит непрерывный обмен веществом (круговорот воды) и энергией.

Исследования показали, что с поверхности Мирового океана, составляющего 94% земной гидросферы, за сутки испаряется около 7000 км воды и примерно столько же выпадает в виде осадков. Водяной пар, увлекаемый конвекционным движением воздуха, поднимается вверх и попадает в холодные слои тропосферы. По мере подъема пар становится все более насыщенным, затем конденсируется, образуя дождевые и облачные капли. В процессе конденсации пара в тропосфере за сутки выделяется около $1,6 \cdot 10^{11}$ Дж теплоты, что в десятки тысяч раз превосходит вырабатываемую человечеством энергию за то же время.

Кипение — процесс перехода жидкости в пар, который происходит в результате всплывания пузырьков, наполненных паром. Кипение происходит во всем объеме. Разрыв пузырьков у поверхности кипящей жидкости свидетельствует, что давление пара в них превышает давление над поверхностью жидкости. При 100°C давление насыщенных паров равно давлению воздуха над поверхностью жидкости (так была выбрана эта точка на шкале). На высоте 5 км давление воздуха вдвое меньше, и вода закипает там при 82°C , а на границе тропосферы (17 км) — приблизительно при 65°C . Поэтому точка кипения жидкости соответствует той температуре, при которой давление ее насыщенных паров равно внешнему. Слабое поле тяготения Луны (ускорение свободного падения у ее поверхности — $1,7 \text{ м/с}^2$) не способно удержать атмосферу, а при отсутствии атмосферного давления жидкость мгновенно выкипает, поэтому лунные «моря» безводны и образованы застывшей лавой. По той же причине безводны и марсианские «каналы».

Вещество может находиться в *равновесии* и в *разных фазах*. Так, при сжижении газа в состоянии равновесия фаз объем может быть любым, а температура перехода связана с давлением насыщенного пара. Кривая равновесия фаз может быть получена при проекции на плоскость (p, T) области перехода в жидкое состояние, а аналитически определяется из решения уравнения Клаузиуса–Клапейрона. Аналогично можно получить кривые *плавления* и *возгонки*, которые соединяются в одной точке плоскости (p, T), в *тройной точке*, где в определенных пропорциях находятся в равновесии все три фазы. Тройной точке воды соответствует давление 4,58 мм рт.ст. и температура — $0,0075^\circ\text{C}$; углекислоты — 5,11 атм. и $T = 56,6^\circ\text{C}$. Поэтому при атмосферном давлении $p = 101,3 \text{ кПа}$ углекислота может быть в твердом или газообразном состоянии. При критической температуре физические свойства жидкости и пара одинаковы, при более высоких — вещество может быть только в газообразном состоянии. Для воды — $T = 374,2^\circ\text{C}$, $p = 22,12 \text{ МПа}$; для хлора — 144°C и $p = 7,71 \text{ МПа}$.

Температуры перехода из одной фазы в другую зависят от давления, но в различной степени: температура плавления — слабее, температуры парообразования и сублимации — сильнее. При нормальном и постоянном давлении переход происходит при определенном значении температуры, имеют место точки *плавления*, *кипения* и *сублимации* (или *возгонки*).

Переход вещества из твердого состояния непосредственно в газообразное можно наблюдать, например, в оболочках кометных хвостов. Когда комета находится далеко от Солнца, почти вся ее масса сосредоточена в ее ядре, имеющем размеры 10–12 км. Ядро окружено небольшой оболочкой газа — это голова кометы. При приближении к Солнцу ядро и оболочка кометы начинают нагреваться, вероятность сублимации растет, а десублимации (обратного ей процесса) — уменьшается. Вырывающиеся из ядра кометы газы увлекают за собой и твердые частицы, голова кометы увеличивается в объеме и становится газопылевой по составу. Давление около кометного ядра очень низкое, и жидкая фаза не возникает. Вместе с головой растет и хвост кометы, который вытягивается в сторону от Солнца. У некоторых комет он достигает в перигелии 10^{11} м , но плотности в кометном веществе ничтожны малы. При каждом подходе к Солнцу кометы теряют свою массу, в ядре сублимируют все более летучие вещества, и постепенно оно рассыпается на метеорные тела, образующие метеорные потоки. Так закончили свое существование множество комет.

Весной 1986 г. в космос для исследования кометы Галлея были направлены автоматические советские станции «Вега-1» и «Вега-2», которые прошли от нее на расстояниях 9000 и 8200 км, а станция НАСА «Джотто» — всего в 600 км от ядра кометы. Ядро имело размеры $14 \times 7,5 \text{ км}$, темный цвет и довольно высокую температуру — около 400 К. Когда космические станции прошли через голову кометы, сублимировало около 40 т ледяного вещества за 1 секунду. Поздней осенью, когда после сырой погоды наступает резкое похолодание, на ветвях деревьев можно наблюдать иней — это *десублимировавшие* кристаллики льда. Подобное явление используют при хранении мороженого, когда

углекислота охлаждается, так как переходящие в пар молекулы уносят энергию. На Марсе явления сублимации и десублимации углекислоты в его полярных шапках играют такую же роль, что и испарение — конденсация в атмосфере и гидросфере Земли.

Теплоемкость стремится к нулю при сверхнизких температурах, как установил Нернст. Планк показал, что *вблизи абсолютного нуля* все процессы протекают *без изменения энтропии*. Построенная Эйнштейном теория теплоемкости твердых тел при низких температурах позволила сформулировать результат Нернста как *третье начало термодинамики*. Наблюдаемые при низких температурах необычные свойства веществ — сверхтекучесть и сверхпроводимость — нашли объяснение в современной теории как *макроскопические квантовые эффекты*.

Фазовые переходы бывают нескольких родов. Во время фазового перехода температура не меняется, но меняется объем системы. Фазовыми переходами 1-го рода называются изменения агрегатных состояний вещества, если температура постоянна во время перехода, но меняется объем и энтропия системы. Чтобы произошел такой фазовый переход, нужно данной массе вещества сообщить определенное количество тепла, соответствующего *скрытой теплоте превращения*.

В самом деле, при переходе из более конденсированной фазы в фазу с меньшей плотностью нужно сообщить некоторое количество энергии в форме теплоты, которое пойдет на разрушение кристаллической решетки (при плавлении) или на удаление молекул жидкости друг от друга (при парообразовании). Во время преобразования скрытая теплота пойдет на преодоление сил сцепления, интенсивность теплового движения не изменится, в результате температура остается постоянной. При таком переходе степень беспорядка, следовательно, и энтропия, возрастает. Если процесс идет в обратном направлении, то скрытая теплота выделяется.

Фазовые переходы 2-го, 3-го и т.д. родов связаны с порядком тех производных термодинамического потен-

циала $\partial\Phi$, которые испытывают конечные изменения в точке перехода. Такая классификация фазовых превращений связана с работами физика-теоретика П.Эренфеста. Так, в случае фазового перехода 2-го рода в точке перехода испытывают скачки производные второго порядка: теплоемкость при постоянном давлении $C = -T(\partial\Phi/\partial T)$, сжимаемость $\beta = -(1/V)(\partial\Phi/\partial p)$, коэффициент теплового расширения $\alpha = (1/V)(\partial\Phi/\partial T\partial p)$, тогда как первые производные остаются непрерывными. Это означает отсутствие выделения (поглощения) тепла и изменения удельного объема (Φ — термодинамический потенциал).

Фазовые переходы 2-го рода связаны с изменением *симметрии* системы: выше точки перехода система, как правило, обладает более высокой симметрией, как показал в 1937 г. Л.Д.Ландау. Например, в магнетике спиновые моменты выше точки ориентированы хаотически, и одновременно вращение всех спинов вокруг одной оси на одинаковый угол не изменяет свойств системы. Ниже точки перехода спины имеют некоторую преимущественную ориентацию, и одновременный их поворот меняет направление магнитного момента системы. Ландау ввел *коэффициент упорядочения* и разложил термодинамический потенциал в точке перехода по степеням этого коэффициента, на основе чего построил классификацию всех возможных типов переходов, а также теорию явлений сверхтекучести и сверхпроводимости. На этой основе Ландау и Лифшиц рассмотрели много важных задач — переход сегнетоэлектрика в параэлектрик, ферромагнетика — в парамагнетик, поглощение звука в точке перехода, переход металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние и др.

Критические явления происходят в неустойчивых системах, восприимчивых к внешним воздействиям. Теория Вильсона применима ко многим областям физики — турбулентности, фазовым переходам, теории кварков и др. И кто знает, на каком языке будут говорить физики-теоретики следующего столетия?!

13.6. ВОЗНИКНОВЕНИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ В НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ. ПОНЯТИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ. УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ СИСТЕМ

Суммарное уменьшение энтропии в открытых системах при определенных условиях за счет обмена потоками с внешней средой может превысить ее внутреннее производство. Появляется неустойчивость предшествующего неупорядоченного однородного состояния, возникают и могут возрасти до макроскопического уровня *крупномасштабные флуктуации*. При этом *из хаоса* могут возникнуть *структуры*, переходящие во все более упорядоченные. Они образуются за счет *внутренней перестройки системы*, поэтому это явление получило название *самоорганизации*. При этом энтропия, отнесенная к тому же значению энергии, убывает. И.Пригожин назвал упорядоченные образования, возникающие в диссипативных системах в ходе неравновесных необратимых процессов, *диссипативными структурами* (от лат. слова *dissipatio* «разгонять, рассеивать»). Считается, что эти структуры возникают при рассеянии свободной энергии.

Состояние текущего равновесия в системе должно поддерживаться извне массой и энергией, компенсирующими потери. Такие системы называют *открытыми*. Но процессы самоорганизации уже нельзя описывать представлениями линейной термодинамики необратимых процессов, линейными соотношениями Онсагера между обобщенными силами и потоками, так как структуры формируются *вдали от равновесия*. Под действием крупномасштабных флуктуаций возникают *коллективные* формы движения, называемые *модами*, между которыми возникает *конкуренция*, происходит *отбор* наиболее устойчивых из них, что и приводит к спонтанному возникновению макроскопических *структур*. Таким системам нельзя навязать пути развития, обычно они имеют несколько возможностей развития. В *точке бифуркации* и происходит выбор пути, в качестве созидающего начала здесь выступает хаос. При этом в качестве «пускового крючка» может выступить мельчайшее возмущение, флуктуация, тогда как выбор пути

определяет макроскопические результаты. *Процессы самоорганизации* описываются *нелинейными уравнениями* для макроскопических функций. Брюссельская школа, возглавляемая Пригожиным, исследовала способность открытых систем к самоорганизации и выделила *неравновесность* в качестве *основного источника упорядоченности*.

Самоорганизация — «спонтанное образование высокоупорядоченных структур из зародышей или даже из хаоса», спонтанный переход от неупорядоченного состояния к упорядоченному за счет совместного, кооперативного (синхронного) действия многих подсистем. *Роль коллективного поведения подсистем*, образующих систему, подчеркивал немецкий физик Г.Хакен, и потому ввел для процессов самоорганизации название «*синергетика*» (греч. *synergetike* — «сотрудничество, совместное действие»). Хаотическое состояние содержит в себе неопределенность — вероятность и случайность, которые описываются при помощи понятий *информации* и *энтропии*. Хакен, изучив «случайность», рассмотрел «необходимость» и получил детерминированные уравнения движения. При этом самым главным оказывается *выбор равновесных мод* и исследование их *устойчивости*. Случайное событие вызывает неустойчивость, а это — толчок для возникновения новых конфигураций (мод). Зародышем самоорганизации служит «вероятность»; упорядоченность возникает через флуктуации, устойчивость — через неустойчивость. В предисловии к своей книге «Синергетика» Хакен пишет: «Я назвал новую дисциплину “*синергетикой*” не только потому, что в ней исследуется совместное действие многих элементов систем, но и потому, что для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизацией, необходимо кооперирование многих различных дисциплин». В синергетике сформулирован принцип самодвижения в неживой природе, создания сложных систем из простых. Тем самым в физику проник эволюционный подход, случайность вышла на макроскопический уровень. Синергетика привела к новому пониманию эволюции.

В открытых системах можно менять потоки энергии и вещества, т.е. *регулировать образование диссипативных структур*. При неравновесных процессах, начиная с какого-то критического для данной системы значения внешнего потока, из неупорядоченных и хаотических состояний за счет потери их устойчивости могут возникнуть *упорядоченные состояния*. Упорядоченность может быть временная, пространственная и пространственно-временная. Чтобы не вдаваться в общую теорию таких систем, обратимся к примерам из разных областей естествознания.

Конвективная ячейка Бенара — пример возникновения структуры. Флуктуации сначала из-за вязкого трения затухали, в сверхкритической области вдруг резко выросли, достигая макроскопических масштабов. Для устойчивости потоков жидкости необходима регулировка подогрева, и она происходит самосогласованно. Возникает структура, обеспечивающая максимальную скорость тепловых потоков. Система обменивается с окружающей средой только теплом и в стационарных условиях (при T): получает

тепла столько, сколько отдает (при $T < T$), то $S = (Q/T) - (Q/T) < 0$, т.е. внутренняя структура (или самоорганизация) поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии, или *негэнтропии*.

Системы с обратной связью наиболее важна среди сложных систем. Система определенным образом реагирует на внешнее воздействие: может его усилить — *положительная обратная связь*, может свести его к нулю — *гомеопатическая обратная связь*, а может ослабить его — *отрицательная обратная связь*. Отрицательная обратная связь способствует восстановлению равновесия в системе при его нарушении внешним воздействием. Положительная вызывает еще большее отклонение, чем то, которое было бы при отсутствии обратной связи. Механизм обратной связи сам меняет систему. Если он повышает степень организованности системы, говорят о ее самоорганизации. Поведение системы может быть случайным или целесообразным. *Целесообразным поведением* обладают системы с отрицательной обратной связью. Для обозначения машин с внутренне целесообразной реакцией на внешнее воздействие создатель кибернетики Н.Винер (1894–1964) ввел термин «севромеханизмы». Обратная связь — одно из основных понятий кибернетики.

Кибернетика — наука об управлении сложными системами с обратной связью. Ее рождение связывают с появлением в 1948 г. книги Н.Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине», хотя некоторые идеи появлялись и раньше. В ее основе лежит идея возможности использовать общий подход к рассмотрению процессов управления в системах различной природы. Системы изучаются по реакциям на внешние воздействия, поэтому кибернетики ввели новый *функциональный подход* («сигнал — отклик») и новое фундаментальное понятие «*информация*».

Информация — мера разнообразия систем. Она увеличивается с ростом разнообразия в системе. С ней связан один из основных законов кибернетики — *закон необходимого разнообразия*: эффективное управление системой возможно только тогда, когда разнообразие управляющей системы больше разнообразия управляемой. Это значит, что чем больше имеем информации о системе, тем эффективнее процесс управления ею. Это понятие характеризовало меру организованности системы в противовес энтропии как меры неорганизованности. Кибернетика исследует зависимости между характеристиками системы и информацией, понижение энтропии означает рост информации. В системах управления решаются задачи разных типов: *задачи стабилизации, выполнения программы, слежения и оптимизации*. В ней рассматриваются *цели и способы управления*. Эта наука рассматривает системы во взаимодействии друг с другом, в движении и развитии. В кибернетике отвлекаются от конкретных особенностей изучаемых систем, выделяя закономерности, общие для некоторого класса систем. Составляющие этой абстрактной кибернетической системы описываются в терминах абстрактных элементов.

Глава 14. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ МЕГАМИРА

14.1. ЗВЕЗДЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭВОЛЮЦИЯ

Звезды — это основные тела Вселенной, в них сосредоточено более 90% наблюдаемого вещества. Солнце — одна из звезд, другие звезды представляются светящимися точками на небосводе, так как очень далеки от нас. Отдельные группы звезд — *созвездия* — выделяли еще в древности, в их названиях отражены образ мысли, предания, легенды и жизнь разных народов. Сейчас на звездном небе выделено 88 созвездий с четко обозначенными границами, 60 из них — видны с территории нашей страны. Было замечено, что в течение суток звезды делают полный круг по небу и центр этого круга (полос мира) находится в том же направлении, в котором днем отбрасывается самая короткая тень. Постепенно люди научились ориентироваться (от лат. *oriens* — восток) и по звездам. В ритме сменой времен года изменяется вид звездного неба и наибольшая высота Солнца в полдень. Созвездия, видимые над горизонтом вечером на западе, примерно через 2,5 месяца уже появляются утром на востоке. Значит, Солнце движется справа налево среди звезд, его путь называют *эклиптикой*. Обычно созвездия служат фоном, на котором изучаются и описываются положения перемещающихся по небу тел. Часть созвездий, по территории которых проходит годовой путь Солнца, относят к *полюсу Зодиака*. В древности в него входили 12 созвездий, с ними связывали и деление года на 12 месяцев, так как Солнце проходит участок каждого из них за месяц, т.е. по 30 градусов дуги. Сейчас путь Солнца проходит через 13 созвездий. В каждом созвездии звезды обозначаются по порядку по мере уменьшения яркости буквами греческого алфавита. Некоторые яркие звезды имеют свои собственные названия, которые чаще всего достались им от греческих (Сириус), латинских (Регул) или арабских (Альтаир) астрономов.

Звездные величины, введенные в древности, обозначают буквой *m*. Все видимые звезды еще во II в. до н.э. астроном Гиппарх разделил по яркости: переход от одной звездной величины к другой глаз ощущает одинаковым перепадом блеска. Самые яркие — звезды с $m = 1$, самые слабые — с $m = 6$. В безлунную ночь невооруженным глазом можно видеть почти 3000 звезд (до 6-й звездной величины), с телескопом — почти 350 тыс. звезд до 10-й величины, 32 млн — до 15-й и 1 млрд — до 20-й. Так как воспринимаются лишь относительные изменения яркости, эти значения связаны со свойствами глаза. Диапазон в 5 звездных величин соответствует отношениям их блеска в 100 раз. Поэтому отношение блеска на одну величину соответствует $(100)^{1/5} = 2,512$. Эта величина и была принята: $m = m_0 - 2,51g E$, здесь E — освещенность (световой поток, падающий на единичную площадку поверхности), $m_0 = -13^m,89$ — звездная величина, соответствующая одному люксу. И отношения освещенностей звезд равно 2,5 в степени разности их звездных величин, т.е. $m_2 - m_1 = -2,51g(E_2/E_1)$. Для Солнца $m_C = -26^m,58$, для полной Луны $m_L = -12^m,7$, поэтому из приведенной формулы можно заключить, что при одинаковой высоте над горизонтом полная Луна освещает земную поверхность в 465000 раз слабее Солнца. Сириус ярче Полярной звезды, имеющей звездную величину +2, в 25 раз,

что соответствует разности звездных величин 3,5. Поэтому звездная величина Сириуса $(+2 - 3,5) = -1,5$, а Солнце посылает энергии в 10^{10} раз больше, чем Сириус. Здесь учтено, что освещенности, созданные одним источником на разных расстояниях, обратно пропорциональны квадратам этих расстояний.

Звезды — газовые шары, которые светят собственным светом (в отличие от планет). Мир звезд многообразен. По физическим характеристикам звезды делят на *нормальные звезды*, *белые карлики* и *нейтронные звезды*. Размеры большинства звезд различны — от 10 до 10^7 км. Диаметр Солнца — 1,4 млн км. Белые карлики и нейтронные звезды имеют диаметр всего 10–20 км, есть гиганты — Бетельгейзе, Арктуры, а самые большие, красные гиганты, больше Солнца настолько, что, оказавшись на его месте, заняли бы объем, включающий орбиту Юпитера. *Плотность* гигантов и сверхгигантов мала (меньше воздуха в атмосфере Земли), солнечного вещества — больше плотности воды в 1,5 раза, а белого карлика (звезды Сириус В) порядка 2т/см^3 . Плотность нейтронных звезд еще больше — 10^{14}кг/м^3 , что соответствует плотности атомного ядра.

Светимость звезды — это мощность оптического излучения. Солнце излучает $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт. Чаше всего светимости звезд выражают в светимостях Солнца. Диапазон светимостей наблюдаемых звезд огромен — от 10^{-3} до 10^6 светимостей Солнца. Для нас Солнце много ярче других звезд, но это не означает, что оно излучает больше энергии, чем другие. Для исключения влияния расстояния ввели понятие абсолютной звездной величины, которую имела бы звезда, находящаяся от нас на расстоянии в 10 пк. Абсолютная звездная величина M связана с видимой m соотношением: $M = m + 5 - 51g r$. Величина $m - M$ называется модулем расстояния. Для Солнца абсолютная звездная величина M_C равна $+4^m,72$, т.е. существенно меньше, чем видимая, как для всех звезд, которые ближе 10 пк.

Расстояния до звезд, как уже указывалось, измеряют методом параллакса, единицами длин служат пк и св. год. Парсек (пк) соответствует годичному параллаксу в $1''$, т.е. с этого расстояния 1 а.е. видна под углом в $1''$. Отсюда следует, что в 1 пк столько а.е., сколько угловых секунд в 1 радиане, т.е. $1\text{ пк} = 206265\text{ а.е.}$ Наибольший годичный параллакс $\pi = (0'',76)$ имеет ближайшая к нам звезда — Проксима Центавра. Поскольку расстояние $r = a/\sin \pi$, $r = (206265''/0'',76)a = 272000\text{ а}$, т.е. самая близкая к нам звезда находится в 272000 раз дальше, чем Солнце. Световой год (св. год) есть расстояние, которое проходит свет за год, т.е. $365,25 \cdot 86400 \cdot 3 \cdot 10^8\text{ м} = 9,46 \cdot 10^{15}\text{ м} = 63100\text{ а.е.}$ Но $1\text{ пк} = 206265\text{ а.е.}$, и потому $1\text{ пк} = 3,26\text{ св. года}$.

В XIX столетии звезды рассортировали по размерам и массам, а в конце века — по спектрам.

Спектральные классы ввел в 1900 г. американский астроном Э.Пикеринг, обозначив их буквами латинского алфавита. Границы между классами были нечеткие, и впоследствии каждый класс разбили на группы от 0 до 9, так что наше Солнце попало по спектру в G2. По спектральным сериям определяют температуру звезд. Спект-

ральные классы выстроили в порядке убывания температуры: *O, B, A, F, G, K, M* (этот порядок легко запомнить так — *o, be a fine girl, kiss me!*). Имеются еще четыре дополнительных класса: для холодных звезд — *R, N, S*, для горячих — *W*. Очевидно, что без классификации звезд нельзя говорить об их эволюции.

Химический состав звезд определяют по линиям в спектрах. Так как поверхностные слои звезд непрозрачны, данные относятся к поверхности. Оказалось, что 98% звездного вещества — это водород и гелий, причем обычно водорода по массе больше в 2,7 раза.

Строение звезды и источник ее энергии казались в какой-то степени выясненными, но возникли другие вопросы. Солнце, возраст которого оценивали в 5 млрд лет, бедно водородом и богато гелием, хотя за это время оно должно было истратить меньше водорода и образовать меньше гелия. Можно допустить, что раньше оно было горячее, и процессы шли скорее, но, по геологическим данным, все это время количество солнечной энергии практически не менялось. Если бы водород уже в большей части выгорел, то в самом центре этой звезды могли начаться ядерные реакции и стали рождаться более тяжелые элементы. На Солнце и планетах много элементов, более сложных, чем гелий. Получается — и они из самого центра Солнца?! Эти противоречит гипотезе происхождения их из туманности, стало быть, тяжелые элементы должны появиться как-то иначе.

Диаграмму зависимости светимостей звезд от их спектральных классов составили ученые Герцшпрунг и Расселл, она названа именами обоих. По оси абсцисс — спектральные классы звезд (показатели цвета или температуры), по оси ординат — светимости звезд L (или звездные величины M). Звезды по светимости разделены на семь классов, обозначенных римскими цифрами. Класс светимости пишется после спектрального класса звезды, так, Солнце: звезда класса $G 2V$. На диаграмме звезды располагаются не беспорядочно, а образуют несколько последовательностей (рис.17, а).

Главная последовательность — сравнительно узкая полоса звезд, протянувшаяся из верхнего левого угла вниз. Так, в окрестности Солнца большинство звезд сконцентрировано вдоль нее. В правом верхнем углу расположены *сверхгиганты*. Размеры звезд оценили с помощью изобретенного в 1881 г. *интерферометра*, который улавливал разницу в длинах световых волн, исходящих от разных точек поверхности звезды. Подсчет показал, что вблизи Солнца на одного сверхгиганта приходится около 1000 гигантов и около 10 млн звезд Главной последовательности. *Группа звезд-гигантов* компактна и расположена вверху диаграммы между Главной последовательностью и группой сверхгигантов. Параллельно Главной последовательности, несколько ниже ее, расположены звезды, образующие *последовательность субкарликов* (у них содержание металлов гораздо ниже, чем у звезд Главной последовательности), в левом нижнем углу диаграммы — группа *белых карликов*, светимость которых меньше солнечной в сотни раз.

Эволюционный путь звезды построил Расселл на основе закономерностей распределения звезд на диаграмме

и известных физических моделей. Переходя от стадии холодной туманности в голубовато-белую, звезда перемещается в верхней части диаграммы справа налево, пока не достигнет верхнего левого конца Главной последовательности. Далее звезда под влиянием поля тяготения сжимается (при этом нагревания не происходит, а ее вещество достигает плотности, уже не соответствующей газу) и остывает, превращаясь в *желтый карлик*, как наше Солнце. Затем она станет *красным карликом* и погаснет совсем, став *черным карликом* — пеплом угасшей звезды. Так звезда скользит по Главной последовательности из верхнего левого угла к нижнему правому. Эту гипотезу, просуществовавшую всего десятилетие, назвали теорией скользящей эволюции звезд (рис.17, б).

Масса звезды приобрела значимость, когда были открыты источники энергии звезд. Масса Солнца — $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг, а почти всех звезд — в пределах (0,1–50) M_{\odot} . Практически наиболее верным способом определения массы звезды являются исследования движений двойных звезд. Оказалось, что положение звезды на Главной последовательности определяется ее массой.

Соотношения светимостей звезд и их радиусов $(L/L_{\odot}) = (R/R_{\odot})^{5,2}$, светимостей и масс $(L/L_{\odot}) = (M/M_{\odot})^{0,75}$ сравнили со значением количества энергии, излучаемой поверхностью звезды за единицу времени $L/4\pi R^2$, и получили соотношение между температурой поверхности и ее массой $(T/T_{\odot}) = (M/M_{\odot})^{0,6}$. То есть, чем меньше масса звезды, тем меньше ее поверхностная температура и более поздним будет ее спектральный класс. Отсюда можно оценить массу звезды и по ее светимости: $(M/M_{\odot}) = (L/L_{\odot})^{0,256} = 3,04 \cdot 10^{-0,102M}$. Звезды отличаются цветом, считается, что имеют место законы равновесного излучения — закон Стефана–Больцмана и Вина. Антарес имеет красный цвет, Капелла — желтый, Сириус — белый, Вега — голубовато-белый.

Модели внутреннего строения звезд основаны на соотношениях между параметрами звезд. Они получены Эддингтоном из условий равновесия плазмы внутри звезд. С увеличением массы скорость потребления топлива растет быстрее, чем его запас. То есть, чем больше и горячее звезда, тем быстрее кончится ее топливо и тем скорее кончится ее «жизнь» на Главной последовательности, где находится 0,99 всех видимых звезд. Так, Солнце, по оценкам ученых, пробудет на ней еще 8 млрд лет, т.е. оно еще не достигло своего среднего возраста. Если бы Солнце принадлежало к классу *A*, то его срок (5 млрд лет) был бы на исходе. Для такой большой и горячей звезды, как *S Золотой Рыбы*, этот срок был бы всего 2–3 млн лет. В теории Эддингтона все свойства звезды основывались на модели идеального газа, поэтому, как и газ, звезды у него при сжатии обязательно нагревались.

Диаграмма соотношений «масса — светимость» была составлена к 1924 г.

Схема эволюции звезд сопоставлялась с наблюдениями. *Существование межзвездной пыли* доказал в 1930 г. Р.Трюмлер (США). Он детально исследовал *звездные скопления*. Схема эволюции такова. Облако газа и пыли — *газопылевой комплекс* — сжимается и нагревается, возникающие при этом неоднородности приводят его в состояние гравитационной неустойчивости, и он распадается на части.

Пока такой фрагмент прозрачен для инфракрасного излучения, температура его внутренних слоев не повышается, и сжатие происходит ускоренно. С некоторого момента изотермическое сжатие переходит в адиабатическое, объект становится непрозрачным, давление и температура внутри растут, замедляя сжатие. Так возникает *протозвезда*.

Внутренние слои разогреваются за счет энергии гравитации падающего к центру вещества, объект как бы закипает, что отражается бурными вспышками на поверхности. Примером такой звезды является T Тельца. Это состояние продолжается до тех пор, пока разогрев не достигнет значений температуры, достаточных для начала термоядерных реакций. В соответствии со своей массой звезда занимает определенное место на Главной последовательности. Наше Солнце проделало такой путь примерно за 2 млн лет. Звезда с массой, примерно равной солнечной, «сядет» в среднюю часть последовательности и останется там около 10 млрд лет. Так протозвезда приобретает статус *звезды*.

По мере выгорания водорода давление в оболочке повышается, внешние слои расширяются, и звезда начинает покидать Главную последовательность (двинется сначала

чуть вправо и вниз), так как на расширение тратится некоторая энергия, и светимость звезды уменьшается. Равновесие достигается за счет формирования протяженной зоны конвекции, и звезда перейдет в группу *красных гигантов*. Но огромная атмосфера красного гиганта не обеспечивает перенос энергии от внутренних слоев, внутри звезды процессы пойдут адиабатически. Вблизи ядра температура может достичь необходимого значения для протекания термоядерных реакций, возможно, и с большим выходом энергии, чем у протон-протонных. Тогда холодная огромная атмосфера будет отброшена растущим давлением и превратится в расширяющуюся газовую туманность, которая может рассеяться в пространстве за сотни тысяч лет. Вероятно, наблюдаемая туманность в созвездии Лиры имеет такое же происхождение. Соединения ядер гелия возможны, но они дают меньше энергии (до 9%), чем при соединении ядер водорода. Звезда может продлить свое существование, если из углерода, получающегося при соединении трех атомов гелия, начнут возникать более сложные ядра. Конец наступает при синтезировании железа, которое имеет самые устойчивые ядра и уже не выделяет энергии.

14.2. ГАЛАКТИКА, ЕЕ ФОРМА И СТРОЕНИЕ. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА В ГАЛАКТИКЕ

Наша галактическая система — рядовая звездная система. На небе в ясную безлунную ночь хорошо видна яркая белесоватая полоса — *Млечный Путь*. Он простирается (при вечерних наблюдениях) через созвездия Скорпиона, Стрельца, Орла и дальше вверх к созвездиям Лебедя, Цефея и Кассиопеи. При утренних наблюдениях можно проследить его другую ветвь: по созвездиям Персея, Возничего, Тельца, Близнецов, Ориона и Большого Пса. В южном полушарии он проходит через созвездия Паруса, Киля, Южного Креста и Центавра. Таким образом, Млечный путь образует на небе полный круг. Греки назвали Млечный Путь галактическим (молочным) кругом. Его светлое сияние происходит в основном из-за свечения бесчисленного количества слабых звезд.

Представление о том, что Млечный Путь состоит из огромного числа звезд, восходит еще к Демокриту. Его догадку подтвердил Галилей с помощью своего телескопа. У.Гершель обратил внимание, что в направлении созвездия Геркулеса звезды как бы раздвигаются, а на противоположной стороне — сближаются. Такое впечатление получается при движении по дороге, по обеим сторонам которой высажены деревья, поэтому Солнце движется по отношению к ближайшим звездам и расстояния до них неодинаковы.

Основателем звездной астрономии считается У.Гершель. Из наблюдений он заключил, что протяженность Галактики порядка 5800 св. лет, а ее толщина — 1100 св. лет. Он не знал о существовании *межзвездного газа*, поглощающего излучение звезд, поэтому его размеры Галактики приуменьшены в 15 раз. В XX в. были определены форма и масштабы этой гигантской звездной системы и установлено место, которое занимает в ней наше Солнце. Солнечная система находится между спиральными рукавами, один из которых виден в направлении на центр

Галактики в созвездии Стрельца, а другой — в противоположном направлении, в созвездии Персея. Именно в направлении на созвездие Стрельца Млечный Путь выглядит наиболее ярко.

Галактика — это гигантская звездная система, состоящая почти из 200 млрд звезд, и Солнце — одна из них. Вообще галактики — огромные вращающиеся звездные системы. Они различаются и по внешнему виду, и по характеристикам. Помимо звезд, в галактики входит *межзвездное вещество: газ, пыль, частицы космических лучей*. Некоторые галактики похожи на нашу Галактику, называемую Млечный Путь, по ряду свойств и по внешнему виду. Из их фотографий можно заключить, что это достаточно *тонкий диск с утолщением в центре*. В этом месте Галактика простирается на область с радиусом в 25 кпк и толщиной около 2 кпк, на расстоянии в 10 кпк от центра находится Солнечная система. Она движется вокруг центра Галактики почти по окружности со скоростью 250 км/с. Орбита Солнца лежит в плоскости Галактики, и один оборот длится 250 млн лет (рис.18). Масса центральной части Галактики порядка $3 \cdot 10^{41}$ кг. Предполагают, что большая масса сосредоточена на периферии Галактики в области радиусом около 100 кпк. Многие звезды образуют группы — *скопления*. Эволюционные процессы связаны с такими характеристиками звезд, как *возраст, химический состав, характеристики движений и пространственное расположение*.

Возраст звезд меняется в достаточно большом диапазоне значений: от 15 млрд лет (возраст Вселенной) до сотен тысяч лет — самых молодых. Есть звезды, образующиеся на наших глазах и находящиеся в протозвездной стадии. Все звезды, по терминологии Бааде (1944 г.), принято называть *звездным населением*, причем самые старые составляют население *II*, или *гало* (шаровые скоп-

ления, содержащие до миллиона звезд; рассеянные скопления, содержащие лишь 100–1000 звезд; субкарлики и переменные типа RR Лиры); к старым относят красные карлики, красные гиганты и цефеиды. Их возраст порядка 10^{10} лет. Старые объекты находятся ближе к центру Галактики. В плоскости Галактики расположены звезды молодые и среднего возраста — население *I*, или *диска* (звезды Главной последовательности спектральных классов *O* и *B* — самые молодые и горячие, *G*, *K*, *M* — карлики). Это рассеянные звездные скопления, горячие звезды — гиганты и сверхгиганты, сверхновые звезды, долгопериодические цефеиды, молекулярные облака, светлые и темные туманности. Возраст их порядка 10^7 – 10^8 лет, они недавно образовались из межзвездного газа, поэтому находятся в плоскости, вблизи него. Межзвездного газа по массе немного — около 5% общей массы, и он сконцентрирован в спиральных рукавах. Наше Солнце находится посередине между двумя спиральными рукавами. Промежуточную группу по возрасту занимают звезды, заполняющие диск Галактики толщиной около 1 кпк. Это новые звезды, планетарные туманности, яркие красные гиганты, расположенные в ядре Галактики (рис.19).

Сравнительно молодые звезды верхней части Главной последовательности входят обычно в состав рассеянных скоплений. Непосредственному наблюдению доступны около 1000 таких скоплений, и все они принадлежат диску. Кроме *рассеянных скоплений*, в Галактике более 100 *шаровых скоплений*, представляющих собой достаточно компактные образования из сотен тысяч и даже миллионов звезд. Они получили такое наименование потому, что в центре скопления блеск близко расположенных звезд сливается в яркий фон. Ближайшее шаровое скопление можно видеть в созвездии Центавра даже невооруженным глазом в виде размытого пятна. Шаровые скопления очень устойчивы, они образуют сферическую подсистему. В шаровых скоплениях много бело-голубых звезд и мало красных гигантов. Многие из шаровых скоплений являются источниками мощного рентгеновского излучения. Это объясняют аккрецией межзвездного газа на черные дыры, находящиеся, по мнению некоторых ученых, в центре шаровых скоплений.

Межзвездный газ относят к населению диска, поскольку по своему химическому составу, расположению и характеру движения он ближе всего к молодым звездам. В спектрах были открыты линии межзвездного натрия, калия, железа, титана и водорода (по косвенным данным, например, потому, что водород образует вместе с атомом углерода молекулу CH). Измерения взаимных положений компонент в спектрах позволили составить схемы обращения облаков вокруг центра Галактики. Средняя плотность водорода в межзвездной среде порядка 0,1 частицы в 1 см^3 , а в плотных облаках — до нескольких тысяч. Соотношение водорода и гелия в межзвездной среде оценивается как 9:1. В спиральных рукавах плотность водорода примерно на порядок выше, чем между рукавами.

Межзвездная среда ослабляет свет звезд примерно на 0,6 зв. величины на пк, как доказал в 1847 г. русский астроном В.Я.Струве, а советский ученый П.П.Паренаго вывел формулу учета этого ослабления. Межзвездная среда

похожа на пыль, концентрация которой в 100 раз меньше газовой. Частицы пыли похожи на ледяные загрязненные кристаллики с $T \approx 17 \text{ К}$. Газопылевые облака поглощают свет далеких звезд, их поглощательная способность пропорциональна $1/\lambda$. Например, ядро Галактики удается наблюдать только в инфракрасном и радиодиапазонах. В центре Галактики обнаружен мощный источник радиоизлучения Стрелец-А. В нем предполагают наличие массивной черной дыры, окруженной газовым диском диаметром около 1 млрд км. Из ядра, линейные размеры которого около 4000 св. лет, с огромными скоростями (до 600 км/с) выбрасываются сгустки вещества, масса которых за год оценивается в 1 массу Солнца. В основном облака концентрируются вблизи галактической плоскости. Туманности скрывают тайны строения нашей Галактики.

Ядро Галактики изучено плохо, так как центральная область почти недоступна для наблюдений из-за сильного поглощения в межзвездной среде. Наблюдения в разных областях спектра позволили установить, что его размер около нескольких килопарсек (кпк). Плотность звезд достигает 10^7 звезд/пк³, тогда как вблизи Солнца — одна звезда на 10 пк³. В центре Галактики находится источник нетеплового излучения (Стрелец А), вероятно, очень быстрые электроны, которые возникают при вспышках сверхновых звезд или пульсаров, ускоряются в магнитных полях. Мощное излучение от ядра существует в радиодиапазоне и в инфракрасной области. Есть предположения, что это массивное быстровращающееся плазменное тело «магнетонд» или черная дыра.

Движения старых и молодых звезд в Галактике различны. У старых — большие эксцентриситеты орбит, а молодые движутся почти по окружностям. Получаются две подсистемы: молодые звезды быстро вращаются внутри почти неподвижной системы более старых звезд.

Старое население Галактики почти равномерно занимает почти сферический объем, концентрируясь ближе к центру, а молодое — концентрируется в диск, толщина которого в десятки раз меньше радиуса. Поэтому на больших расстояниях от центра преобладает излучение звезд диска, а вблизи центра — излучение сферической подсистемы. Получается некое утолщение диска в его центре. Советский ученый Б.В.Кукаркин выделил в Галактике три подсистемы: плоскую, промежуточную и сферическую, различающиеся по степени сосредоточенности звезд в плоскости Галактики. Он показал, что звезды с одинаковыми физическими характеристиками одинаково распределены в пространстве. Вблизи Солнца пространственные скорости звезд различны по величине и направлению. Относительно Солнца они составляют 20–30 км/с.

Галактический год — период вращения Солнца вокруг центра Галактики. Участвуя в общем движении Галактики, Солнце движется со скоростью 240 км/с и делает полный оборот вокруг центра за 230 млн лет. Направляя радиотелескоп в разные участки Млечного Пути, ученые изучили распределение водорода в пространстве облаков, линия водорода на $\lambda = 21 \text{ см}$ оказалась расщепленной. Так установили спиральные рукава, вдоль которых образуются молодые звезды.

Лучевые скорости звезд определяют по смещению спектральных линий. Сравнение фотографий звезд, сделанных через достаточно большие интервалы времени, дает наличие двух составляющих — лучевой (по направлению к наблюдателю) и тангенциальной, которые представляют пространственную скорость. Если лучевую составляющую определяют по эффекту Доплера, то для определения тангенциальной составляющей нужно знать и расстояние до звезды. Звезды гало и диска Галактики различны и по своим пространственным скоростям — у звезд гало скорости в 4–5 раз больше.

Отличия химического состава (различное содержание тяжелых элементов) звезд гало и диска позволили выстроить последовательность жизни звезд. Предполагают, что Галактика как система звезд образовалась примерно 13 млрд лет назад. На «догалактической» стадии развития вещество Вселенной не содержало никаких элементов, кроме водорода (3/4) и гелия (1/4). Гравитационные силы сжимали облако, и возникли первые неоднородности, среди которых выделились области с большой плотностью и в которых начался процесс звездообразования. Возникли и первые скопления звезд. Появились шаровые и рассеянные скопления, в них сформировалось некоторое количество звезд классов *O* и *B*. Они «сгорели» за 1 млрд лет, закончив свою эволюцию вспышкой сверхновой.

14.3. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА И ЗВЕЗД. СТРОЕНИЕ ТИПИЧНОЙ ЗВЕЗДЫ

Солнце — рядовая звезда нашей Галактики. Это — горячий шар из плазмы. Долгое время его считали твердым шаром, и даже пригодным для жизни. Для Земли Солнце является ближайшей звездой, источником жизни. Его возраст оценивается в 5 млрд лет, как и у всех тел солнечной системы. Среднее расстояние от Земли до Солнца 149,6 млн км или 1 а.е. Поскольку Земля вращается, как и другие планеты, по эллиптической орбите, ее расстояние зимой меньше на 2,5 млн км, а в июле — на столько же дальше. Радиус Солнца 696600 км, масса $1,99 \cdot 10^{30}$ кг, средняя плотность $1,41 \text{ кг/м}^3$. Полное количество энергии, излучаемой Солнцем, составляет $3,86 \cdot 10^{40}$ Дж/с или $3,86 \cdot 10^{20}$ МВт, из которой до Земли доходит только одна двухмиллиардная часть. Эффективная температура Солнца равна 5806 К, оно относится к *спектральному классу желтых карликов*.

Современная структура Солнца возникла в результате звездной эволюции (рис.21). Наблюдаемые слои Солнца называют его *атмосферой*. Наблюдаемое излучение Солнца возникает в его тонком (порядка 700 км) внешнем слое — *фотосфере*. Фотосфера — самая глубокая часть, и чем глубже, тем ее слои горячее. Во внешних, более холодных слоях фотосферы происходит частичное поглощение света — на фоне непрерывного спектра образуются темные фраунгоферовы линии. В телескоп можно наблюдать зернистость фотосферы. Маленькие светлые пятнышки — *гранулы* (размером до 700 км) окружены темными промежутками. Это происходящая во внутренних областях конвекция вызывает движения в фотосфере — в гранулах горячий газ вырывается наружу, а между ними — опускается. Эти движения распространяются и в более высокие слои атмосферы Солнца — *хромосферу* и *корону*.

Более тяжелыми элементами обогатили межзвездную среду оболочки взрывающихся звезд. Первые поколения звезд содержат элементы более тяжелые, условно их называют металлами, и «металличность» звезды часто характеризуют величиной:

$$(\text{Fe}/\text{H}) = \ln(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\text{звезда}} - \ln(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\text{Солнце}},$$

где N_{Fe} , N_{H} — число атомов железа и водорода соответственно.

Появление тяжелых элементов говорит о том, что прежде чем попасть в эти звезды, первичное вещество подверглось каким-то ядерным превращениям и обогатилось тяжелыми элементами. Большинство звезд имеют малую массу, которой недостаточно для выработки тяжелых металлов путем термоядерных реакций. Такие звезды, как наше Солнце, способны только превращать водород в гелий, поэтому их химический состав не меняется и соответствует тем химическим элементам, из которых они образовывались. Тот факт, что молодые звезды гораздо богаче металлами, чем старые (у Солнца металлы составляют 2–3% массы), и что межзвездная среда имеет близкий процент содержания металлов, говорит о том, что звезды генетически связаны с межзвездным газом.

Поэтому они горячее, чем верхняя часть фотосферы (4500 К). Хромосферу можно наблюдать во время затмений. Видны спикулы — язычки из уплотненного газа. Изучение спектров хромосферы показывает ее неоднородность, перемешивание газа происходит интенсивно, и температура хромосферы достигает 10000 К. Над хромосферой располагается самая разреженная часть солнечной атмосферы — корона, она все время колеблется с периодом в 5 минут. Плотность и давление быстро нарастают внутрь, где газ сильно сжат. Давление превышает сотни миллиардов атмосфер, а плотности до $1,5 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$. Температура тоже сильно возрастает, достигая 15 млн К (рис.20).

Магнитные поля играют на Солнце существенную роль, так как газ находится в состоянии плазмы. При возрастании напряженности поля растет *солнечная активность* во всех слоях его атмосферы. Проявлением солнечной активности являются *вспышки*, в годы максимума их бывает до 10 за сутки. Вспышки размерами около 1000 км и длительностью порядка 10 мин, обычно возникают в нейтральных областях между пятнами, имеющими противоположную полярность. Во время вспышки выделяется энергия, равная энергии взрыва 1 млн мегатонных водородных бомб. Излучение в это время наблюдается и в радиодиапазоне, и в рентгеновском. Появляются энергичные частицы — протоны, электроны и другие ядра, составляющие *солнечные космические лучи*.

Солнечные пятна перемещаются по диску; заметив это, Галилей заключил, что оно вращается вокруг своей оси. Наблюдения за пятнами показали, что Солнце вращается слоями: около экватора период около 25 сут., а у полюсов — 33 сут. Число пятен на Солнце колеблется в течение 11 лет от наибольшего к наименьшему. За меру этой пятно-

образующей деятельности принимают так называемые *числа Вольфа*: $W = 10g + f$, здесь g — число групп пятен, f — общее число пятен на диске. При отсутствии пятен $W = 0$, при 1 пятне — $W = 11$. В среднем пятно живет почти месяц, размеры их порядка сотен км. Пятна обычно сопровождаются группой светлых полосок — *факелов*. Оказалось, что в области пятен имеют место сильные магнитные поля (до 4000 эрстед). Наблюдаемые на диске волокна названы *протуберанцами*. Это массы более плотного и холодного газа, поднимающиеся над хромосферой на сотни и даже тысячи километров.

От Солнца исходит и *интенсивное радиоизлучение*. *Рентгеновое излучение* исходит от верхних слоев хромосферы и короны. Кроме того, Солнце излучает потоки частиц — *корпускул*. Солнечные корпускулярные потоки оказывают большое воздействие на верхние слои атмосферы нашей планеты.

Термоядерными реакциями синтеза гелия из водорода объяснил энергию звезд английский астрофизик Эддингтон (1920 г.), известный своими работами по теории гравитации и квантовой теории, обнаруживший экспериментально отклонение света звезды в поле тяготения Солнца (1919 г.), предсказанное *ОТО*. В книге «Звезды и атомы» (1927 г.) он показал, что масса ядра гелия не точно в четыре раза превышает массу ядра водорода, а несколько меньше. Если к незначительной разнице масс применить формулу Эйнштейна $E = mc^2$, то окажется, что этот *дефект массы* эквивалентен огромной энергии. Тогда выводы Эддингтона вызвали сомнения среди ученых.

Реакция синтеза ядер гелия из водорода возможна при условиях, которые реализуются в центральной части Солнца, где температура достигает 10–13 млн К. Атомы теряют свои электронные оболочки, но этого недостаточно для преодоления силы кулоновского отталкивания между ядрами. Протон предохранен от взаимодействия с другим протоном потенциальным энергетическим барьером в 140 кэВ. Тепловая энергия протона при 10 млн К составляет всего 1 кэВ, а суммарная энергия сталкивающихся протонов вдвое больше. Это значит, что потенциальный барьер превышает в 100 раз среднюю энергию частиц. Необходимо, чтобы частицы смогли сблизиться на расстояние, меньшее 10^{-15} м, т.е. попасть в область сильного взаимодействия. С точки зрения классической механики этот барьер непреодолим, но в законах квантовой механики всегда существует определенная вероятность преодоления. Это так называемый *туннельный эффект*. Протон должен успеть столкнуться с другим протоном, преодолеть барьер, окружающий его ядро, превратиться в нейтрон, и произойдет рождение тяжелого водорода — дейтерия. Так начнется термоядерная реакция, являющаяся, по современным представлениям, источником энергии звезд. При условиях, типичных для недр звезд типа Солнца, возможны реакции двух типов.

Протон-протонный цикл ядерных реакций разработал американский физик-теоретик Г.Бете (1939 г.). Ядро тяжелого водорода — дейтерия, соединяясь сначала с протоном, образует ядро изотопа гелия. Последняя реакция этого цикла состоит в слиянии ядер легкого гелия и освобождении двух протонов. Этот цикл обеспечивает выход энергии 19,78 МэВ и может идти при температурах порядка

13 млн К. Расчет показывает, что для обеспечения наблюдаемой светимости Солнца достаточно, чтобы выделение энергии происходило лишь в 0,1 его массы. На Солнце этот цикл эффективнее второго цикла, типичного для более тяжелых звезд.

Азотно-углеродный цикл состоит из шести реакций. Бете открыл его, независимо от физика и астрофизика К. фон Вейцеккера. Этот цикл требует температур порядка 20 млн К. Углерод играет в нем роль катализатора реакций, и его количество остается неизменным. Реакции этого цикла тоже происходят на Солнце, но идут медленно. Два протона не образуют связанной системы (нет изотопа He^2). При столкновении один из протонов превращается в нейтрон с излучением позитрона и нейтрино. За большие научные заслуги в области звездной энергетики Бете стал лауреатом Нобелевской премии по физике за 1967 г.

Количество освобожденной энергии оценивалось по формуле Эйнштейна $E = mc^2$. Дефект массы для слияния четырех протонов и образования ядра атома гелия (альфа-частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов) составляет 0,02863 а.е. Соответствующая ему энергия излучается, что дает энергию $E = 4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж. Поскольку Солнце излучает энергию $L = 3,86 \cdot 10^{26}$ Дж/с, то из отношения (L/E) , примерно равного 10^{38} , можно заключить, что в недрах Солнца за 1 с образуется около 10^{38} ядер гелия. Но тогда должно образовываться вдвое больше нейтрино.

Обнаружение нейтрино — этих неуловимых частиц — подтвердило осуществимость таких реакций на Солнце. Оценки показывают, что длина пробега нейтрино порядка 10^{15} м. Это в сотни раз превышает размеры всей солнечной системы, а на расстоянии 150 млн км от Земли до Солнца поток нейтрино должен бы составлять 65 млрд на квадратный сантиметр в 1 с.

Для регистрации нейтрино предложено много методов, строятся специальные установки, но точных результатов по их обнаружению пока нет. То, что нейтрино не удавалось уловить, создало проблему «солнечного кризиса». Выход был найден в резком перемешивании солнечного вещества, которое происходит периодически. Дело в том, что центральные части Солнца должны вращаться быстрее, чем поверхностные. Поэтому в область, где происходят термоядерные реакции, втягиваются слои плазмы с повышенным содержанием изотопа He^3 , что расширяет область реакции и замедляет ее ход. Накопление вращательного момента, вызывающего эти процессы, продолжается 10 млн лет. Потом происходит передача избытка его центральным областям звезды, и все повторяется. При перемешивании светимость уменьшается, поток нейтрино ослабевает. Возможно, с этим связаны причины оледенений на Земле.

Внутренние области Солнца, где должны происходить термоядерные реакции, изучал Эддингтон, и строил их модели. Он считал, что звезды — это шары из газа в состоянии плазмы, находящиеся в состоянии *лучистого равновесия*. Эддингтон определил «время жизни» Солнца, температуру его недр, вычислил предельные массы звезд, обеспечивающие их устойчивость. В 1924 г. он установил связь между массой и светимостью звезд, подсчитал, что силу тяготения должна уравновешивать направленная наружу сила, которая могла возникнуть благодаря стрем-

лению газа расширяться под действием высокой температуры. Исходя из значений для массы Солнца и его размеров, Эддингтон получил значение температуры в центре газового шара 15 млн градусов.

Активная область, где идут термоядерные реакции, занимает центральную шаровую зону с радиусом 230 тыс. км. Эту область окружает *зона лучистого переноса* энергии протяженностью 280 тыс. км, в которой температура достигает 5 млн К, поэтому в ней не могут происходить термоядерные реакции: атомы здесь не полностью ионизованы, поглощение гамма-излучения переводит какие-то их электроны на более высокие орбиты, а возвращаются они уже в несколько ступеней, т.е. испускаются кванты меньших энергий.

Зону лучистого переноса окружает *зона конвекции*, в которой энергия переносится к поверхности путем конвекционного движения солнечной плазмы. Скорости конвекционных движений невелики, порядка 100–500 м/с, но эти подфотосферные слои порождают *солнечную активность*.

Теория зоны конвекции описывает не только состояние солнечного вещества в ней, но и строение звезд на ранних этапах их эволюции (до выхода на Главную последовательность), и строение ядер массивных звезд. В зоне

конвекции дробление квантов резко ослабевает, лишь малая часть энергии уносится в инфракрасной и радиообласти спектра. Конвекционная зона — источник энергии, обеспечивающий нагревание *солнечной короны и хромосферы*. КПД переноса энергии в солнечную корону всего 0,01. Газ короны непрерывно истекает в межпланетное пространство, где дует сильный солнечный ветер, сметающий микрометеорные частицы и испаряющиеся из атмосфер планет газы, формирует планетные хвосты. На расстоянии земной орбиты скорость *солнечного ветра* составляет около 400 км/с, а Солнце теряет 0,01 своей массы за 5 млрд лет (или 4,3 млн т за 1 с).

У голубых звезд и белых гигантов и сверхгигантов радиус активной зоны составляет 0,2 радиуса звезды, конвекционная зона практически отсутствует, а весь остальной объем занимает зона лучистого переноса энергии. Красные гиганты имеют очень малое, радиусом до 0,001 радиуса звезды, изотермическое ядро, полностью состоящее из гелия, образовавшегося в прошлом из водорода. Поэтому термоядерные реакции идут уже не в ядре, а рядом с ним. Зона переноса излучения имеет небольшую относительную протяженность, а конвекционная зона занимает почти весь огромный объем этих звезд.

14.4. ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ. КОНЕЧНЫЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД И СОЛНЦА

Эволюционный путь звезды определяется ее массой, так как масса определяет количество горючего и с ее ростом увеличивается температура в центре звезды и интенсивность термоядерных реакций. У звезд относительно небольшой массы (до $30 M_{\odot}$) от массы сильно зависит светимость L , она пропорциональна M^{γ} , где $\gamma = 3-5$. Время жизни T_s звезды пропорционально M/L , т.е. $M^{1-\gamma}$, и для $\gamma = 4$, например, получаем T_s пропорциональным M^{-3} . Отсюда следует, что если для Солнца T_c порядка 10^{10} лет, то у звезды в $2M_{\odot}$ $T_s = 10^9$ лет. Для очень массивных звезд светимость не столь высока, и она пропорциональна массе, т.е. время жизни почти не зависит от массы и равно 3–5 млн лет.

Если звезда имеет массу, близкую к M_{\odot} , то возможен переход звезды в кратковременную стадию — на несколько миллионов лет — *пульсаций* (стадия цефеиды), после чего звезда станет *белым карликом*. Предполагают, что наше Солнце через миллиарды лет тоже начнет расширяться, достигнет стадии *красного гиганта*, и, если к тому времени человечество не покинет солнечную систему (или не уничтожит себя раньше этого срока), его судьба будет предreshена. Красные гиганты типа Бетельгейзе и Антареса развились из звезд Главной последовательности и были массивнее Солнца. Возможно, большие звезды станут инфракрасными гигантами.

Оценим размер Солнца в стадии красного гиганта. По закону Стефана–Больцмана светимость L пропорциональна квадрату радиуса R^2 и T^4 . Значит, радиус R пропорционален $\sqrt{L/T^2}$. Подставляя численные значения, получаем радиус Солнца в эпоху красного гиганта:

$$R = R_{\odot} (T_{\odot}/T)^2 \sqrt{L/L_{\odot}} = 80 R_{\odot} = 0,37 \text{ а.е.}$$

Полученное значение показывает, что Солнце расширится до орбиты Меркурия (среднее расстояние 0,387 а.е.,

расстояние в перигелии — 0,31 а.е.) и поглотит только планету Меркурий.

Переменные звезды — это звезды, блеск которых меняется (беспорядочно или периодически). Они отличаются от звезд типа нашего Солнца, «жизнь» которых относительно стационарна. *Затменно-переменными* являются двойные звезды. Отмеченное более тысячи лет назад арабскими астрономами изменение блеска звезды бета Персея отражено в ее названии — Эль-Гуль, или «дьявол», что в Европе превратилось в Алголь. Причину колебаний ее блеска разгадал английский астроном-любитель Дж. Гудрайк, предположив «существование большого тела, вращающегося вокруг Алголя». Он же обнаружил (1784 г.) пульсации звезды дельта Цефея с периодом меньше 0,2 суток. Еще раньше Д. Фабрициус заметил новую яркую звезду в созвездии Кита, блеск которой менялся с периодом в 348 дней, и назвал ее Мирой («чудесная»). Такие долгопериодические переменные звезды — преимущественно звезды-гиганты «холодного» спектрального класса M . Впоследствии были обнаружены и классифицированы более 14 тыс. переменных звезд.

Физически переменные звезды на диаграмме «спектр — светимость» занимают широкую полосу в направлении от Главной последовательности в область *гигантов* и *сверхгигантов*. При переходе слева направо период пульсаций звезды обратно пропорционален корню квадратному из средней плотности звезды. А ведь чем дальше вправо к области сверхгигантов смещена звезда, тем больше ее радиус и меньше ее плотность! Итак, период пульсаций связан со всей структурой звезды. Вероятно, источником пульсаций в этих звездах служит энергия, высвобождающаяся в звездных недрах, которая способна преобразоваться в механическую за счет особенностей ее строения.

Цефеиды являются важным типом физически переменных звезд. Они названы по звезде дельта Цефея. Периоды блеска цефеид от нескольких часов до нескольких суток. Изучение спектров цефеид показывает, что вблизи максимального блеска звезда приближается к нам с наибольшей скоростью, а вблизи минимума — удаляется (эффект Доплера). Значит, цефеиды периодически сжимаются и расширяются, т.е. это *нестационарные пульсирующие звезды*.

Радиус цефеиды почти в 30 раз больше солнечного, и зона двукратной ионизации гелия, составляющая всего 1–2% от радиуса, при средней температуре в 40000 К и плотности $3 \cdot 10^{-8}$ г/см³ составляет 10^{-6} всей массы. Но именно эта, казалось бы, незначительная зона приводит к пульсациям, работая как поршневой двигатель: освобождение энергии при сжигании горючего (или приобретение энергии системой) происходит в момент максимального сжатия в цилиндре. В зоне ионизации He-II за счет поглощения энергии растет давление, газ расширяется и уменьшается плотность. Слой становится прозрачнее, запасенная в нем энергия начинает усиленно высвечиваться. При достижении наибольшего расширения внешние слои под действием тяготения начнут падать вниз, но равновесное положение «проскользнут», произойдет сжатие, и цикл повторится. Более детальный анализ показал, что пульсировать способны только звезды, в которых зона ионизации попадает в *резонанс* со всей звездой. Это возможно только для гигантов и сверхгигантов, а при движении вправо от них отстройка от резонанса приводит к неправильностям в блеске звезды. Возможно, многие звезды проходят подобные стадии эволюции.

Вспышки новых звезд (в нашей Галактике до сотни за год) происходят сравнительно часто, но видеть удается только одну-две из них. В последние годы установили, что новые — это тесные двойные системы, состоящие из звезды позднего класса и горячей звезды, окруженной оболочкой плотного газа. Эта двойственность — причина вспышки, причем вспыхивает звезда с меньшей массой. Перетягивание части массы к ней разогревает ее и приводит к взрыву. Термин «новые» ввел Тихо Браге, наблюдавший вспышку в 1572 г., и, хотя это название не из удачных, поскольку вспышка свидетельствует не о рождении, а о гибели звезды, оно сохранилось. К новым относят звезды, которые после вспышки возвращаются в свой прежний стабильный режим. Самой яркой была вспышка в 1975 г. в созвездии Лебедя, которая в течение 20 суток светила в 1 млн раз ярче обычного, но быстро и потеряла блеск.

До сих пор зарегистрировано около 170 новых звезд в нашей Галактике и около 200 — в галактике Андромеды.

Сверхновыми звездами стали называть уже по аналогии звезды, производящие наиболее мощные взрывы. Вспышка сверхновой наблюдалась китайскими астрономами еще в 1054 г. в созвездии Тельца, и сейчас остатки оболочки этой взорвавшейся звезды наблюдаются в виде Крабовидной туманности. Со временем она рассеется в пространстве, но при вспышках образуются изотопы многих элементов с массовыми числами, большими 60. Именно эти вспышки обогащают газопылевые комплексы тяжелыми элементами, поэтому в молодых звездах наблюдается более

высокое содержание тяжелых элементов, чем в старых. Вспышки сверхновых наблюдали примерно раз в 150–300 лет в каждой галактике.

В максимуме новая звезда достигает абсолютной звездной величины $M = -8$. Такая яркость длится всего несколько дней. Может случиться, что она за несколько месяцев вернет свои прежние характеристики, и в звездных просторах это не выгладит катастрофой, но через сто или тысячу лет она может вновь взорваться (как вулкан имеет склонность к повторным извержениям). В 1885 г. взорвалась Новая S Андромеды: будучи слабой звездочкой 7-й величины, она вдруг стала светить ярче звезды 6-й величины. С учетом расстояния до нее, она стала ярче всей галактики Андромеды, ее блеск достигал миллиона простых новых звезд, или в 10 млрд раз превышал блеск Солнца. Это была вспышка сверхновой звезды. Похоже, что в нашей Галактике за всю историю наблюдений вспыхивали кроме нее четыре сверхновые (1054, 1572, 1604, 1987), и, кроме того, найдены около десяти туманностей — остатков от вспышек сверхновых. Сверхновая SN 1987A была видна невооруженным глазом, она находится в большом Магеллановом облаке — спутнике нашей Галактики — на расстоянии в 160 тыс. св. лет. Ее наблюдали со всех крупнейших телескопов на Земле, а также рентгеновским телескопом на модуле «Квант» орбитальной станции «Мир».

Пульсарами назвали источники пульсирующего излучения, характер которого был не похож на известный ранее (типа цефеид). Радиоастрономы А.Хьюиш, С.Белл, И.Пилкингтон, П.Скотт и Р.Коллинз обнаружили на $\lambda = 3,68$ м необычные радиосигналы, длящиеся 0,3 с (1968). Сигналы с точностью до 10^{-8} с повторялись через 1,337 с в течение полугода, но амплитуда сигнала менялась. Такой характер сигнала напоминал передачи земных радиостанций, в которых на строго ритмичные высокочастотные сигналы накладываются колебания звуковой частоты.

К настоящему времени открыто уже более двухсот пульсаров. Регистрируя их излучение на различных, но близких частотах, удалось по запаздыванию сигнала на большей длине волны (при предположении о некоторой плотности плазмы в межзвездной среде) определить расстояние до них. Оказалось, что все пульсары находятся на расстояниях $100 \div 25000$ св. лет, т.е. принадлежат нашей Галактике, группируясь вблизи ее плоскости. Предполагают, что большинство открытых пульсаров находится в том же спиральном рукаве, что и Солнце. Пульсар NP 0531 в центре Крабовидной туманности отождествляли со звездой, которую считают остатком от вспышки сверхновой в 1054 г. С развитием рентгеновской астрономии было замечено, что основную долю энергии пульсары излучают в рентгеновском диапазоне, и возрастание периода излучения пульсаров со временем позволяет оценить их возраст. *Пульсирующий характер излучения* объясняют быстрым вращением звезды и наличием сильного магнитного поля с индукцией до 100 млн Тл. Если магнитная ось не совпадает с осью вращения, то образуется «магнитный конус», попав в который заряженная частица может ускориться до скоростей, близких к световым, излучая энергию в направлении своего движения. Возникает узконаправленный пучок нетеплового излучения, и этот радиоимпульс

регистрируется на Земле. Типичный пример пульсара — нейтронная звезда в Крабовидной туманности. Для пульсаров с периодом 0,5–2 с возраст составляет от 10^6 до $30 \cdot 10^6$ лет, т.е. это сравнительно молодые объекты Галактики. Но явление пульсара не связано с пульсациями нейтронных звезд. При плотности нейтронной звезды в 10^{15} г/см³ период пульсаций равен всего 0,001 с, что в сотни раз меньше наблюдаемых периодов у пульсаров. Поэтому была разработана модель вращающейся нейтронной звезды, у которой ось вращения не совпадает с магнитной.

В 1985 г. появилась гипотеза, что источник рентгеновского излучения Лебедь X-3 представляет собой *кварковую звезду*. В 1989 г. в центре взорвавшейся SN 1987A обнаружили пульсар со скоростью вращения до 2000 об./с, самый быстрый из известных, и также предположили, что он является кварковой звездой. Считается, что после такой вспышки остаток звезды должен превратиться в белого карлика и туманность.

Массы звезд определяют их конечные судьбы. Гипотезу о том, что возможно существование звезд огромной плотности, состоящих только из нейтронов, высказал Ландау еще в 1932 г., сразу же после открытия нейтрона. Через два года эту идею развили В.Бааде и Ф.Цвикки. Они показали, что такие звезды могут образовываться при взрывах сверхновых как конечная стадия эволюции массивных звезд. Если в ядре звезды образовались атомы железа, то оно будет продолжать сжиматься и разогреваться под действием сил гравитации. В таких условиях железо начнет распадаться на протоны и нейтроны, затем протоны при

взаимодействии с электронами превратятся в нейтроны. Так получится компактная звезда, состоящая из нейтронов. Снаружи *нейтронное ядро* будет обрамлять железная кора, имеющая температуру до 1 млн К. Размеры звезды примерно $12\text{--}15$ км при средней плотности 10^{18} кг/м³. При такой огромной плотности нейтронная жидкость является вырожденной и подчиняется принципу запрета Паули, препятствующему дальнейшему сжатию. В центре нейтронной жидкости возможна примесь кваркового вещества.

Гравитационный коллапс начнется, если же давление вырожденных нейтронов при вспышке сверхновой не сможет предотвратить дальнейшее сжатие ядра. Когда скорость убегания (или вторая космическая) станет равной скорости света, он неотвратим, и звезда станет *черной дырой*. Теория черных дыр, предсказанных ОТО, разработана достаточно подробно. Сейчас «подозреваемыми» объектами на черные дыры являются Лебедь X-1, Скорпион X-1, Стрелец А и др.

Итак, звезды эволюционируют, и эволюция их необратима. Грандиозные неравновесные процессы происходят в пульсирующих звездах — цефеидах. В недрах звезд происходят мощные термоядерные процессы, обеспечивающие выделение огромного количества энергии. В конечные этапы жизни звезд в них возникают некие упорядоченные состояния, которые не могут быть описаны классической физикой. В нейтронных звездах и белых карликах вещество переходит в новые квантовые состояния, которые ограничивают энергетические потери.

14.5. МНОГООБРАЗИЕ МИРА ГАЛАКТИК. СОДЕРЖАНИЕ И ЗНАЧЕНИЕ ЗАКОНА ХАББЛА

Мир галактик столь же разнообразен, как и мир звезд. Долгое время туманные пятнышки, наблюдаемые в телескопы, считали туманностями, относящимися к Галактике (воспринимаемой как вся Вселенная). Это — огромные вращающиеся системы звезд, разнообразные по внешнему виду и физическим характеристикам. Их размеры от 1 до 100 кпк. Они содержат от 10^7 до 10^{12} звезд. Небольшие галактики часто являются спутниками больших галактик. Невооруженным глазом можно увидеть ближайшие к нам галактики — Магеллановы Облака и Туманность Андромеды. Остальные галактики — только в телескоп, как пятнышки. Классификация галактик в каталогах — М с номером. Например, М31 — туманность Андромеды. Были и другие каталоги. Большой каталог, составленный в СССР в 60-е годы, содержит более 30000 галактик.

Галактики — газовые, пылевые, планетарные, спиральные и эллиптические. Отдельные звезды в галактиках стали различать только в 30-е годы. В 1923 г. Хаббл с помощью 2,5-метрового рефлектора открыл в спиральной туманности созвездия Андромеды несколько *переменных* звезд (т.е. с меняющимся блеском) и цефеиду. По оценке периода колебаний блеска цефеиды он определил ее звездную величину и расстояние до нее — 900 тыс. св. лет. Туманность М31 находится вне нашей Галактики. Поправка на поглощение излучения межзвездным газом увеличила это расстояние до 2,2 млн световых лет, что превышает более чем в 20 раз размеры нашей Галактики. Хаббл подсчитал число галактик до 20-й звездной величины

на 1283 участках неба. Он нашел, что на один квадратный градус на небесной сфере приходится в среднем 131 галактика. Небесная сфера содержит 41253 квадратных градуса, поэтому общее число галактик до 20-й звездной величины составляет 5,4 млн (звезды до 20-й величины можно наблюдать в 2,5-метровый телескоп Хаббла).

Плотность распределения галактик в пространстве была оценена. Хаббл считал, что галактики распределены почти равномерно по всем направлениям, хотя галактики образуют *скопления* и *группы*. Тесным является скопление из 40 тыс. галактик в созвездии Волосы Вероники (Северное полушарие), находящееся на расстоянии около 400 млн св. лет от нас и занимающее на небе участок почти в 12° . Большие галактики могут быть парными или образовывать большие группы. Малое и Большое Магеллановы Облака, Наша Галактика и Туманность Андромеды — основа Местной группы галактик. Иногда группы галактик столь тесные, что галактики как бы проникают друг в друга. Радиусы больших скоплений, содержащих до тысячи галактик, составляют до 1–4 Мпк или даже 10 Мпк. Такое скопление наблюдается в созвездии Девы. На расстоянии 15 Мпк от нас — оно и есть центр Местного сверхскопления галактик, куда входит и Местная группа галактик (рис.22). Размеры таких скоплений растут в связи с общим расширением Вселенной.

Галактики по внешнему виду на спиральные, эллиптические и неправильные разделил Хаббл. Его классификация отражает и существенные физические

различия между галактиками. *Эллиптические* галактики почти не содержат межзвездного газа, и там не происходит формирования новых звезд. Они состоят из старых звезд (возраста Солнца или старше). Вращение в них происходит с небольшими скоростями (менее 100 км/с), а равновесие поддерживается за счет хаотических передвижений звезд по радиально вытянутым орбитам. *Спиральные* галактики состоят из двух подсистем — дисковой и сферической. Сферическая часть напоминает эллиптическую галактику. Дисковая сжата и содержит много межзвездной пыли, газа и молодых звезд. Более молодые и яркие звезды сгруппированы в спиральные рукава. К таким галактикам относится наша Галактика и Туманность Андромеды. *Неправильные* галактики имеют небольшую массу и размер, в них много межзвездного газа. Заметны как очаги звездообразования какие-то клочки. Примером такой галактики является Магеллановы Облака.

Вид галактики на фотобумаге несколько отличен от ее вида на негативе и зависит от того, в каких лучах был снят. Коллектив Астрономического института при Московском университете во главе с Б.А.Воронцовым-Вельяминовым составил «Морфологический каталог галактик» (MGC) из 30000 галактик ярче 17-й звездной величины и атлас взаимодействующих галактик. Оказалось, что некоторые галактики отличаются мощным радиоизлучением, которое больше оптического. Их назвали *радиогалактиками* (например, Лебедь-А). Позднее стало ясно, что галактики не покоятся относительно расширяющегося недеформируемого фона, а имеют собственные движения, изучение которых позволит определить протяженность неоднородностей в распределении массы, а эти неоднородности очень велики и отражают сложные процессы начала расширения.

Лучевые скорости галактик первым определил Слайфер (1912 г.). К 1925 г. по эффекту Доплера он измерил скорости 41 галактики, из них 36 удалялись от нас со скоростями до 1000 км/с, и лишь несколько приближались, вернее, Солнце приближалось к ним. Хаббл измерил расстояния до галактик по цефеидам и ярким звездам и установил (1929 г.), что скорости «разбегания» галактик растут пропорционально расстоянию до них.

Закон Хаббла: $V = H r$, где H — постоянная, получившая название постоянной Хаббла ($H = 500$ км/(с Мпк)). В настоящее время H считают от 50 до 100 км/(с Мпк). С помощью красного смещения Хаббла оценивали расстояние до галактик и до края видимой Вселенной — Метагалактики. Поскольку увеличение красного смещения сопровождается уменьшением яркости галактики, то заключили, что закон $V = H r$ действительно отражает расширение Метагалактики. При $H = 50$ км/(с Мпк) и $\Delta\lambda/\lambda = 0,3$ получается $r = (c/H)(\Delta\lambda/\lambda) = 19,6 (\Delta\lambda/\lambda)$ млрд световых лет. Сейчас уже трудно представить сенсационность этого вывода о разбегании галактик.

Существование дискретного источника радиоизлучения в созвездии Лебедя впервые доказали в 1946 г. Дж.Хей, С.Парсонс и Дж.Филлипс (Англия). Впоследствии радиоисточники стали обозначать латинскими буквами после названия созвездия по мере убывания интенсивности по алфавиту. К 1950 г. был составлен *каталог радиоисточников* — всего 50. Через пять лет составили каталог, в

который включили 1936 подобных источников. Некоторые оказались ложными, некоторые отождествлялись с другими галактиками, часть из них принадлежала нашей Галактике (в ряде случаев это были остатки вспышек сверхновых), хотя первоначально источник Телец-А отождествляли с Крабовидной туманностью. Излучение некоторых оказалось *тепловым*, интенсивность которого зависела от типа галактики: спиральные и неправильные имели слабое радиоизлучение, светимость эллиптических в дециметровом диапазоне превышала его в сотни раз. Еще в сто раз ярче оказались эллиптические галактики с протяженной оболочкой.

Источник Лебедь-А имел *нетепловой* характер излучения, распределение его по частотам отличалось от закона Рэлея–Джинса. Сравнение оптического (в 5-метровый телескоп это была слабая, как бы сдвоенная, звездочка 18-й величины) и радиочастотного изображений показало, что мощность излучения в радиодиапазоне не только в полтора раза выше, но и больше в миллион раз, чем у обычной галактики. При этом мощное радиоизлучение идет от областей, отстоящих от самой галактики на 10 тыс. световых лет по обе стороны. Спектры излучения содержали сильные эмиссионные линии, которые могли образоваться в результате столкновения облаков газа, и в связи с этим решили, что имело место весьма редкое явление — столкновение двух галактик.

Механизм нетеплового радиоизлучения — *синхротронный*, его вызывают космические лучи, вернее, электроны высоких энергий, входящие в их состав, которые при движении в сильных магнитных полях генерируют радиоволны разных частот. Это излучение сильно поляризовано. Обычно это доказывает, что его излучение порождено тормозным излучением и что в хаотическом распределении магнитных полей есть выделенное направление. По измеренной интенсивности излучения можно найти плотности энергии заряженных частиц и напряженности магнитных полей. Так выяснили, что протяженные компоненты радиоизлучения — это намагниченные облака разреженного газа, насыщенные космическими лучами.

Развитие техники радиointерферометрии повысило разрешающую способность радиотелескопов, и выяснилось, что двойная структура источников — типичное явление. Из 500 радиогалактик 75% — двойные, а остальные представляют собой малую яркую область, окруженную оболочкой. Ближайшая радиогалактика NGC 5128 находится в созвездии Центавра и удалена от нас всего на 5 Мпк. На фотографиях видна широкая темная полоса поглощающей свет пылевой материи. Этот источник, как и Лебедь-А, состоит из двух компонент, расположенных за пределами оптической области. В самом центре можно выделить мощный почти точечный источник радиоизлучения.

Подобные ситуации стали наблюдать при сравнении картин неба в разных диапазонах длин волн. Такова галактика M82 в созвездии Большой Медведицы. Около 3 млн лет назад из нее было выброшено вещество объемом в 6 млн солнечных масс, и часть его получила скорости, близкие к световым. То есть произошел взрыв с выбросом энергии в 10^{65} Дж, эквивалентный одновременной вспышке 10 млн

сверхновых звезд. Для взрыва Лебедь-А выброс энергии оценивается в 10 тыс. раз больше. Такие огромные значения энергии, превышающие в несколько раз гравитационную энергию связи всех звезд в радиогалактике, имеют своим источником область галактического ядра, где генерируются релятивистские электроны.

Активные спиральные галактики с развитыми ядрами открыты американским астрономом К. Сейфертом (1943 г.). Он описал 12 таких галактик — *галактик Сейферта*. Диаметры ядер порядка 10 пк, а излучающие области занимают около 1/3. В их спектрах много эмиссионных линий водорода, гелия и распространенных тяжелых элементов, а в спектрах обычных галактик больше линий поглощения. Сейчас известно около ста таких объектов; мощность их меняется со временем, что указывает на происходящие там какие-то грандиозные процессы. В 1963 г. советский астроном Б.Е. Маркарян выделил 600 галактик с повышенной долей излучения в ультрафиолетовой области (*галактики Маркаряна*). В них много звезд горячих гигантов, и это как-то связано с активностью ядер галактик. Ядра этих галактик, как и галактик Сейферта, очень активны.

Активность ядер галактик Амбарцумян связывал со взрывами в их ядрах. По его теории (1955 г.), ядра активных галактик могут содержать также массы дозвездного вещества с неизвестными пока свойствами и источниками энергии. И.С. Шкловский считал, что ядра галактик — единые сильно намагниченные вращающиеся плазменные тела. Слои этих тел вращаются с разными скоростями, и магнитная энергия периодически скачкообразно превращается в энергию ускоренных заряженных частиц, отсюда и выбрасывание струй в направлении вращения. Сам он пишет так: «Возможно, что в центральных областях галактик реализуется какая-то гигантская, циклически работающая машина. После взрыва плазменного тела туда постепенно натекает газ из окружающей среды, что приводит к образованию нового плазменного тела. Все же многое, может быть, самое важное, остается загадочным и непонятным». Стало привычным отождествлять радиоисточники либо с туманностями, либо с галактиками. По оценкам, ожидали незначительные потоки радиоизлучения от самых близких звезд, но источники давали намного большие потоки.

В 1963 г. голландский астрофизик М. Шмидт исследовал спектр достаточно яркой звезды 13-й величины, отождествленной с радиоисточником 3С 273. Линии водорода были смещены на огромную величину, соответствующую скорости 42000 км/с, а по закону Хаббла расстояние до источника должно быть около 600 Мпк, или 2 млрд св. лет. Две другие линии совпадали с линиями дважды ионизованного кислорода и ионизованного магния. Затем нашли источник с красным смещением линий, т.е. он удалялся от нас. Так что если это смещение связано с эффектом Доплера, то первый источник приближался со скоростью 0,16 с = 48000 км/с, а второй удалялся со скоростью 0,8 с = 240000 км/с. При этом обнаружили, что рядом находится очень много объектов, которые движутся вместе, т.е. это *далекие галактики*. Тогда откуда такая яркость? Астрономы А.С. Шаров и Ю.Н. Ефремов сравнили старые фото-

графии этого объекта и оказалось, что объект сильно изменил свой блеск. Выходило, что галактика, состоящая из триллионов звезд, организует звезды, чтобы они синхронно меняли свой блеск?! Значит, излучали не звезды, а нечто иное, мощность которого соответствовала мощности ядер сейфертовских галактик. Зная расстояние до них и видимую звездную величину, можно подсчитать светимость — она фантастически большая: 10^{53} Дж/с. Эти космические объекты нового типа получили название квазизвезд, или *квазаров*.

Квазизвездных источников — квазаров — известно сейчас уже около тысячи. Внешне похожие на звезду, квазары излучали в сотни раз больше энергии, чем наша Галактика с ее почти 200 млрд звезд. Они занесены в каталоги, имеется статистика их свойств. Похоже, что в раннюю эпоху Вселенной квазаров было больше, почти все они излучают и в рентгеновском диапазоне, и тоже перемененно. Переменность потоков мощного излучения свидетельствует о том, что квазары должны быть невелики — около 10^{13} м. Они распределены почти равномерно по направлениям, но находятся на разных расстояниях. Свет от ближайшего к нам квазара идет 1 млрд лет, а от самого удаленного — 12 млрд лет, значит, мы видим их такими, какими они были от 1 до 12 млрд лет назад, тем самым прослеживая время образования этих необычных объектов до образования солнечной системы.

Спектр квазаров по распределению энергии соответствует синхротронному излучению: много излучают в ультрафиолете и мощное инфракрасное излучение в широкой полосе около 70 мкм. Излучение в рентгеновском диапазоне велико: для квазара 3С 273, например, оно в 50 раз больше по мощности излучения в радиодиапазоне и вдвое больше оптического. За время жизни (порядка 10^{6-7} лет) квазар излучает около 10^{67} Дж. Для обоснования источника такой огромной энергии предложено много вариантов, но пока ни один не может быть принят. Если это аннигиляция, то из связи энергии с массой такая энергии эквивалентна потере 5 млн солнечных масс (M_{\odot}), но известно, что состояние звезд с массой 100 M_{\odot} неустойчиво (притяжение верхних слоев не уравновешивается ростом давления с глубиной). Термоядерный источник в 140 раз менее эффективен, чем аннигиляционный. Может, равновесие поддерживается быстрым вращением массивной звезды вокруг оси, магнитными полями и вихревыми движениями в оболочке. В квазарах почти нет легких элементов. Считают, что они произошли от огромного взрыва в прошлом. Если это — образование типа «сверхзвезды», то равновесие в них поддерживается быстрым вращением вокруг оси, магнитными полями и вихревыми движениями в оболочке. Может быть, квазары похожи и на *N*-галактики с меньшей светимостью.

«Первичным источником энергии квазаров и активных ядер галактик должна быть энергия гравитационного взаимодействия центрального, компактного тела и падающей на него плазмы», — считал Шкловский. На снимках видны выбросы сгустков горячей плазмы, движущиеся с огромной скоростью (0,27 с, как у объекта SS 433) в противоположных направлениях от уплощенного газового диска, который образуется вокруг компактного объекта, воз-

можно, нейтронной звезды. После открытия квазаров, связанного с отождествления спектров слабых источников в разных диапазонах, такие исследования продолжались. Квазары были открыты из-за сильного свечения в ультрафиолете и слабого в других областях спектра, а астрофизик А.Сендидж заинтересовался голубыми звездами, излучающими в ультрафиолете, но не зарегистрированными в радиодиапазоне. Эти объекты удалялись от нас с большими скоростями. Их сначала называли «контрабандистами».

Квазаги — это квазизвездные удаляющиеся от нас объекты, излучающие тепловое излучение, сильное в

ультрафиолете, слабое в видимом диапазоне, но не излучающие в радиодиапазоне.

Черные дыры должны быть в ядрах гигантских эллиптических галактик, они появились в центре галактик в процессе эволюции. Так считают многие исследователи вслед за Зельдовичем и Новиковым. Черные дыры могут возникать разными способами, и их «питание» осуществляется за счет падения вещества — аккреции (лат. *accretio* «приращение»). Так современная всеволновая (от радио до гамма-диапазона длин волн) астрономия начинает подступать к изучению источников энергии Вселенной, но нестационарность мира галактик твердо установлена.

Глава 15. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕГАМИРЕ И ЗАРОЖДЕНИЕ СТРУКТУР

15.1. СЦЕНАРИЙ СТАЦИОНАРНОЙ ВСЕЛЕННОЙ И «КОСМОЛОГИЯ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»

Космология — наука о строении и эволюции Вселенной, она изучает свойства всей доступной для наблюдений Вселенной как целого. Создание крупных телескопов, развитие фотографической астрономии и всеволновой астрономии, спектроскопии и других методов позволили изучить распределение галактик в пространстве, их движения на огромных расстояниях (до 10^9 св. лет). Мы окружены огромным миром галактик и квазаров — понять это нельзя было без теории.

Общая теория относительности (ОТО) — математическая база современной космологии. Эйнштейн, обобщив закон тяготения Ньютона на случай сильных гравитационных полей, изменила представления о пространстве и времени. Тяготеющие массы искривляют вокруг себя пространство–время, а оно воздействует на материю. Эйнштейн, объединив гравитацию и геометрию Римана, получил из средней плотности массы во Вселенной «абсолютные размеры Вселенной». Но достаточно ли ОТО для понимания явлений мегамира — ведь его масштабы превышают лабораторные условия на Земле в 10^{26} раз?! Изучение ближайших к нам галактик показало, что они состоят из тех же объектов — звезд, звездных скоплений, туманностей. Наука не может обойтись без построения рабочих моделей, которые уточняются, заменяются частично или отбрасываются. Можно построить цепочку объектов мегамира: видимая Вселенная — галактика — Галактика — звезда — планета. Общие закономерности развития Вселенной строятся путем создания моделей.

Модель пустой Вселенной (1917 г.), в которой два объекта расположены на столь большом расстоянии, что можно пренебречь притяжением между ними, рассмотрел нидерландский астроном Виллем де Ситтер. Стационарность мира требовала, чтобы галактики удалялись друг от друга с ускорением. Фактически в его решении содержалось предсказание *расширения Вселенной*, но до открытия Хаббла это представлялась неким казусом. Величина, обратная постоянной Хаббла H , имеет размерность времени. Отсюда заключают, что за это время вещество галактик «разлетелось» из точки наблюдения, это время прошло с того момента, когда оно было сконцентрировано в точке. Наблюдаемые скорости разлета достигают 108 м/с,

поэтому в момент «начала» должен был произойти взрыв, породивший современную Вселенную. Поскольку тогда значение H считалось равным 500 км/(с Мпк), то это время не превышало 2 млрд лет (меньше даже возраста Земли). Это породило разные гипотезы: расширение Вселенной, изменение скорости света, или «старение» фотона на огромных расстояниях. Пусть само значение H не очень надежно, но линейный вид зависимости в законе Хаббла считается твердо установленным.

Взяв $H = 75$ км/(с Мпк) и считая, что «сегодняшнее» время жизни Вселенной t_0 приблизительно равно R_0/V_0 , подставим $V_0 = H_0 R_0$ из закона Хаббла и получим $t_0 = 13$ млрд лет. Учитывая приближенность такой оценки, следует отметить, что величина этого времени, которое называют возрастом Вселенной, колеблется от 10 до 20 млрд лет.

Фридман детально исследовал уравнения ОТО и показал, что теория Эйнштейна, как и теория Ньютона, допускает в качестве моделей и развивающиеся системы — *коллапсирующие*. Стабильная Вселенная Эйнштейна является нестабильной при малейшем возмущении. Фридман выделил три возможности, соответствующие трем моделям Вселенной: 1) $k = 0$; расширяющееся евклидово пространство; 2) $k > 0$; пульсирующая модель, пространство неевклидово (сферический мир); 3) $k < 0$; монотонно расширяющееся неевклидово пространство (гиперболический мир).

В первом случае при $\Lambda = 0$ уравнение, описывающее изменения масштабного фактора со временем имеет точное решение (модель Эйнштейна–де Ситтера). Начавшееся расширение продолжается неограниченно, и $H = 2/3t$, а возраст Вселенной равен $t_0 = 2/3H$. Параметр ускорения не меняется и положителен, потому что масштабный фактор растет со временем: $R = R_0 \exp(\Lambda/3ct)$. В этой стационарной Вселенной (модель Ф.Хойла) плотность, несмотря на расширение, поддерживается постоянной за счет непрерывного «творения» вещества из особого «энергетического поля».

Во втором случае при $\Lambda < 0$, т.е. при наличии дополнительной силы притяжения, кроме всемирного тяготения, и открытом искривленном пространстве в пульсирующей Вселенной, в некоторый момент масштабный фактор

становится равным нулю, и с $t = 0$ он начнет возрастать, достигнет максимума и снова уменьшится до нуля. Если выбрана закрытая модель пространства и Λ -член равен некоторой критической величине, определяемой плотностью вещества во Вселенной, то масштабный фактор растет от нуля до определенного максимума, достигаемого в далеком будущем. Если космологическая постоянная становится больше этого критического значения, то масштабный фактор растет, хотя и медленно, но неограниченно. В замкнутой Вселенной и при равенстве космологического члена своему критическому значению возможны два решения: стационарный мир Эйнштейна $R(t) = const$ и модель Эддингтона-Леметра, в которой $R(t) = R_1$ в бесконечно удаленном прошлом и неограниченно растет в будущем.

Выбор модели Вселенной определяется средней плотностью вещества во Вселенной. Если она больше критической, то $k > 0$, и мир замкнут. Для $H = 50$ км/(с Мпк) критическое значение плотности равно $5 \cdot 10^{-27}$ кг/м³. Это несколько больше средней плотности, размазанной по всему наблюдаемому объему (в пределах одного-двух порядков величины). Но мощный фон рентгеновского излучения свидетельствует, что межгалактическое пространство может быть заполнено водородом с $T \cong 10^6$ К. Возможно, существуют и еще какие-то массы во Вселенной, пока не обнаруженные.

Массы звездных скоплений оказались, по оценкам, несколько больше масс, наблюдаемых в скоплениях объектов, и возникла *проблема скрытой массы*. По опытным данным, на каждый протон приходится примерно 10^9 нейтрино, обладающих массой покоя $5 \cdot 10^{-35}$ кг (1980 г.). И это обилие нейтрино во Вселенной тоже приближает значение средней плотности к критическому значению. Поэтому осциллирующая модель может стать более вероятной, хотя она не сводится к простому повторению циклов «расширение — сжатие», как указывают Зельдович и Новиков.

Бельгийский аббат и ученый Ж.Леметр связал релятивистские модели с данными наблюдений: поскольку «разбегание» галактик соответствует расширению пространства, то при проектировании на прошлое должно быть уменьшение объема и увеличение плотности. Эти рассуждения связали с актом творения мира. Первоначальная плотность вещества, протоатома, достигала 10^{96} кг/м³, и это значение плотности определило границы применимости понятий пространства и времени. Поэтому не имеет смысла говорить ни о том, сколько длилась эта сингулярность, ни о том, что было до нее.

Расчеты Фридмана были многократно проверены и Эйнштейном, и Эддингтоном, и де Ситтером. Позже Эйнштейн, подчеркивая приоритет Фридмана, отметил: «Первым на этот путь вступил Фридман». О Фридмане справедливо говорят, что он «на кончике пера» открыл *разбегание галактик*. Открытие гравитационного красного смещения через несколько лет подтвердило догадки о нестационарном развитии, о расширении Вселенной. Вскоре теоретически было показано, что *своеобразие релятивистской космологии вовсе не связано с теорией Эйнштейна, а обусловлено космологической постановкой проблемы*. Из динамики Ньютона возможно получить необходимость

эволюции, как это и сделал в 1934 г. английский астрофизик Э.Милн.

Расширение Вселенной проявляется на уровне галактик, и не существует центра, от которого галактики «разбегаются». В общем случае постоянная Хаббла H зависит от времени, и скорость расширения убывает из-за тормозящего действия гравитации. Если допустить расширение Метагалактики и в прошлом, можно оценить ее возраст примерно в 13 млрд лет. Будущее Вселенной, по современным представлениям, зависит от средней плотности ρ .

Скорость расширения $dR/dt = (8\pi\rho G R^2/3 - k + \Lambda R^2/3)^{1/2}$ по ОТО для горячей модели. Здесь Λ — космологическая постоянная, учитывающая возможное существование в мире дополнительной силы, помимо силы тяготения, при $\Lambda > 0$, это сила отталкивания, при $\Lambda < 0$ — сила притяжения.

Расчеты предшествующей истории Космоса в больших моделях дают для начала расширения пространства (13–20 млрд лет назад) состояние с исключительно высокими плотностью материи и энергией излучения. В уравнении появляется математическая сингулярность, и ни одна из моделей не продвигается ранее этого момента. Так как при сжатии газа его температура возрастает, можно допустить, что в далеком прошлом Вселенная была очень горячей. Именно к такой модели «горячей Вселенной» пришел Гамов, назвав ее «*Космологией Большого Взрыва*». Его интересовала *относительная распространенность и происхождение химических элементов* во Вселенной. Чандрасекар, Бете, Вейцеккер и другие ученые считали, что в глубинах Солнца не могут образовываться элементы тяжелее гелия.

Гамов предположил, что в самом Начале при больших плотностях и температурах ранней Вселенной возможно протекание реакций синтеза элементов. По законам термодинамики при этих условиях в разогретом веществе всегда должно находиться в равновесии с ним и излучение. После нуклеосинтеза, занимающего несколько минут, излучение должно остаться, продолжить движение вместе с веществом в расширяющейся Вселенной и сохраниться до нашего времени, только его температура должна понизиться за это время из-за расширения. Эту схему необходимо было рассчитать и сравнить с ней распространенность элементов в современной Вселенной. Эта работа заняла 10 лет. Гамов консультировался с Э.Ферми и А.Туркевичем, но в 1948 г., когда вместе с Альфером была подготовлена его статья, он вписал в последний момент и Бете. Так появилась **знаменитая А-В-Г-теория**. Впоследствии она совершенствовалась в работах Гамова с С.Хаяши, Хойлом, Фаулером, М.Бербиджем, Дж.Бербиджем. Этим же занимался и Зельдович, а позже и Дж.Пиблс, используя уточненные данные ядерной физики и астрономических наблюдений.

Теория горячей Вселенной дала необходимые соотношения водорода и гелия в современной Вселенной из ядерных реакций в горячей ранней Вселенной. Тяжелые элементы должны были рождаться иначе, возможно, при вспышках сверхновых звезд. Предсказанное Гамовым *фооновое излучение* должно быть изотропным и иметь температуру, близкую к абсолютному нулю, до 10 К, если процесс нуклеосинтеза начинался с 109 К.

Существование фонового излучения было предсказано Гамовым в 1953 г. Он получил простое соотношение между плотностями вещества и излучения по мере расширения. Плотность излучения уменьшается со временем быстрее, чем плотность вещества, но в прошлом их отношение когда-то было равно единице, а еще раньше излучение по плотности преобладало над веществом. По этой причине излучению должна принадлежать ведущая роль в эволюции Вселенной. Фридман получил формулу изменения во времени плотности излучения, если оно преобладает во Вселенной над веществом, а Вселенная расширяется по параболическому типу, т.е. *неограниченно*. Эту формулу Фридмана и использовал Гамов. Он нашел границу между двумя эпохами — *преобладания излучения* и *преобладания вещества*, и эта граница приходится на время $t = 2,1 \cdot 10^{15} = 73$ млн лет. В начальный период именно излучение определяло судьбу Вселенной, а после преобладало вещество. В тот момент их плотности были равны $9,4 \cdot 10^{-23}$ кг/м³, а температура излучения составляла 320 К, отсюда можно найти и ее современное значение:

$$T = 320(2,2 \cdot 10^{15}/t) K = (7 \cdot 10^{16}/t) K.$$

Полученная формула дает температуру излучения в эпоху преобладания вещества над излучением (7 К). Для излучения черного тела такая температура соответствует сантиметровому диапазону. Гамов не надеялся зарегистрировать это фоновое излучение в общем потоке радиоизлучения галактик и межзвездного газа, но Новиков и Дорошкевич считали, что излучение, оставшееся от начала расширения Вселенной, можно обнаружить в сантиметровом диапазоне.

Открытие реликтового излучения произошло весной того же года. Американские ученые А.Пензиас и Р.Вильсон (лауреаты Нобелевской премии 1978 г.), отлаживая рупорную антенну нового радиотелескопа, не могли избавиться от помех на длине волны 7,35 см. Уровень этих помех не менялся при повороте антенны, т.е. был изотропен. В 1965 г.

выяснилось, что это было фоновое излучение, предсказанное Гамовым. Оно соответствовало расчетам Новикова и Дорошкевича, было «чернотельным» при $T = 2,7$ К. По своей плотности это излучение почти в 30 раз превосходило излучение звезд, а концентрация фотонов была больше, чем концентрация обычного вещества.

Плотность реликтового излучения можно оценить. При $T = 3$ К энергия 1 фотона — около 10^{-8} Дж, и для 500 фотонов в 1 см³ — $E = 50$ Дж/м³. По формуле $E = \rho c^2$ находим $\rho = 5 \cdot 10^{-31}$ кг/м³. Сейчас для вещества $\rho = 5 \cdot 10^{-28}$ кг/м³, т.е. по массе вещество больше в 1000 раз.

Две космологические теории конкурировали — *теория расширяющейся Вселенной* (начальное состояние, из которого возникла Вселенная, было таким горячим и плотным, что могли существовать только элементарные частицы и излучение; затем Вселенная расширялась и охлаждалась, образуя звезды и галактики) и *теория стационарной Вселенной* (Вселенная существовала всегда, наблюдаемое разрежение вещества компенсируется его непрерывным творением). Теория расширяющейся Вселенной одержала верх благодаря предсказанию, наблюдению и интерпретации космического фонового (реликтового) излучения. Оно не предсказывается и не может быть объяснено второй теорией.

Автор теории вечной стационарной Вселенной — Хойл вынужден был признать, что придется модернизировать теорию для объяснения реликтового излучения. В 1992 г. измерения ничтожно малых вариаций фонового излучения подтвердили еще одно из предсказаний теории расширяющейся Вселенной. Исследователи интерпретируют эту «рябь» как флуктуации плотности вещества и энергии на ранних стадиях эволюции Вселенной. Такая рябь может объяснить *скупивание вещества* под влиянием собственной гравитации, которое ведет к образованию звезд, галактик и более крупных структур, наблюдаемых в современной Вселенной. Космология Большого Взрыва Г.Гамова заняла прочное место в современной науке.

15.2. РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ ПО СОВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Однородное микроволновое излучение, оставшееся от ранних стадий развития Вселенной, пронизывает пространство, что подтверждают и точные исследования, проведенные со спутников. Для понимания явлений космологии привлекают идеи, опирающиеся на *физику элементарных частиц*. Физика элементарных частиц и ядерная физика сыграли большую роль при создании теорий и расширяющейся, и стационарной Вселенной. Особенно живительным для них оказался вклад Эйнштейна и Планка, которые в начале века сформулировали *физику абсолютно черного излучения*: поскольку на ранней стадии расширения должно быть равновесие между энергией и веществом, то энергия, выделившаяся при взрыве, должна иметь спектр черного излучения.

Теория синтеза химических элементов в звездах была необходима. К началу 30-х годов уже было известно, что большинство звезд состоят из водорода и гелия, но было неясно, откуда берется углерод. В 50-е годы Хойл предложил реакцию образования углерода из трех ядер гелия в специфических условиях центра звезды. Возможность

такой реакции подтвердил американский физик У.Фаулер на ускорителе высоких энергий, а Хойл и Солпитер подвели под эти эксперименты теоретические обоснования. К 1957 г. Фаулер, Хойл, Маргарет и Джеффри Бербидж разработали *теорию синтеза большинства химических элементов* в звездных недрах из водорода и гелия. Внутри звездных печей легкие элементы «сплавились» в тяжелые ядра, которые рассеялись в пространстве в результате взрыва сверхновых или смерти красных гигантов (каким через 5 млрд лет станет наше Солнце). Затем цикл повторится с образованием звезд следующего поколения.

Однако их теория не могла объяснить существование *трех легких элементов* — лития, бериллия и бора. Из-за своей неустойчивой природы эти элементы должны образовываться в газе низкой плотности и низких температур, и, первоначально присутствуя в молодых звездах, должны были распадаться при сжатии и нагревании звезды. Это оставалось загадкой. Хотя содержание каждого из них составляет менее 10^{-9} от количества водорода, уникальное происхождение этих элементов делает их «коммента-

торами» истории Вселенной. Подобные варианты схем рождения элементов создавались в нескольких местах, но они не были привязаны к существующим во Вселенной количественным соотношениям элементов.

Первичное вещество, из которого родилась Вселенная, Алфер и Герман назвали библейским словом *илем* (греч. *ylem* «первичная материя»). Эта первичная субстанция представляла собой *нейтронный газ*. Они считали, что в «первичном аду» родились тяжелые ядра путем присоединения свободных нейтронов, и этот процесс продолжался, пока запас свободных нейтронов не истощился. Алфер и Герман не могли объяснить образование элементов тяжелее гелия, поскольку нет стабильных изотопов с массовым числом 5 и 8, значит, нельзя получать тяжелые элементы последовательным добавлением нейтронов. После этого интерес к А-Б-Г-теории заметно остыл, и за десять лет (1953–1963) значительных исследований не было. Хойл назвал в шутку эту гипотезу «*the big bang theory*» — *теорией громкого хлопка*. Это понравилось конкурентам Хойла, а в России его перевели как «*теория Большого Взрыва*» (рис.23).

Простой расчет опубликовали еще до открытия реликтового излучения Хойл и Р.Тейлор (1964 г.). Светимость нашей Галактики оценивают числом 10^{47} Вт. Если возраст Галактики 10^{10} лет, то при постоянной светимости она выделила за это время $2 \cdot 10^{54}$ Дж. При образовании одного ядра гелия выделяется энергия $2,5 \cdot 10^{-19}$ Дж. Следовательно, за время существования Галактики в ней образовалось 10^{66} альфа-частиц. При массе частицы $6,67 \cdot 10^{-27}$ кг это составляет $7 \cdot 10^{39}$ кг, а масса Галактики — $4 \cdot 10^{41}$ кг. Поэтому к нашему времени отношение гелия к водороду He/H могло бы быть 7/400, или 1/57 — по массе, или 1/230 — по числу атомов. Это меньше наблюдаемого соотношения в 20 раз, так как из анализа состава звездных атмосфер, космических лучей получается He/H порядка 1/11. Уже из таких простых оценок понятно, как получать согласие модели с данными соотношениями.

Плотность материи во Вселенной ρ практически совпадает с плотностью реликтового излучения. Она выражена через энергию $\rho = E/c^2$, т.е. и температуру $E = \sigma T^4$. С другой стороны, $\rho = M/(4/3)\pi R^3$, $R = (9GMt^2/2)^{1/3}$ и $\rho = (5 \cdot 10^8/t^2)$ кг/м³. Отсюда ясна связь температуры T и времени, прошедшего от начала расширения: $T = 10^{10}/t^{1/2}$.

Сначала (при $t < 0,01$ с) температура очень высока, и вещество состоит из нейтронов и протонов в равных пропорциях. Благодаря присутствию электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино происходит непрерывное превращение $n + e^+ \leftrightarrow p + \nu$ и обратно, $p + e^- \leftrightarrow n + \bar{\nu}$. При охлаждении за первые 10 с число протонов увеличится за счет нейтронов, и начнется образование дейтерия, трития, изотопа гелия He-3 и He-4. Через 100 с от начала расширения заканчиваются все ядерные превращения: водорода получается 0,9, гелия — 0,09, остальное приходится на более тяжелые элементы. По весу водород составляет около 0,7, гелий — 0,3. Это и есть химический состав Вселенной к началу формирования звезд и галактик.

Для наглядности эту стадию делят на *четыре «эры»*. Для каждой из них можно выделить преобладающую форму существования материи, в соответствии с чем и даны названия.

Эра адронов — в самом начале, продолжается 0,0001 с. Плотность $d > 10^{14}$, $T > 10^{12}$ К, $t < 0,0001$ с. При высоких температурах могли существовать частицы только больших масс, для которых существенно и гравитационное взаимодействие. Элементарные частицы разделяют на адроны и лептоны, причем первые могут участвовать в сильных и быстрых взаимодействиях, а вторые — в более слабых и медленных, поэтому первые эры получили такие названия. Адронная эра — *эра тяжелых частиц и мезонов, велика энергия гамма-квантов*. Основную роль играет излучение, количества вещества и антивещества могут быть примерно равными. В конце адронной эры происходит аннигиляция частиц и античастиц, но остается некоторое количество протонов. Из равновесия с излучением вышли последовательно гипероны, нуклоны, K - и π -мезоны и их античастицы.

Эра лептонов продолжается $0,0001 < t < 10$ с, при этом 10^{10} К $< T < 10^{12}$ К; $10^7 < d < 10^{17}$ кг/м³. Основную роль играют легкие частицы, принимающие участие в реакциях между протонами и нейтронами. Постепенно из равновесия с излучением вышли мю-мезоны и их античастицы, электронные и мезонные нейтрино, а избыточные мюоны распались на электроны, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино. В конце эры лептонов происходит аннигиляция электронов и позитронов. Спустя 0,2 с Вселенная становится прозрачной для электронных нейтрино, и они перестают взаимодействовать с веществом. Согласно теории, эти реликтовые нейтрино сохранились до нашего времени, но температура их T до 2 К, поэтому пока их не могут обнаружить.

Фотонная эра приходит позже и продолжается 1 млн лет. Основная доля массы-энергии Вселенной приходится на фотоны, которые еще взаимодействуют с веществом. В первые 5 мин. эры происходили события, во многом определившие устройство нашего мира. В конце лептонной эры происходили взаимные превращения протонов и нейтронов друг в друга. К началу эры фотонов количества их были примерно равными. При уменьшении температуры протонов стало больше, поскольку реакции с образованием протонов оказывались энергетически более выгодными и, значит, более вероятными. Это определило скорости реакций, и к началу эры число нейтронов остановилось на 15%.

Эра излучения вначале характеризуется параметрами: 3000 К $< T < 10^{10}$ К; $10^{-18} < d < 10^7$ кг/м³, нейтроны захватываются протонами, и происходит образование ядер гелия. Кроме того, за эти первые минуты некоторое количество нейтронов пошло на образование ядер бериллия и лития, а некоторое количество распалось. В результате доля гелия в веществе могла составить 1/3. В конце эры температура снизилась до 3000 К, плотность уменьшилась на 5–6 порядков, в результате чего создались условия для образования первичных атомов. Излучение отделилось от вещества, Вселенная стала прозрачной для вещества, и пришла новая эра — эра вещества. Излучение играет главную роль, образуется гелий. В конце эры главную роль в образовании вещества Вселенной начинает играть вещество (масса Вселенной).

В звездную эру, наступившую при $t \cong 1$ млн лет, $T \cong 3000$ К, а плотность $d \cong 10^{-18}$ кг/м³, начинается сложный процесс образования протозвезд и протогалактик.

Эта грандиозная картина процессов, схематично описанная здесь, разрабатывалась детально, особенную проработку получили самые первые доли секунды. Возможности исследования деталей процессов резко возросли

с появлением быстродействующих ЭВМ с большими объемами памяти. Безусловно, эта картина повлияла на наше мироощущение и продолжает уточняться. Модель «горячего» начала объясняла происхождение химических элементов, их количественные соотношения сейчас, но образование крупномасштабных сгущений в пространстве или существование квазаров она не объясняла.

15.3. МОДЕЛЬ ИНФЛЯЦИОННОЙ ВСЕЛЕННОЙ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВО ВСЕЛЕННОЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Крупномасштабное сгущение галактик или **существование самих квазаров** не объясняла *теория горячей Вселенной*, успешно описывая многие явления во Вселенной. Еще Хаббл, изучая в 20–30-е годы распределение галактик с помощью мощнейшего тогда 100-дюймового телескопа, выявил тенденцию образования групп галактик. Было естественно предположить, что галактики, как и звезды, образуют *иерархические структуры*.

Пример: наша Галактика со спутниками Магеллановыми Облаками — Местная группа галактик (они + Туманность Андромеды + небольшие галактики) — Метагалактика (наблюдаемая Вселенная). Он отметил, что, если взять распределение ярких галактик, то оно неоднородно в очень больших угловых масштабах. Но при усреднении по областям определенных размеров распределение однородно. Так, вблизи галактических полюсов оно практически однородно. В пределах $10-40^\circ$ вообще не наблюдается ни одной галактики. Хаббл объяснил это поглощением межзвездного газа, сосредоточенным вдоль плоскости Галактики. Космическое фоновое излучение — не единственный ключ к разгадке ранней истории Вселенной. Но почему вещество сосредоточено неравномерно, в отдельных объектах, а не заполняет равномерно все пространство? Ведь в крупных масштабах усреднения она однородна. Здесь теории для самого большого и для самого малого вновь идут вместе. В теории физики элементарных частиц главный процесс — *нарушение симметрии*. Во Вселенной нарушение симметрии ведет к образованию *космических неоднородностей*.

Текстуры — это зародыши агрегатов вещества, неоднородности, появившиеся вскоре после образования Вселенной. Текстуры могли превращаться в ходе эволюции в галактики и их скопления. Они создают вариации плотности, и в этих областях *гравитация* более эффективно тормозит *общее расширение*. Если гравитация начнет преобладать над расширением, область начнет сжиматься, увеличивая флуктуации плотности. Ньютон был уверен, что самогравитирующие облака могут возникать самопроизвольно в равномерно распределенном веществе. Но в однородной космической среде сгустки образуются не так, как кристаллы в переохлажденной жидкости. Космологи считают, что флуктуации плотности в первоначальном огненном шаре, выросшие до современных структур, не могли образоваться самопроизвольно. Поэтому они должны быть с самого начала.

Вселенная очень неоднородна, что показывают обзоры крупномасштабного распределения галактик. Но она *однородна в больших масштабах* (больших сотен Мпк). Этот вывод получен из фонового излучения, содержащего информацию о свойствах Вселенной, очень далеко разнесенных

в пространстве. Эти свойства оказываются совершенно одинаковыми, хотя эти точки могут идти от самого горизонта, сейчас — с расстояния в 26 млрд св. лет (так как расстояние до горизонта 13 млрд св. лет). Галактики имеют тенденцию к сгущению, образуя *струи* и *сгущения*, которые окружают пустоты — *войды*. При этом можно ожидать, что видимое распределение окажется отличным от истинного распределения материи. Поэтому говорят, что вещество во Вселенной существует в форме *светящихся звезд, газовых облаков и темного вещества*. Об этом свидетельствуют и наблюдения орбитальных движений звезд и газа, а масса темного вещества в виде гало составляет до 10 масс видимого объекта. Это невидимое вещество можно оценить и по гравитационному воздействию. Природа темного вещества пока не выяснена, некоторые считают его холодным, но оно может сгущаться под влиянием гравитации с образованием объектов от галактик до сверхскоплений.

Но почему Вселенная однородна в одних масштабах и неоднородна в других, что же послужило началом расширения пространства Вселенной? В начальный момент в точке было огромное давление и температура. Давление нагретых газов вызывает интенсивное расширение — взрыв. Если взрыв происходит в воздухе, имеет место перепад давлений между горячим газом и воздухом, вызванный неоднородностью плотности расширяющегося газа. Но вещество Вселенной однородно, поэтому перепада давлений, подталкивающего к разлету, нет. Огромное давление в самом начале не может служить толчком к быстрому разлету. И наоборот, большое давление ведет, согласно ОТО, к дополнительному тяготению, т.е. даже замедляет расширение.

Эйнштейн ввел *силы гравитационного отталкивания*, описываемые фактором Λ . Модель пустой Вселенной де Ситтера допускает, что космологическая постоянная вызывает ускоренный разлет частиц вещества. Оценки показывают, что в самом начале расширения плотность вещества во Вселенной была близка к критической. Причину этого назвали *«проблемой критической плотности»*. В теории элементарных частиц получено, что при сверхбольших энергиях возможно существование *монополь, струн, стенок*. Этих образований во Вселенной сейчас нет — *«загадка монополей»*. Монополи — эти своеобразные частицы, которые в 10^{16} раз массивнее протонов, возникали в эпоху Великого объединения, но в процессе дальнейшей эволюции Вселенной они частично аннигилировали, но должны еще быть. Может, они входят в «скрытую массу» Вселенной, ведь ее плотность в 30 раз превосходит плотность обычной материи. *Современная теория вакуума*

признает существование разных вакуумов, зависящих от способа его получения. Вообще, вакуум — это состояние с минимальным значением энергии, ниже которого по энергиям уже нельзя опуститься. Если даже удалить все частицы и поля, остается состояние «кипения пустоты». Оказывается, вакуум в некоторых случаях может обладать положительной плотностью энергии, плотностью массы и отрицательным давлением (натяжением). Эти особые свойства вакуума и приводят к увеличению космологической постоянной, которая меняет ситуацию, вызывая гравитационное отталкивание.

Раздувание очень ранней Вселенной было сильным и очень кратковременным, по теории А.Гута и П.Сейнхардта. Поэтому нас будет интересовать состояние вакуума, полученного при резком охлаждении Вселенной. Раздувание должно происходить по экспоненте, если силы вакуума становятся преобладающими во Вселенной.

Силы «антигравитации» становятся больше гравитационных, и это служит *первоотлчком к расширению* с ускорением. В 70-е годы советские физики Д.А.Киржниц и А.Линде показали, что такие условия могут возникать во Вселенной при больших давлениях и резком снижении температуры от очень больших ее значений, превышающих температуру эпохи Великого объединения. Эффекты *квантовой гравитации*, по теории Линде, приводят к возможности *вакуумноподобных состояний*, когда существует гравитационное отталкивание. Такие состояния, согласно теориям сверхплотной материи, могут возникать по нескольким причинам. Плотности эти гигантские, соответствуют энергиям (почти планковским): 10^{19} ГэВ = 10^{32} К. Такую энергию частицы имели в момент, называемый планковским, порядка $3 \cdot 10^{-44}$ с. Можно вычислить, что в этот момент плотности материи $\rho = 10^{97}$ кг/м³, которая тоже носит название планковской. Таким образом в этот момент при условиях, близких к планковским, существовало вакуумноподобное состояние, приведшее к инфляционному раздуванию. Все локальные сгущивания в течение фазы раздувания, или *инфляции*, сильно расширились, микроскопические квантовые флуктуации превратились в макроскопические вариации плотности, из которой в будущем образовались структуры. Теория фазы инфляции основана на законах квантовой механики, но квантовые флуктуации настолько велики, что приходится подгонять ряд параметров модели.

Модель раздувающейся, или инфляционной, Вселенной точно совпадает с описанием наблюдаемого мира, начиная с 10^{-30} с после начала расширения. В раздувающейся Вселенной сначала была фаза инфляции (раздувания), когда диаметр Вселенной очень быстро увеличился — в 10^{50} раз больше, чем по модели Большого Взрыва. Последствия этого раздувания приводят к выводу, что наблюдаемая нами Вселенная — часть всей Вселенной. Модель предполагает, что Начало было 10–15 млрд лет назад из сингулярного (сверхгорячего и сверхплотного) состояния, расширение пространства продолжается. Эти модели объяснили и реликтовое излучение, и красное смещение в спектрах далеких галактик, и первоначальное содержание легких элементов. Используя данные о мире элементарных частиц, космологи теперь пытаются подобраться почти к самому Началу, к

моменту в 10^{-45} с после начала расширения. Приходится что-то предполагать о таком экзотическом состоянии, например, существование большого числа магнитных монополей (рис.24).

Модель инфляционной Вселенной позволяет уменьшить число таких «экзотических» частиц. Считается, что в указанные времена законы физики не менялись, состояние описывалось *квантовой гравитацией*. Вещество было равномерно и однородно. Это был горячий газ элементарных частиц, заполняющий все пространство и расширяющийся вместе с ним. Этот газ отличается от идеального. В 1970 г. расчет Хайвели показал, что водород был в металлической фазе, т.е. его кристаллизация привела к возникновению не только упорядоченной решетки, но и металла, свойства которого похожи на свойства металлического натрия. Открытие магнитного поля Юпитера наводило в то время на мысль об ядре этой планеты из металлического водорода. В таком состоянии водород мог раскалываться на фрагменты. Возможно, что после фазового перехода могли появиться молекулярные кристаллы. Подобные фрагменты с молекулярно-кристаллической структурой соответствуют по массе наиболее крупным спутникам Юпитера и Сатурна, а фрагменты, состоящие из металлического водорода, превосходят по массе Землю и на 1–2 порядка менее массивны, чем планеты-гиганты. Но изменения состояния вещества и излучения были много медленней, чем в исследуемые времена. Эта модель объясняет упомянутые события через 1 с после начала, позволяя предсказывать и другие явления, которые можно проверить.

Изотропность реликтового излучения или однородность наблюдаемой Вселенной в больших масштабах с трудом объясняет модель Большого Взрыва. Из-за конечности скорости света всегда существует *горизонт* — максимальное расстояние, на которое сигнал успел распространиться со времени начала расширения Вселенной. Расстояние между источниками реликтового излучения, находящимися в противоположных направлениях на небесной сфере, в 90 раз превышало расстояние до горизонта в момент излучения.

Спектр начальных неоднородностей задают для объяснения неоднородностей в малых масштабах. Это предположение введено для объяснения сгущивания вещества в галактики, скопления галактик, сверхскопления скоплений и т.д. Еще одно слабое место теории, как указывалось выше, — это плотность энергии во Вселенной. По ОТО, *тип кривизны пространства* определяется плотностью энергии: если она больше критической, определяемой темпом расширения, то пространство замкнуто, если меньше — незамкнуто, если равна — пространство плоское. Последний случай соответствует *неустойчивому состоянию*, которое никогда не меняется в идеальных условиях. Если вначале она была хоть немного отличной от критической, то это отклонение быстро росло бы со временем. По современным данным, значение отношения плотностей энергии, или параметра плотности, как говорят космологи, равно от 0,1 до 2. Чтобы попасть в этот диапазон значений параметра, вначале должно быть отличие от 1 с точностью до 10^{-15} с. Эти приближения закладывают в начальные условия стандартной модели Большого Взрыва.

Электромагнитные силы, порождаемые плазмой, играют более существенную роль в формировании Вселенной, чем гравитация, считает шведский астрофизик, лауреат Нобелевской премии за 1970 г., Х.Альфен. Межзвездное пространство заполнено длинными «нитеями» и другими структурами, состоящими из плазмы. Силы, которые понуждают плазму образовывать такие фигуры, заставляют ее образовывать также и галактики, звезды и звездные системы. Он считает, что Вселенная расширяется под влиянием энергии, которая выделяется при аннигиляции частиц и античастиц, но это расширение происходит несколько медленней. Некоторые идеи Альфена, родившиеся из экспериментов с мощными плазменными генераторами, подтвердились опытами на космических аппаратах в солнечной системе.

Космологические модели, основанные на идеях Альфена и данных о плазме, разрабатывает на суперкомпьютерах в Лос-Аламосе группа сотрудников под руководством Э.Ператта. Один из расчетов показал, как нитевидные структуры из плазмы могут дать равномерный микроволновый фон, открытие которого подтвердило модель Большого Взрыва. Есть расчеты, показывающие, как электромагнитные силы могут участвовать вместе с гравитацией в образовании галактик из облаков плазмы. При этом получаются все известные формы галактик без дополнительных предположений о существовании темного вещества, которое вводят в других моделях эволюции Вселенной.

Иначе истолковывает красное смещение и закон Хаббла американский астроном Х.Арп. Он называет соотношение Хаббла «единственным шатким предположением, лежащим в основе современной астрономии и космологии». Арп сообщает, что он наблюдал много объектов, которые не следуют закону Хаббла. Он считает, что квазары, обладающие наибольшим красным смещением, на самом деле находятся не на краю Вселенной, как следует из закона Хаббла, а не далее, чем все галактики, хотя их красное смещение много меньше. Ему даже кажется, что квазары могут быть «ответвлениями» галактик. Известна и гипотеза Дирака о *старении фотона* (еще с 30-х годов).

Идеи Великого объединения взаимодействий на основе симметрии, которая спонтанно может нарушаться, развивает современная теория элементарных частиц. В равновесном состоянии этих нарушений симметрии нет. Но при температурах порядка 10^{27} К возможны фазовые переходы среди барионов (протонов и нейтронов). Закон сохранения барионного числа исходит из стабильности протонов, поскольку время его жизни порядка 10^{31} лет, что известно из опытов. Из теорий Великого объединения известно, что барионное число сохраняется не точно. При высоких температурах закон нарушается, и этим объясняется зарядовая асимметрия нашей Вселенной. Наблюдаемый избыток вещества над антивеществом объясняется взаимодействием элементарных частиц при температурах чуть ниже критической температуры фазового перехода. При кристаллизации жидкости различные области — *домены* — могут кристаллизоваться с разным направлением осей. Домены растут, приходят в соприкосновение друг с другом, при этом энергетически выгодно совпадение осей на границах соприкосновения. Но это получается не всегда, и остаются «локальные дефекты». Точечным дефектам соответствуют магнитные монополи, а поверхностные — стенкам доменов.

Модель инфляционной Вселенной Алана Гута (1980 г.), детально анализирующая нарушение симметрии при фазовых переходах в столь необычных условиях, сумела уменьшить некий произвол с монополями. Андрей Линде из ФИАН им.Лебедева исправил некоторые допущения модели, сохранив ее достоинства. Впервые была сделана попытка разрешить одну из основных проблем мироздания — возникновение всего из ничего. Энергию Вселенной, которая сохраняется, разделили на гравитационную и негравитационную части, которые имеют разные знаки, и тогда полная энергия Вселенной равна нулю. Если предсказываемое теориями Великого объединения несохранение барионного числа подтвердится, то тогда ни один из законов сохранения не будет препятствовать рождению Вселенной из ничего. Пока же эти модели дают только возможный механизм, который можно на основе фантазии и знаний рассчитывать на ЭВМ.

Глава 16. КОНЦЕПЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

16.1. КОСМОГОНИЯ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Космогония изучает происхождение и развитие небесных объектов — галактик, звезд, Солнца и планет солнечной системы. Она использует данные астрономии, которые получают с помощью мощных телескопов в разных диапазонах электромагнитных волн; приборов, вынесенных за пределы земной атмосферы; экспериментальных данных, полученных космическими станциями и при непосредственном посещении небесных тел исследовательскими автоматическими аппаратами. Астрономия изучает небесные объекты, каждый из которых находится на разной стадии эволюции. Сопоставляя данные наблюдений с физическими процессами, которые происходят при различных условиях или могут происходить (теорети-

чески), ученые пытаются представить весь эволюционный путь объекта. В космическом пространстве основной силой является гравитация, и потому основные космогонические гипотезы исходят из теории тяготения. Космогония, как и космология, пользуется при объяснении полученных данных результатами и теориями всех естественных наук. Космогония планет существенно больше использует новых данных, полученных в связи с освоением космического пространства человеком.

Планеты — это большие небесные тела, которые движутся вокруг Солнца и светят отраженным солнечным светом. Массы всех планет составляют всего 0,002 массы Солнца. В телескоп планеты видны как небольшие диски,

а звезды только точками. Невооруженным глазом видны 5 планет как светящиеся точки из-за большой удаленности от Земли. Почти все планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении, как и почти все спутники вокруг своих планет. Почти все планеты имеют незначительные наклоны плоскости орбит к плоскости эклиптики и малые эксцентриситеты (кроме орбит Плутона и некоторых малых планет). Скорости и периоды обращения, массы планет и расстояния определяются по законам Кеплера. Расстояния планет до Солнца составляют некоторую прогрессию, определяемую эмпирическим правилом Тициуса–Боде. Правило это состоит в следующем: если к каждому члену ряда: 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96... прибавить по 4, то получим десятые доли средних расстояний планет от Солнца (Земле соответствует 10). Планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) имеют меньшую плотность и больший размер и вращаются вокруг своих осей быстрее, чем планеты земной группы. Кроме больших планет открыто несколько тысяч малых планет — астероидов, орбиты которых расположены в основном между орбитами Марса и Юпитера.

Идею эволюции ввел в науки о неживой природе французский зоолог Ж. граф Бюффон. Он считал, что материя, из которой возникли все планеты, была выброшена из недр Солнца ударом кометы. Небольшие куски солнечного вещества постепенно группировались в комки и охлаждались. Бюффон даже ставил опыты с раскаленными шарами и заключил, что Земле потребовалось бы для охлаждения примерно 75 тыс. лет. Его идеи вызвали первую *небулярную* гипотезу происхождения планет (лат. *nebula* «туман, облако»).

Вопрос о возрасте Земли и незаметных в короткие промежутки времени изменениях, которые могут накапливаться на больших временных интервалах поставил в 1754 г. И. Кант. Поскольку не наблюдается сглаживания рельефа на Земле, он искал причины, противодействующие стремлению к равновесию, и выделил *химические процессы внутри Земли*, действие которых иногда проявляется в землетрясениях и вулканической деятельности. Эти процессы связаны с теплом внутри планеты, а внутреннее тепло зависит от космических сил. Так в естественно-научных взглядах Канта соединились идеи Ньютона и Бюффона. В предисловии к своей книге «Общая естественная история и теория неба, или опыт об устройстве и механическом происхождении всего мироздания на основании ньютоновских принципов» (1755 г.) он написал: «Дайте мне материю, и я построю из нее мир!».

Солнечная система образовалась из космического облака, или «хаоса» — предложил Кант. Мировое пространство заполнено «инертной, бесформенной и неупорядоченной» материей, которая «стремится преобразоваться в более организованную путем естественного развития». Совокупное действие ньютоновского притяжения и сил отталкивания, которые ему пришлось ввести, привели Канта к мысли о возможности зарождения в хаосе круговых движений. Поэтому орбиты планет почти круговые. Образовавшись из сгущений, возникших в первичной туманности, планеты отдалялись от нее и от Солнца центробежной силой. Силу отталкивания он не определил, но привел пример отталкивания между кометными хвостами, состоя-

щими из разреженной материи. Кант не обошел вопрос о первотолчке. Он выделил роль химических сил, действующих между разреженными и разнородными элементами материи, полагая, что до образования плотной материи, в которой господствуют силы тяготения, основными были силы сцепления материи.

Считая, что Млечный Путь является проекцией на наш небесный свод, Кант искал причины, по которым «положение неподвижных звезд оказалось связанным с общей плоскостью». Млечный Путь для звезд он сравнил с Зодиаком для солнечной системы и искал однотипные процессы для объяснения. Ему удалось представить структуру Вселенной, которую не предполагал и Ньютон: *Вселенная есть иерархия самогравитирующих систем*. Не имея данных о массах и расстояниях в космосе, Кант считал, что все системы должны иметь сходную структуру и в первом приближении описываться как пары взаимодействующих тяготеющих масс. Он указал, что наблюдения, направляемые интуицией теоретиков, могут открыть более глубокие закономерности, управляющие Вселенной. Впоследствии небулярную гипотезу поддержали и развили У. Гершель и П. Лаплас. Исследуя галактические туманности, У. Гершель сформулировал гипотезу *об образовании звезд при медленном сгущении* рассеянной газовой материи, из которой состоят открытые им многочисленные неправильные галактические туманности.

Гипотезу об образовании солнечной системы Лаплас представил в своей книге «Изложение системы мира» (1796 г.). Он вообразил первичное Солнце звездой огромных размеров, превышающих радиус орбиты Юпитера. При медленном вращении этой материи происходили *охлаждение и конденсация*. По мере сжатия скорость вращения возрастала вследствие сохранения момента количества движения, тогда как центробежная сила в области экватора росла, и в этой области от первичного Солнца должно было отделиться газовое кольцо. Так, по Лапласу, из отделяющихся от первичного Солнца колец материи образовались планеты. Каждое кольцо разрывалось на несколько частей масс, конденсирующихся потом в планету. Спутники планет образовались из газовых колец, отделенных уже самими планетами. Лаплас оценил взаимные возмущения планет друг другом, которые накапливались в течение тысячелетий, это так называемые вековые возмущения, которые могут изменить историю солнечной системы. Анализ этих возмущений привел Лагранжа (1776 г.) и Лапласа (1784 г.) к «теореме об устойчивости солнечной системы». Это означало, что большие оси эллипсов орбит не меняются. Небулярная гипотеза Канта–Лапласа оставалась первой *ротационной* гипотезой о возникновении солнечной системы вплоть до конца XIX в. Однако она не объясняла больших размеров орбит внешних планет-гигантов и медленности вращения Солнца, не отвечала на вопрос, почему момент количества движения планет почти в 29 раз больше момента количества движения Солнца, если солнечная система изолирована. Последнее обстоятельство, казалось, требовало ввести в солнечную систему вмешательство какой-то внешней силы.

Катастрофические гипотезы появились в XX в. Джинс, автор одной из них, предположил, что какая-то

звезда прошла неподалеку от Солнца и вызвала некие «приливные выступы», принявшие форму газовых струй, из которых и возникли планеты. Поэтому орбиты образовавшихся планет были сначала сильно вытянутыми, но из-за огромного сопротивления пылевой среды между двумя звездами постепенно приближались к круговым. Недостатком гипотезы Джинса была уникальность образования планетной системы, так как близкое прохождение звезд столь редкое явление, что может случиться раз в 10^{17} лет. В 1935 г. Ресселл подсчитал момент количества движения приблизившейся к Солнцу звезды, он оказался на порядок меньше среднего момента количества движения планет по современным данным. Ему пришлось ввести еще одну гипотезу: Солнце в прошлом было двойной звездой, спутник Солнца вращался от него на расстоянии Урана или Нептуна, какая-то внешняя звезда столкнулась с ним, отбросила его за пределы солнечной системы и удалилась сама. Астроном и физик Н.Н.Парийский оценил возможности такого хода событий при разных скоростях сгустка, вырванного из Солнца, и оказалось, что только при скоростях от 400 до 500 км/с возможно получить орбиты для планет, но все они очень малы для нашей системы. Тем не менее, Джинс заложил основы теории *гравитационной неустойчивости*, которые дали ростки в последующих гипотезах.

Академик О.Ю.Шмидт, один из организаторов освоения Северного морского пути, отказался от изолированности солнечной системы и посчитал, что если «обратиться к ее движению в Галактике, то отпадет затруднение с моментом количества движения, так как Солнце могло захватить из Галактики материю, обладающую достаточным моментом». Считая, что на Землю падает примерно 1 т метеоритов за сутки, он вычислил, что для «вырастания» нашей планеты таким путем было необходимо около 7 млрд лет, тогда как согласно геологическим данным возраст земной коры составлял 3 млрд лет. Что же, кора может быть моложе внутренних областей планеты! При образовании планет из метеоритов, по гипотезе Шмидта, стало преобладать какое-то направление вращения, и все планеты начали двигаться в одну сторону. Кроме того, все орбиты становились симметричными по всем направлениям, их эксцентриситеты приближались к нулю, и орбиты становились почти круговыми (причем это сильнее сказывалось на более массивных планетах). Расчеты Шмидта показали уменьшение периода вращения Солнца до 20 суток, тогда как он равен сейчас 25 суткам, что считается хорошим результатом.

К процессам, происходящим внутри Солнца, обратился академик В.Г.Фесенков, один из основоположников астрофизики. Образование планет происходило во время перехода от одного типа ядерных реакций в глубинах Солнца к другому, что определялось температурными условиями. Условия равновесия требовали выброса массы Солнца, и этот выброс соответствовал расчетам английского астронома и математика Дж.Дарвина, сына Ч.Дарвина, и русского ученого математика и механика А.М.Ляпунова. Они рассчитали фигуры равновесия вращающейся жидкой несжимаемой массы. Гипотеза Фесенкова связала жизнь в солнечной системе в единое целое и избавила теорию планетообразования от внешних случайных факторов.

Выяснение природы планетарных туманностей, начатое Гершелем, имеет особое значение в планетной космогонии. Они возникают из отделившихся наружных оболочек красных гигантов, в то время как ядра этих звезд достаточно быстро, по космическим масштабам, превращаются в белые карлики. Эти чрезвычайно плотные маленькие звезды были известны давно, но только в последнюю четверть века стало ясно, как они «вызревают» внутри «нормальных» звезд при их эволюции.

Эволюцию разных моделей при разных начальных условиях рассчитывают теперь на ЭВМ. Расчеты показали, что начальная масса газопылевого комплекса, в котором образовалась Солнечная система, достигала $10 M_{\odot}$. Мы не знаем размеров и массы этого облака, считали от $0,3 M_{\odot}$, а верхние пределы определяли по-разному: Хойл — $4 M_{\odot}$, А.Камерон и М.Пайн — $2 M_{\odot}$.

При определенных значениях массы, плотности и температуры такой комплекс начинает сжиматься, возникающие неоднородности разрывают его на фрагменты, из которых при дальнейшем сжатии и образуются *протозвезды*. Солнце было Протозвездой около $5 \cdot 10^9$ лет назад. Центробежные силы выделяли экваториальную область, в ней возникали неустойчивые нестационарные потоки в газе и пыли, и часть этого вещества была оторвана от самого Солнца, унеся с собой избыточный момент количества движения. Так образовался *газопылевой диск* в экваториальной плоскости Солнца. Этот диск рос, и в нем возникали условия для рождения планет. Во вращающемся и сжимающемся фрагменте, потерявшем часть вещества на образование диска, увеличивалась температура, росло давление, что препятствовало дальнейшему сжатию. Во внешних слоях пошли бурные процессы, вызывающие огромные токи в ионизованном газе и сильные магнитные поля. Когда температура достигла 10^6 К, пошли термоядерные реакции, и «загорелось» наше Солнце. На этот процесс потребовалось почти 10^8 лет.

Протопланетное облако к этому времени представляло собой кольцо, в котором при уплотнении пылинки слипались между собой. Солнце нагревало внутреннюю часть этого кольца, вызывая испарение, выгоняя солнечным ветром более легкие элементы в более дальние части кольца, где они «замерзали» ($T = 50$ К). Так происходило образование двух групп планет. Планеты земной группы образовались примерно за те же 100 млн лет. В зависимости от расстояния до Солнца разные части туманности остывали с разной скоростью. Это привело к *неоднородности* протекания химических процессов, которая усиливалась давлением солнечного излучения и корпускулярной радиации Солнца. В разных частях облака возникали неоднородности, что потом отразилось на составе образовавшихся планет. Химическая эволюция протекала тоже по-разному: сначала конденсировались наиболее тугоплавкие элементы и их соединения, потом — летучие. Аккумуляция конденсатов в планеты и метеоритные тела началась еще до завершения процессов конденсации.

Агломерация твердых частиц и жидких капель в планетные тела связана, вероятно, с появлением первых конденсатов железа. Сгущение высокотемпературной фракции конденсатов вело к образованию ядер планет,

обогащенных железоникелевым сплавом. Вокруг них оседали магнезиально-силикатные породы, которые образовали *первичные мантии*. Поздние конденсаты — гидратированные силикаты, органические вещества и летучие соединения. Так формировались первичные *планеты земной группы*.

Происхождение регулярных спутников, вращающихся в направлении вращения планеты, объясняется по аналогии с образованием планет. Если же спутник вращается в другую сторону, то его происхождение связывают с захватом. Исследование образцов *лунного грунта* показало, что в период формирования Луна была разогрета до 1000 К. Видимо, это связано с падением на нее огромного числа метеоритов, что отражает и ее поверхность. Анализ структуры кристаллических пород приводит к выводу, что они когда-то были полностью расплавлены, а потом подверглись очень быстрому охлаждению. Присутствие базальтов свидетельствует об активной вулканической деятельности, которая почти прекратилась около $3 \cdot 10^9$ лет назад. Возраст пород находится в пределах $(3,23-4,65) \cdot 10^9$ лет, т.е. Луна образовалась почти одновременно с Землей.

В некотором смысле Галилей оказался провидцем, когда назвал обширные темные территории на Луне *морями*: когда-то лава вытекала через отверстия в коре и затоплила эти участки. Истечение лавы происходило почти 1 млрд лет, об этом стало известно из исследования лунных пород. Странно, что ее материал содержит сильно повышенное количество тугоплавких литофильных элементов и очень малое число летучих. Происхождение Луны весьма загадочно. Похоже, что она образовалась вблизи Солнца за счет самых ранних дометаллических конденсатов при высоких температурах. Странными оказались аномалии магнитного поля, которые сильно менялись от точки к точке. При изучении его со спутников было получено значение, которое меньше земного в 1000 раз.

16.2. СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ. ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОСФЕР

Земля участвует в двух движениях: *вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите*. Большая полуось орбиты $149,6 \cdot 10^6$ км принята за 1 астрономическую единицу расстояния (1 а.е.). Расстояние в перигелии (3 января) больше этого на $2,5 \cdot 10^6$ км, а в афелии (3 июля) — меньше на $2,5 \cdot 10^6$ км. Вращение Земли вокруг своей оси приводит к смене дня и ночи. *Осью* названа воображаемая линия, проходящая через центр Земли и одну неподвижную на небосводе звезду, называемую Полярной звездой. Ось Земли перпендикулярна экваториальной плоскости. Экватор делит Землю на Северное и Южное полушария. Точки пересечения оси Земли с поверхностью называются *полюсами*. Плоскость земного экватора *наклонена к плоскости орбиты* Земли вокруг Солнца на $23,5^\circ$ и перемещается параллельно самой себе, поэтому в одних участках орбиты земной шар наклонен к Солнцу Северным полушарием, а в других — Южным. Из-за этого происходит *смена времен года* и существуют климатические пояса.

В дни *равноденствий* (21 марта и 23 сентября) оба полюса Земли одинаково освещены, Солнце там видно лишь на горизонте. После 21 марта, принятого за начало астрономического года, область около Северного полюса более

Образование Луны — в нескольких гипотезах. Одна основана на теории Джинса и Ляпунова — Земля вращалась очень быстро и сбросила часть своего вещества. Другая — на захвате Землей пролетавшего небесного тела. Наиболее правдоподобна гипотеза столкновения Земли с планетой, примерно в половину меньше ее (типа Марса), происшедшего под большим, «скользящим» углом, в результате которого образовалось огромное кольцо из обломков (железное ядро Земли при этом не пострадало), что и составило основу для Луны (железа на Луне очень мало).

Планеты-гиганты образовывались дольше. За 10^8 лет сформировались их ядра, потом они аккумулировали газ окружающего пространства и образовали свои протяженные атмосферы. Начальные температуры планет-гигантов были высоки (у Юпитера — до 5000 К, у Сатурна — до 2000 К), что обеспечивалось распадом короткоживущих радиоактивных элементов и интенсивным падением метеоритов. Формирование более дальних планет шло еще медленнее. Сейчас обсуждается гипотеза об ином образовании планет внешней группы: они являются остывшими маленькими звездами, и остыли давно, вероятно, когда Солнце еще только начинало свою звездную жизнь.

О спутниках Юпитера и Сатурна обширные данные были получены с космических аппаратов «Пионер» и «Вояджер», которые передали на Землю великолепные изображения спутников, видимых с Земли слабыми пятнышками. В конце 80-х годов «Вояджер-2» провел аналогичное обследование и самых дальних объектов нашей солнечной системы. Более детально исследован спутник Юпитера Ио. Малые планеты и кометы считают образованными из вещества протопланетного облака, не вошедшего в планеты и их спутники. Существует гипотеза, что астероиды, кометы и метеориты — остатки рассыпавшейся в прошлом планеты Фэтон, расположенной между Марсом и Юпитером.

обращена к Солнцу, день увеличивается и устанавливается полярный день — Солнце не заходит за горизонт. В Северном полушарии — весна, у Южного полюса — полярная ночь, в Южном полушарии — осень. Границы полярных дня и ночи определены полярными кругами на $66,5^\circ$ соответственно северной и южной широты. В это время Солнце в полдень достигает своего самого высокого в Северном полушарии (низкого — в Южном) положения над горизонтом, и начинается лето (самый длинный день в Северном полушарии) и зима (самый короткий день — в Южном) — 21 июня. В этот день летнего *солнцестояния* Солнце находится в зените на тропике Рака ($23,5^\circ$ сев. широты). Далее в обратном порядке. Когда после 22 сентября в северном полушарии день станет меньше ночи, убывая до самого короткого 22 декабря (зимнее солнцестояние); в южном — после наступит лето, а в этот день Солнце будет в зените на тропике Козерога ($23,5^\circ$ юж. широты). Пояс между тропиками Рака и Козерога называют тропическим (жарким), там Солнце дважды в год проходит через зенит, а на самих тропиках — по разу за год. В умеренных поясах (между полярными кругами и тропиками) не бывает полярных дней и ночей, но и Солнце не бывает никогда в зените.

Наш первый космонавт Юрий Гагарин первым увидел Землю со стороны.

Суточное вращение Земли происходит почти с постоянной угловой скоростью, определяемой периодом в 23 ч. 56 мин 4,1 с, что равно одним звездным суткам. Ради удобства жизни поверхность разделили на 24 часовых пояса по меридианам (15° по долготе). *Среднее солнечное время* в часовом поясе названо поясным, в каждом соседнем часовом поясе оно отличается на 1 час. За начало выбран меридиан Гринвичской обсерватории около Лондона, отсчет ведется с запада на восток. Линия перемены дат — 12-й часовой пояс. Удлинение суток вызывает возникающая из-за *приливных сил* сила трения, замедляющая вращение Земли вокруг оси. На это впервые (1754 г.) указал Кант и даже попытался оценить такое замедление. Удлинение суток составляет 0,002 с за столетие, его можно обнаружить по рубцам на теле некоторых кораллов. Прирост меняется в течение года, каждому году соответствует своя полоска, как кольцам на срезе дерева. Изучая ископаемые кораллы, возраст которых составляет $4 \cdot 10^8$ лет, геологи обнаружили, что в те далекие времена год состоял из 400 суток, каждые сутки — из 22 часов. По окаменелостям более древних форм было установлено, что $2 \cdot 10^9$ лет назад сутки составляли всего 10 часов.

Форма Земли близка к шарообразной, но при детальном исследовании оказывается более сложной, даже если ее обрисовать поверхностью океана и мысленно продолжать эту поверхность под континентами. Неровности поверхности поддерживаются неравномерным распределением массы внутри земного тела. Эту форму назвали *геоидом*. О шаровидности ее сделал вывод еще в V в. до н.э. На основании того, что тень от Земли, падающая на Луну, имеет форму круга. Размер земного радиуса определил Эратосфен из Кирены в III в. до н.э. по отклонению Солнца от зенита в Александрии в день летнего солнцестояния. Поскольку в этот день Солнце было в зените в Сиене (Асуан), расположенном на расстоянии 5000 стадий (1 ст. — 157,8 м), а в Александрии отклонилось на $7,2^\circ$, он нашел, что длина окружности экватора 250000 стадий, т.е. 39,6 тыс. км, или радиус Земли равен 6278 км. Сейчас *радиус* считается равным 6378 км. На сплюснутость Земли у полюсов указывал Ньютон; обнаружение ее послужило одним из доказательств справедливости его закона тяготения (по теории Декарта, она должна быть больше похожа на яйцо).

Геоид — это почти эллипсоид вращения, его полярный радиус меньше экваториального на 21,4 км. Указанная разница связана с влиянием центробежной силы, возникающей из-за вращения Земли вокруг своей оси. Земля на 70% покрыта водой, 98% водной оболочки — это мировой океан, и только 30% — суша. В настоящее время форма Земли уточняется с использованием спутников. Величина сжатия $1/298,2$. Известно, что рельеф поверхности очень неровный: наибольшую высоту поверхности имеет гора Эверест в Гималаях, а наибольшая глубина под уровнем океана — 11,022 км (Марианский желоб в Тихом океане). Перепад — 20 км.

Геоферы — концентрические оболочки Земли, по которым рассматривать строение нашей планеты пред-

ложил австрийский геолог Э.Зюсс. Наша планета окружена обширной *атмосферой*. Атмосферное давление у поверхности равно 0,1 МПа.

Земная атмосфера очень изменилась за свою историю. Верхняя ее граница лежит на высоте более 2000 км. Граница эта нечеткая, так как газы постепенно рассеиваются в космическое пространство. Поскольку с высотой атмосфера становится все более разреженной, то основная ее масса сосредоточена в довольно узком слое: 50% массы находится между уровнем моря и высотой 5–6 км, 90% — до 16 км, 99% — до 30 км. Так что с высотой над поверхностью Земли не только убывает плотность, понижаются давление и температура воздуха, но меняются электрическое состояние и состав. Поэтому в ней выделяют несколько сфер: *тропосферу, стратосферу, мезосферу, ионосферу, экзосферу*. *Тропосфера* — нижний слой атмосферы, она простирается до 8–12 км, а в тропиках — до 16–18 км. В ней содержится почти весь водяной пар, поэтому в ней возникает облака, выпадают осадки, наблюдаются грозы. Примерно каждый километр происходит понижение температуры на 1° . Это связано с прозрачностью воздуха для солнечных лучей, поэтому нагрев идет только от земной поверхности. Верхняя граница следующей области — *стратосферы* — на высоте 50–55 км. В ней температура растет с высотой, хотя ниже нуля по Цельсию; находится озоновый слой и почти не водяного пара. Эти области разделены тонким слоем в несколько сот метров — *тропопаузой*. *Мезосфера* расположена выше и достигает высот в 80 км. Температура в ней вновь падает с высотой до -80°C ; образуются тонкие *серебристые* облака. Ионосфера (термосфера) расположена выше и достигает 800 км. Где-то около 100 км температура поднимается до 0°C , а при 150–200 км достигает 500°C и далее растет. Данные со спутников показали, что температура может колебаться на 100°C . Здесь газы находятся в ионизованном состоянии из-за действия ультрафиолетового и корпускулярного излучения Солнца. Ионизованный газ становится электропроводным, поэтому корпускулярное излучение Солнца под влиянием магнитного поля Земли отклоняется в сторону высоких широт, где наблюдается свечение — полярные сияния. Ионосфера влияет на распространение радиоволн, испытывающих отражение от ионизованных слоев. Самая верхняя часть атмосферы — *экзосфера* — сильно разреженная, но достаточно горячая.

Под атмосферой различают *гидросферу, земную кору, мантию Земли и ее ядро*. Твердую оболочку Земли называют *литосферой* (рис.25). Ее верхняя часть — это земная кора, достигающая 35–65 км на континентах и 6–8 км — под дном океанов. Под корой расположена *мантия*, а между этими слоями находится так называемый слой Мохоровичича. В этом слое скачкообразно возрастает скорость распространения сейсмических волн. На глубине 120–150 км под континентом и 60–400 км под океаном залегает слой мантии — *астеносфера* — область с очень низкой вязкостью. Земная кора растрескалась на части, и *литосферные плиты*, плавающие в *астеносфере*, медленно перемещаются относительно друг друга. Ниже астеносферы (с глубины 410 км) давление на минералы становится очень большим, плотность сильно увеличивается. Сейсмозащитка

показывает, что на глубине 2920 км плотность составляет 10080 кг/м³, тогда как до нее была — 5560 кг/м³. Начинается область *внешнего земного ядра*, внутри которого находится внутреннее ядро радиусом в 1250 км. Внешнее ядро — жидкое, так как через него не проходят поперечные волны. Кстати, с наличием жидкого ядра связывают существование магнитного поля Земли. Принято считать, что внутреннее ядро твердое. Возможно, что температура в центре достигает 10⁵ К, а у нижней границы мантии — не выше 5000 К.

Процесс образования каждой из планет солнечной системы имел свои особенности. Около 5 · 10⁹ лет на расстоянии 150 млн км от Солнца зародилась Земля. При падении на нее астероидоподобных тел вещество нагревалось и дробилось. Первичное вещество сжималось под действием тяготения, принимало форму шара, недра которого разогревались. Происходили процессы перемешивания, шли химические реакции, более легкие силикатные породы выдавливались из глубины на поверхность и образовывали земную кору, тяжелые — оставались внутри. Разогревание сопровождалось бурной вулканической деятельностью, при этом пары и газы вырывались наружу. У планет земной группы сначала не было атмосфер, как и сейчас на Меркурии и Луне. В процессе вулканической деятельности рождалась земная атмосфера, а водяные пары конденсировались в океанах.

Нептунической названа теория немецкого геолога и минералога А.Г.Вернера. Он исходил из того, что Земля была покрыта океаном («всемирный потоп»). Когда вода отступила, из осевших отложений минералов в воде в течение более миллиона лет образовались слои пород. Гипотеза Вернера была поддержана духовенством, повлияла на развитие геологии.

Плутонической названа теория шотландского геолога Дж.Геттона, представленная в книге «Теория Земли» (1795 г.). Он отказался от идеи о потопе и выдвинул версию о медленной эволюции Земли. Под действием ветра, воды, вулканов, землетрясений земная кора разрушалась, а продукты разрушения образовали слои на поверхности планеты. Тепло земных недр перемещало породы и формировало континенты. Профессор геологии Ч.Лайель поддерживал идею Геттона, считая, что геологические

явления вызваны природными факторами, действующими длительные промежутки времени, и что всюду природные факторы действуют одинаково. Лайель сформировал *геологию* как научную дисциплину, а его теория, получившая название теории «единообразных изменений», поддерживается современными учеными.

Возможно, что обилие воды на поверхности Земли (по сравнению с близкой по массе Венерой) вызвано именно тем колоссальным столкновением протопланет, которое привело к образованию Луны. Образование океанов не прекращается на Земле до сих пор, хотя уже не столь интенсивно. Обновляется *земная кора*, вулканы выбрасывают в *атмосферу* огромные количества углекислоты и водяных паров. Первичная атмосфера Земли была значительно более плотной и состояла в основном из СО₂. Резкое изменение состава атмосферы произошло примерно 2 млрд лет назад и связано с зарождением жизни. Растения каменноугольного периода в истории Земли поглощали большую часть СО₂ и насытили атмосферу О₂. Последние 200 млн лет состав земной атмосферы практически остается неизменным. Доказательством этого служат залежи каменного угля и мощные пласты отложений карбонатов в осадочных породах. Они содержат большое количество углерода, который ранее входил в состав земной атмосферы в виде СО₂ и СО. В образцах, относящихся к 3,5 млрд лет назад, содержится примерно 60% СО₂, а оставшиеся 40% — это соединения серы, аммиак, хлористый и сернистый водород. Совсем ничтожны содержания азота и инертных газов. Свободного кислорода тогда не было, поскольку обнаружены легко окисляемые вещества в неокисленном состоянии. Под действием солнечного света из водяного пара освобождалось ничтожное количество кислорода, но он окислял в атмосфере аммиак, сероводород, метан. Выделялся азот, который постепенно накапливался в атмосфере, примерно 600 млн лет назад доля кислорода достигла уже 1%, тогда появились и примитивные одноклеточные организмы. За 200 млн лет содержание кислорода быстро увеличивалось, так как зеленые растения этому способствовали. По словам Вернадского, «наша планета два миллиарда лет раньше или позже — это химически разные тела».

16.3. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ

История химических элементов, в течение которой сложились определенные пропорции количественных соотношений атомов, определила *развитие Земли*. Изучение земных недр имеет огромное и практическое значение. Основными источниками сведений о распространенности химических элементов служат данные о составе Солнца, полученные с помощью *спектрального анализа*, и результаты лабораторных химических анализов материала земной коры, метеоритов, пород поверхности Луны и планет. Принято выражать количество атомов какого-либо химического элемента по отношению к кремнию в разных природных системах, поскольку кремний принадлежит к обильным и труднолетучим элементам.

Распространенность элементов с ростом порядкового номера убывает неравномерно, причем элементы с

четным порядковым номером более распространены, чем с нечетным (в геологии этому соответствует *правило Гаркинса–Олдо*), особенно элементы с массовым числом, кратным 4, например, He, C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca. Ряд максимумов соответствует элементам с ядрами, у которых число протонов или нейтронов равно 2, 8, 20, 50, 82, 126. Этим «магическим» числам соответствуют заполненные ядерные оболочки, характеризующие устойчивые ядра. По этому поводу американские космохимики Г.Юри и Г.Зюсс сказали так: «Представляется, что распространенность элементов и их изотопов определяется ядерными свойствами и что окружающее нас вещество похоже на золу космического ядерного пожара, в котором оно было создано» (рис.26).

Большинство газов (или летучей части солнечного вещества) — H, He, CO, O, N, CO₂ и все инертные газы. Основную часть внутренних планет и метеоритов составляют *нелетучие элементы* солнечного вещества — Si, Fe, Vg, Ca, Al, Ni, Na. Детально сравнивая их, Виноградов показал (1962 г.), что эти *породообразующие элементы планет и метеоритов* выброшены Солнцем, а не захвачены из других областей Галактики. Некоторые различия в составе планет связаны с вторичными процессами и с тем, что элементы входят в разные соединения, пребывая в разных агрегатных состояниях. Особенно близок состав нелетучей части элементов Солнца и наиболее распространенных каменных метеоритов — *хондритов*. Летучая часть солнечного вещества, существующая в виде газов при $T > 0$, при низких температурах переходит в твердое состояние, а атомы газов вступают в соединения. Инертные газы в соединения не вступают, оставаясь газами и при низких температурах. Земля и метеориты сохранили летучие элементы в той степени, в какой они проявляли свою активность, поэтому инертные газы в них редки. Что касается изотопного состава C, O, Si, Cl, Fe, Ni, Co, Ba, K, Cu, то он одинаков на Земле и в метеоритах. Относительно Солнца таких широких исследований не проведено, но для C-12:C-13 он такой же, как и на Земле. Исследования по инертным газам показали идентичность изотопного состава в солнечной системе, но на других звездах это отношение иное.

Таким образом, все тела солнечной системы построены из *небольшого числа элементов* (около 28 номера распространения резко падает) и имеют единое происхождение. Метеориты, большинство которых оказались очень древними, дали ценную научную информацию об истории возникновения отдельных тел солнечной системы. По оценкам, основанным на радиоактивном распаде урана, тория, рубидия и калия, их возраст около 4,5–4,6 млрд лет, т.е. совпадает с возрастом Земли и Луны. В них насчитываются примерно 66 минералов, большинство из них похоже на земные. Вероятно, метеориты образовались тогда же, что и планеты земной группы. В геологии все элементы разделены на четыре группы. Атмофильные элементы склонны накапливаться в атмосферах; литофильные образуют твердые оболочки планет; халькофильные создают соединения с серой, подобные меди; сидерофильные способны растворяться в сплавах железа.

Радиоактивность — важнейшее свойство Земли, определяющее ее происхождение и химическую эволюцию. Все первичные планеты были сильно радиоактивны. При радиоактивном нагреве они испытывали химическую дифференциацию, завершившуюся формированием внутренних металлических ядер у планет земной группы. Остатки металлической и сульфидно-металлической фаз, сохранившиеся в первичных мантиях, стекли в центральные области и сформировали четкие границы ядер. Литофильные элементы переходили вверх, дегазация мантий при выплавлении легкоплавких фракций приводила к *базальтовым расплавам*, изливающимся на поверхности планет. Газовые компоненты, вырывающиеся вместе с ними, дали начало *первичным атмосферам*, которые смогли удержать только крупные планеты. Наиболее

массивная среди внутренних планет Земля прошла сложнейший путь *химической эволюции*. На последних стадиях остывания солнечной туманности возникли сложные органические соединения, обнаруженные в метеоритном веществе, которые были усвоены нашей планетой и привели к развитию жизни.

Самопроизвольный распад неустойчивых атомов отражает эволюцию вещества Земли и события эпохи рождения химических элементов, как устойчивых, так и неустойчивых. При распадах выделяется тепло. Для Земли сейчас важны следующие радиоактивные изотопы, которые распадаются: $U-238 \rightarrow Pb-206 + 8\alpha + Q$; $U-235 \rightarrow Pb-207 + 7\alpha + Q$; $Th-232 \rightarrow Pb-208 + 6\alpha + Q$; $K-40 \rightarrow Ca-40 + b + Q$.

Тепловой баланс Земли существенно зависит от радиоактивности. По словам Вернадского, «количество создаваемой радиоактивным процессом тепловой энергии не только достаточно для того, чтобы объяснить потерю Землею тепла и все динамические и морфологические воздействия внутренней энергии планеты на ее поверхность — земную кору, но и для того, чтобы поднять ее температуру». *Алюмосиликатная кора Земли* наиболее радиоактивна. Земля теряет свое тепло в окружающее пространство путем излучения и *теплопроводности*, причем измерения показали, что величина тепловых потоков одинакова и на дне океанов, и на материках. Потери меньше в несколько раз количества тепла, произведенного за счет радиоактивности.

Из законов радиоактивного распада следует, что в прошлом радиоактивность была выше. Так, 4,5 млрд лет назад U-238 на Земле было в 2 раза больше, чем сейчас, и энергии он выделял больше. Кроме тория, урана и калия, существовали недолговечные радиоактивные изотопы с периодом полураспада менее 10⁸ лет. Они возникли в эпоху ядерного синтеза тяжелых элементов и вошли в состав молодых тел солнечной системы. Примерами их могут быть J-129 с периодом полураспада 17,2 млн лет, превращающийся в Xe-129; Sm-146, 50, Nd-142; U-236, 23,9, Th-232 (соответственно).

В докембрийском редкоземельном минерале бастиезите обнаружены (1971 г.) долгоживущие радиоактивные элементы Pu-244 и Cm-247, имеющие своим конечным продуктом распад Xe-131-136. Значит, при «варке» тяжелых элементов присутствовали и *сверхтяжелые трансурановые ядра*, пока не известные и не полученные в лаборатории (известно, что с ростом номера элемента неустойчивость трансурановых резко растет). Группа индийских ученых во главе с С.Бандари обнаружила в некоторых метеоритах и лунной пыли следы более 300 треков, которые могли быть вызваны такими трансурановыми элементами, присутствовавшими при затвердевании породы. Большинство «вымерших» радиоактивных изотопов при распаде выделяло много больше энергии. Так, если за год при распаде урана выделяется 2,97 Дж, то у Pu-244 — 50,4 Дж, Cm-247 — 279,9 Дж и J-129 — 5,53 Дж.

Возрасты химических элементов и тел солнечной системы определили по радиоактивности. По соотношению изотопов свинца Pb-206, 207 и 208 в метеоритах и земной коре рассчитали возраст Земли — 4,55 млрд лет. Возраст радиоактивных ядер в солнечной системе примерно

4,8 млрд лет, поэтому естественно считать, что тяжелые ядра образовались непосредственно перед формированием планет примерно за 200 млн лет. Русский геохимик и минералог академик А.Е.Ферсман разделил время сущест-

вования атомов Земли на три эпохи: *эпоху звездных условий существования, эпоху начала формирования планет, эпоху геологического развития.*

16.4. ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКАЛА ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Термин «**геохронология**» принят в науках о Земле для обозначения времен и последовательности образования горных пород, слагающих земную кору. Относительный возраст пород оценивается достаточно просто в одном геологическом разрезе, поскольку каждый налегающий пласт образовался позднее того пласта, на который он ложится. Этот *стратиграфический метод* применяют и при сравнении возраста пород в разных разрезах, хотя приходится привлекать и данные палеонтологии для сопоставления возраста слоев. *Геохронологическая шкала* принята в 1881 г. на Международном геологическом конгрессе, были введены термины: *эра, период, эпоха, век, время.*

По степени изученности вся история планеты делится на две неравные части. Более молодая, составляющая 570 млн лет и названная *фанерозоем* (греч. *phaneros* «явный» + *zoe* «жизнь»), изучена лучше. К ней относятся геологические формации *палеозоя, мезозоя и кайнозоя.* Более древняя охватывает огромный интервал времени от 570 до 3 800 млн лет назад. Ее назвали *криптозоем*, или периодом со скрытым развитием органической жизни. Хотя криптозой изучен недостаточно, геологи установили необратимый характер осадкообразования и основные тенденции эволюции Земли под влиянием развивающейся жизни.

Установление истинной продолжительности отдельных периодов и эпох, как и возраста Земли в целом, заставило обратиться к равномерному процессу, протекающему с известной скоростью в течение исследуемого периода и позволяющему делать количественные измерения. Эти соображения высказали Ломоносов («О слоях земных», 1763 г.) и Ламарк («Гидрогеология», 1802 г.). С этой целью пытались исследовать накопления солей в океане и другие ученые. Они получили оценки, не противоречащие расчетам, полученным другими методами. После открытия методов определения возрастов горных пород с помощью *радиоактивного распада* по инициативе Вернадского была создана специальная комиссия, в которую вошли академики радиохимик В.Г.Хлопин и химик И.Е.Старик, разработавшая наиболее точные методы по распаду свинца и гелия для определения абсолютного возраста минералов. По данным, полученным комиссией, английский геолог и петрограф А.Холмс разработал первую геохронологическую шкалу фанерозоя (1947 г.).

Четыре этапа химико-биогенного осадкообразования выделяются в истории Земли согласно обобщениям академика Н.М.Страхова.

1. **Первичные океан и атмосфера**, когда живое появлялось в очень ограниченных масштабах, отвечают первому этапу. Первичный океан конденсировался из паров материала мантии Земли и состоял из HCl , HF , H_2BO_3 , SiO_2 , т.е. был достаточно кислым раствором. В воде были растворены сернистый водород, метан и другие углеводороды, а также уголекислота. Сульфатов тогда, как и свободного кислорода, для их образования из сернистого

водорода почти не было. Первичная атмосфера состояла из уголекислоты с добавками аммиака, метана, паров воды и нескольких инертных газов. Началось образование первичных осадочных горных пород. Поверхность Земли была похожа на современную лунную; площади между вулканами занимал неглубокий океан, а они выступали в виде островов. Климат был влажный, *вулканогенно-осадочный*, и климатических поясов не было. Наличие уголекислоты в атмосфере способствовало выветриванию изверженных пород, образовывались карбонаты калия, натрия, магния, кальция и коллоидные частицы Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 . Попадая в кислую среду океана, они превращались в хлориды калия, натрия, магния и кальция, что меняло состав первичного океана, уменьшая его кислотность и обогащая его хлоридами металлов. Вулканические породы поверхности подвергались выветриванию, на них осаждался кремнезем и сульфиды тяжелых металлов.

2. **С появлением первых организмов** вплоть до фотосинтезирующих связан второй этап. Земная поверхность характеризовалась ростом алюмосиликатной коры и расчленением ее на структурные области, зарождались горные цепи и выравнивались участки между ними. В это время увеличился и рост сносов с поверхности в океаны. Поступление карбонатов в океан меняло его, исчезала сильная кислотность, накапливались карбонатные соли. В атмосфере постепенно нарастала роль азота, она очищалась от аммиака и метана. Во время образования обширных континентальных массивов стали зарождаться *климатические зоны* — сухого, холодного (ледникового) и влажного климата. В морской воде стали выделяться доломиты $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, оседающие химическим путем на океаническое дно, где, в основном в илах с прослойками минералов, накапливались кремнезем, железо и марганец. Возникли многочисленные *глинистые минералы*, давшие начало образованию кристаллических сланцев. Все эти следы седиментации (лат. *sedimentum* «оседание») расшифровываются с большим трудом.

3. **Большую часть докембрийского периода** охватывает третий этап (от 3 до 0,6 млрд лет до нашего времени). Он представлен большим числом сильно метаморфизованных пород на нарастающей земной коре. В ней выделяются геосинклинальные зоны с мощными отложениями осадочных пород, в которых возникала *складчатость*, и платформенные области на разрушенном складчатом основании. Процессы регулировались тектоническим развитием *литосферы*. Земная кора разрасталась не только по поверхности, но и в глубину. При этом осадочные породы погружались на глубины, подвергаясь процессам гранитизации и метаморфизма, теряя легкоподвижные компоненты, которые перемещались в верхние горизонты. Большая часть карбонатных материалов разрушалась, переходя в силикатные с выделением уголекислоты. То же происходило и с водой. От этого периода до нас дошли *ледниковые отложения.*

Возникали континенты. Решающие изменения произошли с появлением *фотосинтеза*. В отложениях обнаружены следы фотосинтезирующих организмов. В гидросфере и затем в атмосфере появился *свободный кислород*, быстро меняющий состав атмосферы, — метан и аммиак почти исчезли благодаря окислению, интенсивно стал убывать и углекислый газ. К началу *кембрийского периода* атмосфера стала почти современной — *азотно-кислородной* по составу. Океан тоже терял углекислоту, обогащаясь кислородом. Вулканическая сера и сероводород стали переходить в сульфатную форму H_2SO_4 . Серная кислота, взаимодействуя с растворенными карбонатами, вытесняла углекислоту, а вода обогащалась сульфатным ионом $(SO_4)_2$. Подвижность металлов снизилась, в кислородной среде они осаждались уже в высших стадиях окисления. Накопывались огромные толщии пород, содержащих железо в окисной, карбонатной и сульфидной формах. Примеры: Курская магнитная аномалия, Кривой Рог, Нама-Трансвааль (Южная Африка), Хамерсли (Австралия), Верхнее озеро и Лабрадор (Северная Америка) и другие, относящиеся к залеганию пород 3–2 млрд лет назад. Возросшая масса органического вещества присутствует в отложениях третьего периода докембрия, появляются горючие сланцы и множество рассеянных органических отложений.

4. *К фанерозою* относится последний этап развития верхних геосфер. Возникают две обширные платформы — Гондвана и Лавразия (Паврентьевский щит + Азия), развиваются все известные ныне формы осадочных пород внутри континентов в пониженных местах рельефа. Происходят *крупные изменения в биосфере*, связанные с быстрым развитием жизни. В начале *палеозойской эры* живое вещество переходит на сушу, занимая области с влажным климатом, формируются наземные флора и фауна. Масса живой материи стремительно увеличивается, жизнь про-

никает и в более глубокие области океанов. Меняется качественный состав живого, организмы более усваивают минеральные вещества для формирования своего внутреннего и наружного скелета. Развивающаяся жизнь меняет и мир вокруг себя.

Морская вода становится все более хлоридно-сульфатной, такие элементы, как Fe, Mn, P, Co, Va, Cu стали существовать в виде малорастворимых, сильно окисленных соединений, и концентрация их в морской воде резко упала. Обилие кислорода снизило подвижность Fe, Mn, P, Va, Cr, Co, Cu, Ni и др., они оказались только в виде взвесей, и потому их залежи могут быть вблизи берегов моря. В это время на суше периодически происходило то накопление солей, то ослабление их. В океанах формировались битуминозные глины, горючие сланцы, а на суше — угли. Эти процессы были периодически развивающимися, поскольку зависели от развития растительности.

Для образования углей более подходящими были *каменноугольный и пермский периоды*, а потом, после ослабления процесса в триасе (самом раннем периоде мезозоя), — *юрский, меловой и палеозойский периоды*. Организмы стали использовать для своих скелетов $CaCO_3$ и SiO_2 , что сделало состав морской воды щелочным. В этих условиях начали осаждаться фосфориты, что привело в появлению их месторождений. Так, под влиянием живого вещества океан стал иным, и осадочные породы из закисно-окисных стали углисто-карбонатно-галогенными.

Эволюция Земли как планеты и эволюция живого на ней были взаимосвязаны и взаимозависимы. На весь ход миграции химических элементов в верхних оболочках Земли (стратосфере, гидросфере и атмосфере) все сильнее, — и прямо, и косвенно — влияло живое вещество биосферы.

16.5. МОДЕЛИ ПОЯВЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Химическая эволюция континентальной части земной коры проходила от основного, *базальтового* состава, характерного для *океанического* типа земной коры, к *кислотному, гранитному*, и океаническая кора постепенно (примерно 2,5 млрд лет назад) превратилась в континентальную. Этому способствовали несколько факторов:

1. При завершении формирования ядра планеты в одном из полушарий выделилось больше *базальтов*. 2.

Состав продуктов извержения вулканов менялся, меняя толщину континентальной коры. Базальтовые магмы обогащались SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , соответственно уменьшая долю MgO , FeO , CaO .

3. Начался *мощный круговорот веществ*, включающий переработку первичной коры под действием солнечной энергии, гравитации и всей биосферы.

Огромные массы земной континентальной коры прошли через состояние *осадочных пород*, были перемыты водой и изменились под действием многих компонент. Длительный *круговорот воды* вымывал из коры некоторые базальтовые элементы (наиболее растворимые Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++}), сохраняя малоподвижные типа SiO_2 , Al_2O_3 . Натрий попадал в океан в большом количестве, пребывал там в раство-

ренном виде, но его значительная часть возвращалась в континентальную кору в виде осадков. Калий задерживался в тонкодисперсных глинах и растительных остатках, потому его больше в континентальной коре, чем в океанической.

Моделирование глобальных изменений последнего геологического периода. Для изучения взаимодействия пар земных слоев изготавливают *двухслойные модели*: лист резины толщиной 1,5 см заливают тонким слоем (3–4 мм) легкоплавкого материала (воска или парафина), сцепляющегося с резиной. После остывания резину растягивают домкратами. Через некоторое время на ней появляется в верхнем слое *сеть трещин*, и возникает *блоковая структура*, характерная для верхнего слоя земной коры. При сильном измельчении начинается отслаивание мельчайших «блоков» от подложки, и дробление прекращается. Это позволило проверить *энергонасыщенность* геологической среды и, в частности, идею Вернадского об определенной *организованности процессов* в земной коре. Последнее время считали, что земная кора — пассивный субстрат, подверженный действию внешних механических сил.

Гипотезу дрейфа континентов, выдвинутую в XIX в. Снайдером, развивали Тейлор и Вегенер (1880–1930). Сходство очертаний западного берега Африки и восточного берега Южной Америки издавна считали свидетельством разделения единого материка. В 1858 г. итальянский ученый Антонио Синднер–Пеллегрини обосновал ее, указывая на сходство не только очертаний, но и ископаемых растений и месторождений угля в Америке и Европе. Гипотеза Вегенера возродилась под влиянием новых данных *палеомагнетизма* и сведений о строении *океанического дна*. Карта районов землетрясений показывает, что они образуют узкие и длинные зоны, разделяющие сейсмически активный верхний слой Земли на стабильные участки — *литосферные плиты*, в которых землетрясений не бывает. Зоны, ограничивающие плиты, образованы срединно-океаническими хребтами и глубокими, более широкими *океанскими желобами*. По этим зонам расположено подавляющее число действующих вулканов.

Теория тектоники плит получила признание в 60-е годы. Считается, что верхний слой земной коры состоит примерно из пятнадцати жестких плит, из них 6–7 являются крупными, они могут сталкиваться, погружаться друг под друга и надвигаться одна на другую. Эти плиты плавают по мантии — расплавленным глубинным породам. Вместе с плитами могут перемещаться и континенты.

Теория дрейфа континентов основана на тектонике литосферных плит. Данные геофизики, в основном сейсмические, подтверждают эту теорию. На протяжении геологической истории Земли континенты неоднократно соединялись, образуя единый континент, который позже снова раскалывался. В современной теории тектоники плит считается, что литосферу можно смоделировать системой плит, перемещающихся относительно друг друга со средними скоростями около нескольких сантиметров в год. Плиты плавают на горячем, пластичном слое мантии Земли — *астеносфере*, в котором вещество находится в расплавленном состоянии (рис.27).

Земная кора делится на *океаническую* — плотную и однородную и *континентальную* — более легкую и гетерогенную по минеральному составу. Она все время меняется и вызывает разнообразные и часто катастрофические события. Плиты имеют толщину 75–150 км и включают в себя значительную часть верхней мантии. Движения плит в основном определяются спредингом морского дна — процессом, при котором расплавленный материал поднимается из астеносферы в литосферу в районе океанических горных хребтов и при охлаждении превращается в океаническую кору дна.

Рост плит расширяет океаническую котловину, а в это время магма поднимается, застывает и образует океаническую кору вдоль подводного хребта. Процесс может идти замедленно, сокращая протяженность *спрединговых центров*. В настоящее время длина такой системы около 56 тыс. км, а скорости развития порядка 5 см/год, причем в Атлантике они почти вдвое ниже, в Тихом океане — в 3 раза выше. Умножая среднюю скорость на длину спрединговых центров, получим *скорость формирования коры* 2,8 км²/год. Так как средняя площадь океанов — 310 млн км², отсюда следует, что они сформировались за 110 млн лет. Резуль-

таты бурения дна подтверждают, что океаны более «молоды», чем предполагалось ранее. Данные по западной части Тихого океана дают до 180 млн лет, т.е. за последние 2 млрд лет могли возникнуть и исчезнуть до 20 океанов. Если дно и континент принадлежат к одной и той же плите, то континент перемещается вместе с ней. Океаническая кора может погрузиться под континент, присоединяясь к мантии. Этот процесс называется *субдукцией*.

Кора поднимается на хребте, перемещается поперек котловины и погружается вдоль желоба, отделяющего *зону субдукции*. Породы охлаждаются в океане, растекаются по оси хребта и в стороны от него, поэтому кора постепенно погружается. Некоторые горы на океаническом плато настолько велики, что поднимаются, как острова. Подводные горы в основном базальтовые и поднимаются из «горячих точек», расположенных под плитой. Если плита скользит по магме, возникает целая цепь вулканов. Пример — Гавайские острова, причем скорость роста вулканов достаточно высока.

Горизонтальные перемещения в модели тектоники плит преобладают с 60-х годов, а ранее считалось, что крупные прогибания земной коры заполняются осадками, что и вызывает вздымания, создающие *молодые горные цепи*. В местах раздвижения плит развиваются *рифты*, образуются *анические котловины*. Вдоль линий столкновения и параллельно им возникают зоны вулканов, вдоль линий скольжения — цепь *землетрясений*. Структурные элементы, порождаемые тектонической активностью, недолговечны и подвержены самосогласованным изменениям, так как новые блоки коры возникают и при вулканических процессах. Сами литосферные плиты состоят из фрагментов коры и новых кусков, называемых экзотическими блоками. *При сближении плит* одна может подвинуться под другую и погрузиться в мантию. При этом большая часть коры заглубляется в астеносферу, а верхние слои как бы соскабливаются с нее верхней плитой, образуя *призму аккреции* (лат. *accretio* «приращение, увеличение»). Так, близ Венесуэлы Карибская плита подвигается под Южно-Американскую. При *столкновении плит* несколько увеличивается объем континентальной коры. Вдоль линии столкновения более плотная плита погружается, подвергаясь действию все более высокой температуры. Она несет на себе и осадки, и воду, захваченную пористыми породами. На глубинах около 100–150 км эта вода инициирует ряд процессов — частичное плавление пород, образование магмы, которая обогащается Al, K, Na и др. Эта магма содержит до 50–70% кремнезема и отличается от океанической базальтовой своей большей вязкостью и густотой. В результате в этих местах растет давление, вызывающее *повышенный вулканизм*.

Вулканы по краям плит расположены над огромными, поднимающимися вверх «занавесами» мантии, которые параллельны маркирующим желобам. Длина таких цепей вулканов — около 37 тыс. км. На каждом километре за 1 млн лет извергается 20–40 км³ нового силикатного материала, который присоединяется к континентальной коре со скоростью 0,75¹⁻⁵ км³/год. Похоже, что сама океаническая кора почти ничего не добавляет к коре континентальной. Но над ней возвышаются острова или цепочки

островов, возникшие за счет спокойного базальтового вулканизма над горячими точками и в результате эксплозивного вулканизма в областях, параллельных зонам субдукции. На дне океанов имеются целые блоки осадков (до 170 млн км³), принесенные реками или оставленные вымершими организмами. Часть этого океанического чехла сублимируется, но большая часть составляет основу *экзотических блоков*. Полуостров Индостан — один из самых больших таких блоков. Последние 100 млн лет он был единым, хотя некоторые его части имеют возраст, превышающий 1 млрд лет. Считается, что он был частью огромного континента Гондваны, впоследствии разорванного на куски, и дрейфовал на север до столкновения с южной окраиной Азии. Другие *экзотические блоки*, которые не являются осколками древних материков, имеют возраст до 200 млн лет. Они состоят в основном из гальки, песка и алеврита, их очертания складывались под влиянием столкновений и глубинных деформаций. На Аляске, к примеру, блоки хребта Брукс — огромные, насланые друг на друга пластины. В Кордильерах они имеют вытянутую форму, а в Китае сместились в субширотном направлении, так как Индостан давит на Азию с юга. История формирования блоков не всегда восстанавливается, но свидетельства движений существуют.

Возраст осадочных пород — важный параметр, как и ископаемые останки. *Радиолярии* — одноклеточные организмы (от 40 мкм до 1 мм и более) — появились в океанах в кембрийский период около 500 млн лет назад, а 160 млн лет назад были распространены так же, как сейчас. Они занимают в океанах верхние горизонты, но их скелеты, состоящие из кремнезема, слаборастворимы и встречаются на всех глубинах. С помощью кислоты из пород выделяют микроорганизмы кордонты — останки вымерших червеобразных, живших 570–200 млн лет назад. Исследуя эти останки, удалось доказать, что разрезы более древних пород иногда залегают поверх молодых, т.е. большие скопления слоев могут перетасовываться. Расшифровать историю помогает и *палеомагнетизм пород*, когда они выстраивались под действием магнитного поля Земли в определенном порядке.

Объем континентальной коры сейчас составляет $7,6 \cdot 10^9$ км³, а древнейшие породы имеют возраст 3,8 млрд лет. То есть средняя скорость роста континентов около 2 км³/год, или 65 м³/с, что явно завышено, поскольку на неостывшей Земле она была больше. Поскольку до 70% коры образовалось более 2 млрд лет назад, оставшиеся 30% формировались 2 млрд лет со скоростью порядка 1 км³/год. С этой скоростью образования коры модель рассчитывалась вплоть до фанерозоя (этапа в 600 млн лет), для которого существует ископаемая летопись жизни. По данным палеомагнетизма, в начале периода континенты были изолированы и сосредоточены в области экватора, в последующие 350 млн лет из-за движения континентов возник агломерат Гондваны и Лавразии, затем (250 млн лет назад) при объединении последних сформировался суперконтинент, ориентированный в субмеридианном направлении. Вегенер назвал его Пангея (греч. *pan* «все» + *gea, gaia* «земля»). Древние ядра континентов увеличивались за счет *экзотических блоков*, которые наращивались уже 200 млн лет, и

Пангея начала распадаться вдоль системы рифов, напоминающих очертания современных океанических центров спрединга, опоясывающих земной шар и протяженных на 56 тыс. км.

Какие движения континентов предстоят по этой модели? Через 10⁸ лет может возникнуть новый континент из Азии и Северной и Южной Америки. Атлантический океан будет при этом расширяться, а Тихий закроется из-за субдукции Восточно-Тихоокеанского спредингового центра. Другие модели предсказывают иное. При столкновении размеры континентов возрастут. Если сейчас площадь континентов, окружающих Тихий океан, около 290 млн км², то за счет экзотических блоков она вырастет на 9%, а скорость наращивания коры будет равна примерно 1 км³/год. Большую роль играют в этом процессе осадки. Сейчас самым большим единым источником сноса осадочного материала является вздымающаяся масса суши, возникшая за счет столкновения Индостана с Азией. Кора почти удвоила свою мощность и образовала Гималаи, а к северу от них — плато Тибет. Шесть крупных речных систем дренируют регион, составляющий 4% общей площади поверхности Земли, и выносят в океан до 40% общего количества осадков, переносимых реками.

Северо-западная часть Тихого океана (Япония, Азия, Филиппины) имеет континентальную кору из фрагментов древнего континента, каждый из которых окружен поясами экзотических комплексов, выросших за 600–250 млн лет в течение палеозоя. Стержнем служила Сибирская платформа, вокруг которой наращивались блоки. Вдоль ее южной границы в раннем палеозое сгрудились вулканические дуги и другие поднятия коры, сформировался Байкальский складчатый пояс. Затем, от 300 до 60 млн лет назад, когда Индостан подошел к Азии, формировались другие районы (Индокитай, Янцзы). Континенты юго-западной части Тихого океана (Антарктида, Австралия и Новая Зеландия) возникли при распаде части Гондваны 120–100 млн лет назад, когда развилась рифтовая система, состоящая из трех частей. Одна из них образовала Тасманово море, а две другие отделили Антарктиду от Австралии и плато Кэмпбелл от Новой Зеландии. Вероятно, восточная часть Антарктиды и западная часть Австралии являются более молодыми надстройками коры.

Движения плит — это *периодический процесс*, в котором главной движущей силой служит *тепловая конвекция* в нижней мантии, а источником энергии является *радиоактивный распад*. Здесь важна особенность распространения тепла через земную кору и ухода его в окружающее пространство. Ряд ученых из Принстона (Р.Нанс, Т.Уорсли и Дж.Муди) пришли к такому выводу.

Океаническая кора проводит тепло вдвое более эффективно, чем *континентальная*. Если часть поверхности занимает суперконтинент, под ним должно накопиться тепло мантии, ведущее к его вздыманию и разрушению. После раздвижения осколков тепло уходит под образующиеся между ними новые океанические бассейны. Поэтому при непрерывном подведении тепла к поверхности из-за малой теплопроводности континентов оно «прорывается» через нее лишь в отдельные и достаточно короткие отрезки времени. Сначала в недрах континента образуются «горячие

точки» вулканов, потом они соединяются в *рифтовые долины*, вдоль которых происходит раскол континента. Они готовят место новому океану, через сами рифты горячее вещество мантии поступает к поверхности, готовя океанское дно. Дно уплотняется, охлаждается, опускается вниз, углубляя океан, и этот процесс длится примерно 200 млн лет. Затем самая древняя часть нового океанического дна, примыкающая к континентальным осколкам, настолько уплотняется, что погружается под континентальную кору — начинается процесс субдукции. Далее океан закрывается, а континенты сближаются, а силы сжатия порождают горы.

Суперконтинентальный цикл длится около 440 млн лет. Суперконтинент устойчив около 80 млн лет, накапливающееся тепло вызывает зарождение рифтов. Через 40 млн лет континент раскалывается. Через 160 млн лет дрейфующие континенты максимально удаляются, а затем начинают сближаться, и суперконтинент восстанавливается. Если сейчас Атлантический океан находится еще в стадии раздвижения, то потом, когда его кора состарится и начнет погружаться под соседние континенты, он может закрыться.

Удивительные закономерности обнаруживают сопоставления времен развития рифтов и интенсивного горообразования и. Середины периодов горообразования падают примерно на 2600, 2100, между 1800 и 1600, 1100, 650 и 250 млн лет назад. Интервалы между ними порядка 400–

500 млн лет. Примерно через 100 млн лет после каждого из них наступала пора рифтогенеза. Возрасты большого числа вынесенных из мантии пород группируются на отрезки времен со средними значениями 2500, 2000, 1700–1500, 1000 и 600 млн лет. Период образования гор, протекавший около 250 млн лет назад, сменился рифтогенезом и разрушением Пангеи. То есть период эволюции суперконтинента — порядка 500 млн лет. Эта периодичность отражается в колебаниях уровня океанов, что является проверкой модели.

Метод интерферометрии со сверхдлинной базой (ИСДБ) дал возможность *измерить колебания Земли, изменения скорости ее вращения и дрейф материковых плит*, используя наблюдения за слабыми радиосигналами от квазаров, расположенных на краю Вселенной. Квазары служат как бы маяками, тем более, что их удаленность не позволяет засечь их собственное передвижение в пространстве, да и распределены они по небу достаточно равномерно. Радиотелескопы на Земле, разнесенные на тысячи километров, должны следить за одним и тем же источником радиоизлучения. Метод позволяет засечь изменения положения в мантии или колебания земной коры с амплитудой в несколько сантиметров относительно оси вращения Земли или изменения ориентации оси в пространстве на величину около 1 мс при ускорении или замедлении вращения.

Глава 17. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ, СВОЙСТВА И УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ

17.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКИ О ЖИВОМ И РАЗВИТИЕ ТРАДИЦИОННОЙ БИОЛОГИИ

Биология (греч. *bios* «жизнь» + *logos* «понятие, учение») — это наука о живом, его строении, формах активности, связях организмов с неживой природой и друг с другом, имеет определенные объективные закономерности. Ее цель — *познание феномена жизни*. Биология занимается изучением различных видов живой природы и их взаимоотношений друг с другом и с внешней средой. Сейчас она интенсивно развивается. Пока существует в трех направлениях, имеющих одну цель и один объект исследования — *традиционная или натуралистическая биология, физико-химическая биология и эволюционная биология*. Это условное деление не связано с историей развития этой науки. Ведутся поиски объединительного начала для создания теоретической биологии, и весьма вероятно, что оно будет найдено с помощью системного подхода в рамках единого естествознания.

Базу накопления биологических знаний и аграрной культуры заложили приемы селекции, стимулированные становлением земледелия и скотоводства. Древние цивилизации накопили много сведений о растениях и животных, одомашнили овец, свиней, уток, крупный рогатый скот. В эпоху образования классов выделилась *медицина*, требующая специальных знаний и навыков, и изменилось отношение к человеку. Формировались традиции лечебного использования трав, цветов, отваров плодов, коры деревьев, минералов, животных жиров и пр. Совершенствовались хирургические приемы, массаж и иглоукалывание. Книд-

ская школа испытывала влияние восточной медицины, часть ее трудов вошла в «Свод Гиппократов». Алкмеон начал анатомировать трупы животных, описал зрительный нерв и развитие куриного эмбриона. Он считал мозг органом мышления и ощущений, изучал роль ведущих к нему нервов. Гиппократ отделял медико-биологические знания от магии, знахарства, колдовства и пр. Он считал жизнь единым процессом, выделяя роль среды и наследственности в возникновении болезней, а его ученик, Герофил, выше всего ставил наблюдения и опыт. В практической медицине тогда уделялось внимание фармакологии, действию растительных лекарственных препаратов. Уже тогда люди задумывались о том, как особенности живых организмов передаются потомкам.

Традиционная биология, соответствующая классической направленности познания, явилась во многом источником конкретных знаний о живой Природе. Пока успехи физики, химии и техники не открыли возможности для ученых, она была описательной наукой о формах и видах растительного и животного царства. Совокупность растений называют *флорой*, а совокупность животных — *фауной*. Объект изучения традиционной биологии — живая природа в ее естественном состоянии. Эразм Дарвин ввел даже отдельный термин «Храм природы», отражающий благоговение перед совершенством ее созданий и ее Создателем. В современное время вклад традиционной биологии в биологию и все естествознание растёт, ведь она

изучает нерасчлененную природу во всем многообразии связей.

Проявления жизни на Земле чрезвычайно многообразны, образуя ее живую оболочку. Первые живые организмы на Земле появились 2–4 млн лет назад, а более 1 млрд лет назад растения и животные начали раздельное существование и развитие от единого предка. Для изучения такого огромного мира живой природы нужно произвести классификацию по каким-либо сходным группам. Как сказал Гете устами Мефистофеля: «Чтобы разобраться в бесконечном, надо сперва различать, а потом сравнивать». Этим занимается часть биологии, называемая *систематикой*, и ее значение трудно переоценить. На Земле идентифицировано почти 2 млн видов животных и растений, из которых большая часть уже вымерла, но есть и еще не открытые.

Основы биологической классификации заложил еще Аристотель, его учение о материи и форме основано на наблюдении за живой природой. Организм — законченное целое, реализация формы. Каждая часть организма выполняет функцию, составляющую цель его существования. Вещества органов — это материя, а рост — реализация скрытых в ней возможностей. Аристотель исследовал строение более 500 животных, отметил общий план строения высших животных и описав их внешний вид, рассказал об их образе жизни, нравах. Вместе со своим учеником Теофрастом он разделил животных на водные, земные и воздушные, а растения — на травы, деревья и кустарники. Такую классификацию называют *естественной*. Теофраста считают основоположником ботаники, он выделил однодольные и двудольные растения, от него пошла термины — плод, сердцевина, околоплодник. Аристотель высказывался о единстве живой природы и возможности ее развития, хотя отрицал эволюцию органического мира. Он одним из первых высказал догадку о существовании переходных форм между растениями и животными и ввел в биологию идею о *расположении существ (от минералов до человека) на определенной шкале*.

В эпоху Возрождения формировались *стандарты, критерии и нормы изучения* живой природы. Реформация способствовала возрождению эллинических взглядов на бытие и природу человека, новая нравственность основывалась на развитии естественных свойств человека вне зависимости от религиозных убеждений. Поскольку человек — «венец творения» — алхимия настроилась на поиск и изготовление лекарств; развивалась медицина; создавались «аптекарские сады», конезаводы и зоопарки. Леонардо да Винчи описал поведение птиц в полете, способ соединения костей суставами, деятельность сердца и зрительной функции глаза, открыл щитовидную железу. А.Везалий заложил основы научной анатомии, В.Гарвей открыл кровообращение, Дж.Борелли, описав механизмы движения животных, выделял большую роль нервов в осуществлении движения и заложил основы физиологии, а Дж.Майов сравнивал горение и дыхание.

Изобретение микроскопа дало сильнейший импульс развитию биологии. Биологические знания с XVII в. стремительно дифференцировались — последовательно выделялись *анатомия, физиология, ботаника, зоология*. А. ван Левенгук обнаружил мир микроорганизмов. В трудах Р.Гука, Н.Грю, Я.Гельмонта и др. получила развитие *анато-*

мия растений, были открыты *клеточный и тканевый уровни* организации растений, сформулированы первые догадки о роли листьев и солнечного света в питании растений. Совершенствование методов искусственного опыления закладывало предпосылки генетики. В XVII в. сложился своеобразный синтез *анатомии и физиологии*, предвосхищающий *структурно-функциональный подход*. Научная методология и методики исследования органического мира начинали формироваться. Накопленный материал требовал обобщения.

Созданием систем классификации животных и растений в XVIII в. завершился первый этап натуралистической биологии. В начале века английский биолог Дж.Рей описал более 18,6 тыс. видов растений, введя понятия *род и вид*. Он считал, что «один вид никогда не зарождается от семян другого вида», т.е. к одному виду относится группа сходных организмов, происходящих от сходных предков. Сходные признаки — строение рогов или копыт. Шведский ученый К.Линней уточнил понятие «вид», добавив способность «детям» давать плодovitое потомство. Он описал более 10 тыс. видов растений и более 4 тыс. видов животных, ввел *терминологию* и *иерархический порядок* описания видов и наименования — *класс, отряд, род, вид*. Так, класс включает несколько отрядов, отряд — несколько родов, род — несколько видов. В животном мире Линней выделил 6 классов (млекопитающие, птицы, амфибии, рыбы, насекомые, черви). Эти группы Линней назвал *таксонами*. С той поры вид — важнейший таксон, хотя сначала в основу разграничения видов были положены морфологические различия — определенный план строения. Сам Линней считал эту классификацию поверхностной, но его *бинарная номенклатура* (вид, род) практически сохранилась. Вслед за бинарным обозначением вида (род и вид) обычно указывают первооткрывателя вида и год открытия.

При создании естественной классификации выявляли некое «сродство» растений, но организация живого долго не связывались с зависимостью от истории его развития, так как считалось, что живой мир неизменен и создан Богом. Линней считал, что меняться могут только разновидности, а виды неизменны, поскольку «видов столько, сколько различных форм сотворила предвечная сущность». Ж.Бюффон изложил свою *концепцию трансформизма* (на уровне ограниченной изменчивости видов под влиянием окружающей среды) животного мира в своей «Естественной истории» — 36-томной энциклопедии.

После Линнея Ж.Кювье ввел понятие о *типе* животных и описал несколько типов. Ламарк выделил в природе тела организованные, живые, и неорганизованные, неживые. В «Естественной истории растений» (1803 г.) он обращал внимание на *происхождение и выделение родственных групп* растений. Отметив существование промежуточных разновидностей, сходство ряда черт у животных разных видов, изменение видовых форм при переходе в новые условия, при окультуривании или одомашнивании, Ламарк распределил их по классам несколько иначе, чем Линней. Он разделил животных на позвоночных и беспозвоночных, выделил в отдельные классы паукообразных и кольчатых червей, обосновывал идею о путях происхождения человека от обезьяноподобных предков (1809 г.). Затем, после

введения понятия «*семейство*», виды стали объединять в роды, роды — в семейства, семейства — в отряды, отряды — в классы, классы — в типы, типы — в царства. Немецкий ученый Э.Геккель разделил живой мир на *царства — проститы, животные и растения*. Затем появились *надцарства и подцарства* и т.п. После работ Геккеля стали говорить о *генеалогических древах и стволах*. Из одного ствола происходят классы, отряды, семейства, роды.

Так сходство строения и эволюционные связи постепенно входили в систематику мира живой природы. Для классификации существующих различные методы, сейчас широко используются молекулярно-генетические методы с использованием ЭВМ. В традиционной биологии противостоят *целостный подход и редукционизм*, соответствующие витализму и механицизму, а также *телеология и механистический детерминизм*. В настоящее время значение натуралистической биологии вновь возросло в связи с экологическими проблемами.

Физико-химическая биология включает в себя изучение тех же объектов живой природы, но с использованием физико-химических методов. В первой половине XIX в. эти методы стали использовать для изучения жизни (Г.Дэви, Ю.Либих), и *физиология* отделилась от *анатомии*; тогда же возникла *бактериология*, которая благодаря трудам Л.Пастера, Р.Коха, И.И.Мечникова, переросла в *микробиологию*. Сформировались смежные дисциплины — *биохимия* и *биофизика*. В 1865 г. появилась работа Г.Менделя «Опыт над растительными гибридами», в которой было установлено существование генов и сформулированы закономерности, относимые теперь к законам наследственности. После повторного их открытия в 1900 г. родилась и *генетика*. В 40–50-е годы XX в. в качестве объектов стали использовать микроорганизмы, и поток новых знаний привел к изучению явлений жизни на молекулярном уровне. Возможности исследований существенно выросли после открытия нуклеиновых кислот — дезоксирибонуклеиновой (ДНК) и рибонуклеиновой (РНК), а также соединений, содержащих фосфорную кислоту (например, аденозинтрифосфат — АТФ), гормонов, ферментов, вирусов, биосинтеза белка и т.д. В 1944 г. была открыта генетическая роль ДНК, в 1953 г. — ее структура, в 1961 г. — расшифрован генетический код, в 2001 г. — геном человека. Складывалось объединение молекулярной биологии и генетики, называемое *физико-химической биологией*.

В своем большинстве биологические специализированные дисциплины развивались путем редукции (дробление сложных явлений на простые, в основе которых физические и химические законы). Физико-химическими методами пользовались Л.Пастер, И.М.Сеченов, И.П.Пав-

лов, сумевшие проникнуть в суть многих процессов жизнедеятельности. Арсенал методов существенно расширился, обеспечив резкий взлет биологической науки. Ныне широко используются многие методы: рентгеноструктурный анализ, метод меченых атомов, электронная микроскопия, спектральные и хроматографические методы, различные зондирования, томография и др.

Эволюционная биология активно развивается и выводит биологию на лидирующее положение в естествознании. И Ламарк и Бюффон считали неорганическое вещество умершим, т.е. прошедшим через воздействие жизни. Ламарк отмечал важность длительности истории планеты для образования жизни (1809 г.), и, утверждая связь организации живого и истории его развития, стал использовать эволюционный подход к классификации животного мира. Позже стали появляться и эволюционные идеи не только в систематике, но и в эмбриологии, созданной трудами К.Вольфа, К.Бэра и других. Переход от трансформизма к эволюционизму в биологии происходил в конце XVIII в. Во второй половине XIX в. благодаря Ч.Дарвину в биологию вошел исторический подход, который превращал биологию в науку, способную объяснять происхождение и функционирование многообразных живых систем. Идея естественного отбора как механизма, позволившего «отбраковать ненужные формы» и образовывать новые виды, нанесла смертельный удар телеологии в естествознании и утвердила рациональный смысл в биологии. Содержание эволюционной биологии стремительно расширяется. Этому способствовали знания, полученные в других научных дисциплинах. В последние годы наблюдается мощный всплеск построения и исследования самых разнообразных кибернетических моделей, используемых для постижения эффективно функционирующих живых организмов, формируется научная дисциплина — *эволюционная кибернетика*.

Комплексом биологических наук в настоящее время представлена биология. Различие наук может быть по *объектам исследования* — вирусология, бактериология, ботаника, зоология, антропология. С позиции *проявлений свойств живой материи* различают морфологию (науку о функционировании организмов), молекулярную биологию (изучающую микроструктуру тканей и клеток), генетику (науку о законах наследственности и изменчивости), экологию (науку о взаимосвязи растений и животных с окружающей средой). *Уровень организации исследуемых объектов* отражен в отдельных науках — анатомии (макростроение организмов), гистологии (строение тканей), цитологии (строение клеток). Использование методов смежных дисциплин привело к созданию физико-химической биологии, биофизики, биохимии, астробиологии и др.

17.2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИВОЙ МАТЕРИИ

Биологический уровень организации материи очень сложен, его нельзя свести к закономерностям других естественных наук, и принципы живого нельзя вывести из принципов физики и химии. *Существует несколько подходов к определению живого вещества*.

1. Сторонники *витализма* — учения, основанного на признании наличия в организмах управляющей ими не материальной сверхъестественной силы («души»), считают

жизнь явлением уникальным, которое невозможно объяснить физико-химическими процессами. В основе такого взгляда — удивительная *сложность строения* и *целесообразность поведения* живых организмов.

От древности идет представление о *энтехелии*, одушевляющей «грубую материю тела» и обеспечивающей организмам целенаправленное поведение. Древние египтяне и греки предполагали наличие нескольких «одушевляющих»

начал, часть из которых продолжает существовать и после смерти тела. Долгое время люди считали, что эти начала обеспечивают «грубой материи тела» память, мышление и целенаправленные действия. *Гомеостаз* — одна из целенаправленных реакций, если считать поддержание механизма жизнедеятельности целью, тогда как внешние и внутренние силы этому противодействуют. Разные способы поддержания жизни у разных живых существ — это разные механизмы гомеостаза. Эволюция этих механизмов, направленная на большую независимость жизни от внешних условий, — это развитие организмов. Но объяснения особенностей живого через поиск цели остались достойным истории науки, они равноценны объяснению: «Луна светит, чтобы освещать мне путь» или «Растения и животные существуют для того, чтобы обеспечивать нас пищей».

2. Представители *редукционного подхода* считают возможным использовать законы физики и химии для объяснения процессов жизнедеятельности. Было проверено многократно, что эти законы не нарушаются в биологических системах, но это не означает, что все свойства живого могут быть ими описаны. Они, наоборот, отрицают целенаправленность строения и поведения. И гомеостаз — основу жизни — они объясняют на основе законов неживой природы. Так, терморегуляция теплокровных осуществляется по принципу обратной связи (выделение пота при повышении температуры). Аналогом такого поведения считают управляемое радаром зенитное орудие. Согласно Н.Винеру, определенный тип целенаправленной деятельности обеспечивается контролируемым использованием и переработкой информации, поэтому не так важны детали этих перерабатывающих устройств. Сходство между человеком и машиной в этом отношении было отражено и в названии книги Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» (1949 г.), существенно изменившей мировоззрение.

Стронники этого подхода изучают клеточное строение и функционирование организмов. Бактерии и сине-зеленые водоросли относят к *протокариотам* (от греч. *protos* «первый»), так как их клетки не имеют оформленного ядра, а ДНК находится прямо в цитоплазме и не окружена мембраной. Зеленые растения, грибы, слизевики и животные относятся к группе *эукариотов* (греч. *eu...* «хорошо, полностью») и имеют ядро, т.е. их генетический материал окружен двойной мембраной и образует определенную клеточную структуру. Первые эукариоты, по-видимому, произошли от протокариотов около 3 млрд лет назад, или в конце докембрийского периода.

Диаметр клетки *бактерий* около 1 мкм, поэтому их часто называют микробами. Они освоили самые разные среды обитания и широкий диапазон температур. Численность бактерий даже в очень небольшом объеме вещества очень высокая, например, в 1 г парного молока их более 3000 млн. Бактерии, как и грибы, разрушают органическое вещество и участвуют в *круговороте* веществ, играя особую роль в биосфере. Они важны для плодородия почв и в очистных сооружениях, участвуют в процессе пищеварения, применяются в производстве антибиотиков, используются с различными целями в биотехнологии и генной инженерии. ДНК бактерий представлена одиночными кольцевыми

молекулами длиной около 1 мм, каждая из молекул состоит примерно из 5 млн пар нуклеотидов, или нескольких тысяч генов (в 500 раз меньше, чем у человека).

3. Живая клетка — это сложная высокоупорядоченная система. Опытным путем установлено, что в ней непрерывно совершается синтез крупных молекул из мелких и простых — *анаболические* (греч. *anabole* «подъем») реакции, на которые затрачивается энергия, и их распад — *катаболические* (греч. *katabole* «сбрасывание вниз») реакции. Совокупность этих реакций в клетке и есть процесс *метаболизма*. Для его поддержания необходим непрерывный приток энергии, и для живого более важна химическая форма энергии. Биологи часто выделяют основные наблюдаемые свойства, отличающие живое от неживого и отражающие специфику биологической формы движения материи.

Самовоспроизведение (репродукция) — одно из важнейших свойств, поддерживающее существование видов и определяющее специфику жизни. Оно может быть многократным, информация о нем закодирована в молекулах ДНК. На молекулярном уровне самовоспроизведение происходит на основе матричного синтеза ДНК, программирующей синтез белков, определяющих специфику организма. На других уровнях — огромным разнообразием форм и механизмов, вплоть до образования клеток.

Иерархичность организации отражает возможность системного подхода к пониманию строения и жизнедеятельности. Клетки — как единицы организации — специфически организованы в ткани, ткани — в органы, органы — в системы органов. Организмы организованы в популяции, популяции — в биоценозы, а биоценозы — в биогеоценозы, являющиеся элементарными единицами биосферы.

Упорядоченность структуры на молекулярном уровне приводит к образованию молекулярных и надмолекулярных структур, отличающихся упорядоченностью в пространстве и во времени. В отличие от объектов неживой природы упорядоченность живого происходит за счет внешней среды, в которой уровень упорядоченности снижается. И процессы, ведущие к упорядоченности живого, идут с локальным уменьшением энтропии. Живые системы в развитии способны к самоорганизации, к упорядочиванию структур, к росту разнообразия.

Регуляция процессов осуществляется в химических реакциях при помощи механизма обратной связи. В регуляции активности клеток принимают участие гормоны, обеспечивающие химическую регуляцию. Внутри клеток реакции синтеза и распада идут с участием ферментов, синтезируемых внутри самих клеток.

Размножение и рост. Рост организмов происходит путем увеличения их массы за счет размеров и числа клеток. Развитие — представлено индивидуальным развитием (*онтогенезом*) и историческим (*филогенезом*), и одинаково важны *наследственность* и *изменчивость*. Развитие, сопутствующее росту, проявляется в усложнении структуры и функций. В онтогенезе формируются признаки в процессе взаимодействия генов и среды. В филогенезе появляется большое разнообразие организмов и целесообразность. Эти процессы регулируются и подвержены генетическому контролю. В отличие от объектов неживой

природы — кристаллов, которые растут, присоединяя новое вещество к поверхности, живые организмы растут за счет *питания изнутри*, причем живая протоплазма образуется при ассимиляции питательных веществ. Выживание вида или его бессмертие обеспечиваются сохранением признаков родителей у потомства, возникшего путем размножения. Передаваемая следующему поколению информация закодирована в молекулах ДНК и РНК.

Гомеостаз (греч. *homoiós* «подобный, одинаковый» + *stasis* «неподвижность, состояние»). Живые организмы, обитающие в непрерывно меняющихся внешних условиях, поддерживают постоянно своего химического состава и интенсивность течения всех физиологических процессов с помощью авторегуляционных механизмов, при этом сохраняется необходимая ритмичность в периодических изменениях интенсивности.

Обмен веществ и энергии обеспечивает гомеостаз и является условием поддержания жизни организма. Получается из внешней среды энергия в форме солнечного света, затем химическая энергия преобразуется в клетках для синтеза ее структурных компонент, осмотической работы по обеспечению транспорта веществ через мембрану и механической работы по передвижению организма и сокращению мышц.

Питание — источник энергии и веществ, необходимых для жизнедеятельности. Растения усваивают солнечную энергию и самостоятельно создают питательные вещества в процессе фотосинтеза. У грибов, животных (и человека), некоторых растений и большинства бактерий — *гетеротрофное* (греч. *heteros* «другой» = в рус. «разный» + *trophé* «пища») питание: они расщепляют с помощью ферментов органические вещества и усваивают продукты расщепления. Выделение — это выведение из организма конечных продуктов обмена с окружающей средой. Общее свойство *открытых систем* — обмен энергией и веществом с внешней средой — имеет свои особенности.

Дыхание высвобождает энергию высокоэнергетических соединений, она запасается в молекулах АТФ, обнаруженных во всех живых клетках. Дыхание относится к процессам *метаболизма* (греч. *metabole* «перемена, превращение»), или обмена веществ и энергии.

Раздражимость — избирательная реакция живых существ на изменения внешней и внутренней среды, обеспечивающая стабильность жизнедеятельности. Так, расширение кровеносных сосудов кожи млекопитающих при повышении температуры среды ведет к рассеиванию тепла в окружающее пространство и восстановлению оптимальной температуры тела. Раздражителями могут быть пища, механические воздействия, свет, звук, температура окружающей среды, яды, электрический ток, радиоактивность.

Подвижность, или способность к движению, свойственна и животным, и растениям, хотя скорости их существенно различаются. Многие одноклеточные могут двигаться с помощью особых органоидов. У многоклеточных к движению способны как клетки, так и органоиды в них. В животных организмах движение осуществляется путем сокращения мышц.

Асимметрия — созидательный и структурообразующий принцип жизни. Неживые системы работают по законам симметрии. В классической физике имеют место

законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса, заряда и пр.), которые связаны со свойствами симметрии пространства и времени. В изолированных системах происходят обратимые процессы, т.е. имеет место симметрия между прошлым и будущим. Замкнутые системы самопроизвольно и необратимо стремятся к равновесию, процессы идут с ростом энтропии. Законы квантовой физики — есть проявление более глубоких симметрий. Все функционально важные биомолекулы асимметричны: белки состоят из левовращающих аминокислот, а нуклеиновые кислоты содержат правовращающие сахара, да закручена и сама молекула ДНК — двойная спираль. Все процессы происходят с учетом киральности, установлена даже функциональная асимметрия мозга человека. Живое — это открытая система, использующая для сохранения упорядоченности внешний поток энергии и вещества. Жизнь связана с непрерывным нарушением симметрии в отличие от неживых систем.

Дискретность и целостность — два фундаментальных свойства организации жизни на Земле. Нуклеиновые кислоты и белки — целостные соединения, но в то же время дискретны, так как состоят из нуклеотидов и аминокислот. Репликация ДНК — целостный непрерывный процесс, но она дискретна во времени и пространстве, так как в ней участвуют различные ферменты и генетические структуры. Живые объекты в природе относительно обособлены (особи, популяции, виды). Любая особь состоит из клеток, а клетка и одноклеточные существа — из отдельных органелл. Органеллы — из дискретных, высокомолекулярных, органических веществ, которые, в свою очередь, состоят из дискретных атомов, а те — из элементарных частиц. Все эти части и структуры находятся в сложных взаимодействиях, и целостность живой системы отличается от целостности неживой тем, что она поддерживается в процессе развития. И среди живых систем нет двух одинаковых особей, популяций и видов. Жизнь на Земле проявляется в дискретных формах, причем все формы и части образуют *структурно-функциональное единство*.

В определении понятия «жизнь» к 80-м годам XX в. сложилось две позиции. *Функциональный подход* объединял сторонников представлений об организме как о своеобразном «черном ящике» (с неизвестной внутренней структурой или с не особенно важной), своеобразии которого в наличии «управляющих процессов» передачи информации. Лидеры этого подхода — математики А.А.Ляпунов и А.Н.Колмогоров — использовали средства высшей математики в определении специфики жизни, они рассматривали гомеостатические процессы. Их больше интересовали процессы преобразования информации, и они допускали возможность и небелковых форм жизни. Сторонники другого, *субстанционального*, подхода признавали ключевым наличие определенных субстанций и определенных ее структур. К лидерам этого подхода относился и Опарин, для которого важнейшим было признание наличия обмена веществ, и выдающийся советский биолог В.А.Энгельгардт. Они считали, что изучение проблемы жизни должно основываться на данных химии, а не математики.

В организации живого все указанные свойства проявляются на всех уровнях. Но каждый из них имеет и свои особенности.

17.3. УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ НА ЗЕМЛЕ

Проявления жизни чрезвычайно разнообразны. Структурные уровни организации живой материи отражают критерий масштабности мира живой природы. Вслед за известным генетиком И.В.Тимофеевым-Ресовским выделим четыре уровня организации живой материи: *молекулярно-генетический, онтогенетический, популяционно-видовой и биогеоценозный*. При этом критериями должны быть элементарные структуры и явления, которые проявляются на данном уровне. Деление живой материи на уровни весьма условно, но отражает *системный подход* в изучении природы.

1. Молекулярный или **молекулярно-генетический уровень** — предмет молекулярной биологии и генетики. Рождение этих наук отражает интеграционные процессы в современном естествознании. В них изучаются механизмы передачи генной информации, проблемы генной инженерии и биотехнологий. Любая живая система проявляется на уровне взаимодействия молекул.

Основные структуры — коды наследственной информации — представлены молекулами ДНК. Они разделены по длине на элементы кода — триплеты азотистых оснований (гены). *Элементарные явления* — процессы передачи информации внутриклеточным управляющим системам и связанные с генами мутации. *Основные управляющие системы* используют матричный принцип, т.е. служат матрицами, рядом с которыми строятся соответствующие макромолекулы. Матрицей при синтезе белков в клетках служит заложенный в структуре нуклеиновых кислот определенный код. Знание этого уровня обеспечивает понимание процессов и на других уровнях.

Было показано, что живое вещество обладает способностью к саморегуляции, поддерживающей жизнедеятельность и препятствующей неуправляемому распаду структур и веществ и рассеянию энергии, тогда как мертвое органическое вещество подвержено самопроизвольному распаду. В то же время организму присущи свойства, отличные от свойств составляющих его частей.

2. Онтогенетический уровень — следующий уровень организации жизни, на котором изучается *организм как целостная сложная саморегулирующая система*, способная самостоятельно существовать. Внутри него выделяют *организменный* и *органно-тканевый подуровни*, отражающие признаки отдельных особей, их строение, физиологию, поведение, а также строение и функции органов и тканей живой материи. Онтогенез — процесс реализации наследственной информации, закодированной в зародышевой клетке. Проверяется согласованность ее с работой управляющих систем особи в пространстве и времени жизни на Земле. Термин *онтогенез* ввел Э.Геккель (1866 г.) для рассмотрения структурной и функциональной организации отдельных организмов.

Особь, индивид — элементарная неделимая единица жизни на Земле. Элементарными структурами являются *клетки*. Клетка — структурная и функциональная единица, а также единица размножения и развития всех организмов. *Клеточный, субклеточный подуровни* отражают процессы специализации клеток и внутриклеточных внедрений. Процессы в самой клетке происходят в специализиро-

ванных органоидах. Живая клетка — это сложная высокоупорядоченная система. Установлено, что в клетке непрерывно совершается синтез крупных молекул из мелких и простых (*анаболические реакции*, на которые тратится энергия) и их распад (*катаболические реакции*). Совокупность их в клетке есть процесс метаболизма. Особи, изучаемые на этом уровне, не существуют абсолютно изолированно в природе, они объединены на более высоком уровне организации — на уровне популяции.

3. Популяционно-видовой — следующий уровень организации жизни на Земле — образуется, когда относящиеся к одному виду особи сходны по структуре, имеют *одинаковый кариотип* (греч. *karyon* «орех, ядро ореха»; здесь — ядро клетки) и *единое происхождение*, способны к скрещиванию и дают плодовитое потомство. *Популяция* — совокупность особей одного вида, занимающих одну территорию и обменивающихся генетическим материалом. *Популяция* — часть вида, т.е. все составляющие ее особи принадлежат к одному виду. Она более однородна по составу, поскольку между ее особями происходит непрерывный обмен генами. *Популяция* — элементарная единица в современной теории эволюции. Элементарное явление — *мутация*. На популяцию могут оказывать давление и вызывать ее изменение — *мутационный процесс, популяционные волны, изоляция и естественный отбор*. При нарушении изоляции между различными популяциями происходит скрещивание или обмен генами. Этот уровень важен при определении численности популяций и эволюции живого.

Вид — генетически замкнутая система. Поскольку между видами не может быть скрещивания, то возникшая мутация не выйдет за пределы вида. Организмы, обитающие на изолированных островах, образуют *подвид*, иногда подвид образуют группы популяций.

Число видов на Земле пытались подсчитать многие. Генетик Т.Добржанский насчитал (1953 г.) 1 млн видов животных и 265,5 тыс. видов растений, таким образом, животный мир более разнообразен (по современным оценкам, видов животных — от 1,5 до 2 млн, видов растений — около 500 тыс.). Но среди животных 75% приходится на долю *членистоногих*, но не все виды еще открыты. *Позвоночных* — менее 4%, из них 1/2 — виды *рыб*, а *млекопитающих* — еще на порядок меньше. Из 3500 видов млекопитающих 2500 — *грызуны*. В растительном мире около 150 тыс. видов *покрытосеменных* (цветковых) растений, развившихся из *голосеменных* (семенных папоротников или близких к ним растений). Часть папоротников вымерла. К голосеменным относятся и хвойные растения, которые вместе с покрытосеменными — деревьями, кустарниками, травами — образуют растительный покров Земли. *Водоросли* (14 тыс.) идут после *грибов* (70 тыс.) и *мхов* (15 тыс.). Такое распределение численности видов на Земле сформировалось путем длительной эволюции. Из соотношения сухопутных (93%) и водных (7%) видов можно заключить, что возможность видообразования на суше была выше, чем в воде, и выход на сушу, носивший выборочный характер, открыл перспективы прогрессивной эволюции. Попутно отметим, что на суше преобладают растения, в воде — животные.

Обратимся к соотношениям общих масс видов живой природы, или биомасс. Мировой океан занимает около 70,8% земной поверхности, но его биомасса — всего 0,13% суммарной массы живых организмов. Масса живого вещества сосредоточена в основном в сухопутных растениях. Организмов, не способных к синтезу, менее 1%, хотя по числу видов они составляют 1/5 всех организмов. На 79% видов животных приходится 1% всей биомассы Земли. Отсюда: *чем выше уровень видовой дифференциации, тем меньше соответствующая ему биомасса*, и наоборот.

4. Биогеоценозный уровень — следующий уровень структуры живой материи. Популяции разных видов, населяющие участок земной поверхности или водоем с определенными природно-климатическими условиями (среда обитания, или *геоценоз*), и связанное с ними сообщество растений, животных и микроорганизмов образуют неразделимый взаимообусловленный (с динамичными обратными связями) комплекс — *биоценоз*. Это понятие ввел В.Н.Сукачев (1940 г.). Рациональное использование природы невозможно без знания структуры и функционирования биогеоценозов. Биогеоценоз автономен и саморегулируем и поэтому является элементарной единицей этого уровня и служит средой для входящих в него популяций.

Биоты — крупнейшие наземные сообщества, тесно связанные с определенными природными зонами и поясами. Растения и животные существуют в тесной зависимости от окружающей неживой природы и от других организмов, испытывают на себе их воздействие и приспосабливаются к ним. В процессе исторического развития и естественного отбора на Земле под влиянием конкретных природных факторов сложились различные группы организмов — сообщества, взаимодействующие со своей средой обитания.

Вместе с конкретными участками поверхности, занимаемыми биоценозами, и прилегающей атмосферой они называются *экосистемой*. По определению А.Тенсли, *экосистема* — взаимообусловленный комплекс живых и косных компонентов, связанных между собой обменом веществом и энергией. Изучением взаимоотношений совместно живущих организмов и их зависимости от внешней среды занимается отрасль биологии — *экология*. Этот термин предложил в 1866 г. немецкий биолог-эволюционист Э.Геккель, сторонник и пропагандист учения Дарвина.

Совокупность биогеоценозов составляет земную *биосферу*, они связаны круговоротом вещества и энергии. В этом круговороте жизнь выступает *ведущим фактором* (В.И.Вернадский, В.Н.Сукачев). И биогеоценоз — открытая система, имеющая энергетические «входы» и «выходы», которые связывают соседние биогеоценозы.

Биосфера — самый высокий подуровень организации жизни на Земле (термин введен в 1875 г. Э. Зюссом). Эта область активной жизни охватывает нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы. Вернадский создал учение о биосфере как об *активной оболочке* Земли, в которой совокупная деятельность живых организмов, включая человека, является геохимическим фактором планетарного масштаба и значения. Он выделял в биосфере *живое, косное* (солнечная энергия, почва и т.д.) и *биокосное* (органическое) вещества. На уровне биосферы решается такая глобальная проблема как изменение концентрации углекислого газа в атмосфере. Установлено, что она растет на 0,4% в год, что создает опасность «парникового эффекта». Рациональное использование природы не мыслимо без знания структуры и функционирования биогеоценозов.

Глава 18. МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ

18.1. СТРОЕНИЕ И СТРУКТУРА МАКРОМОЛЕКУЛ БЕЛКОВ

Молекулярный уровень в организации живой материи — самый глубинный. В XX столетии экспериментальная биология вышла на этот уровень, где начинаются и осуществляются важнейшие процессы жизнедеятельности (дыхание, обмен веществ и энергии, кодирование и передача наследственной информации и другие). На молекулярном уровне теперь исследуются и проблемы происхождения жизни, и эволюция, и механизмы преобразования энергии. На этом уровне происходят химические реакции, обеспечивающие энергией клеточный уровень.

Знание закономерностей *молекулярно-генетического уровня* живой материи — необходимая предпосылка понимания *всех жизненных процессов*. Молекулярный уровень представлен молекулами *белков, углеводов, липидов, нуклеиновых кислот и стероидов*. Хотя в состав живого входит 24 химических элемента, основные — кислород (65%), углерод (18%), водород (10%) и азот (3%). На долю остальных — около 3–4%, но они также важны для жизни. Так, хотя йод представлен всего 0,01%, при его недостатке нарушается деятельность щитовидной железы, развиваются

болезни, ограничивающие рост и развитие организма. Из этих четырех элементов в основном образуются молекулы, формирующие сложные органические соединения с разным строением и функциями. Кроме того, в состав живого входят простые неорганические соединения — вода (в теле человека вода занимает 60%), соли, образованные катионами калия, натрия, магния и других металлов, а также анионами угольной, соляной, фосфорной и серной кислот.

При диссоциации их в воде появляются соответствующие катионы и анионы, обеспечивающие многие важные процессы. Биомолекулы синтезируются из таких простых молекул, как вода, окись углерода и атмосферный азот. Уникальные свойства молекул углерода и воды представлены в гл.7, 8. В процентном отношении к сырой массе вода занимает 75–85%, белки — 10–20%, липиды — 1–5%, углеводы — 0,2–2%, нуклеиновые кислоты — 1–2%. Такой состав живого не случаен — жизнь зародилась в океанах, и потому живые организмы постоены из элементов, образующих растворимые в воде соединения.

В процессе метаболизма эти молекулы через промежуточные соединения превращаются в строительные блоки — большие *макромолекулы*. Большинство таких соединений в живых клетках представлены *нуклеиновыми кислотами* и *белками*, их макромолекулы — полимеры (соединения мономеров в строго определенном порядке). Мономеры макромолекул имеют в одном соединении одинаковые группировки, которые соединены химическими связями.

Нуклеотиды, сахара и аминокислоты — одни из самых маленьких биомолекул. Белки — больше и разнообразнее. С помощью специальных приборов и методов их умеют различать, отделять друг от друга, концентрировать и изучать по отдельности. Диаметр молекулы гемоглобина человека, например, составляет 6,5 нм. Все макромолекулы *универсальны*, так как построены по одному плану, но и уникальны, так как неповторима их структура. Например, в состав белков входят аминокислоты, расположенные в определенном порядке, что делает их уникальными и обеспечивает их специфические биологические свойства. Белки — структурные элементы живых клеток, регулирующие процессы метаболизма и играющие роль катализаторов во многих важных процессах жизнедеятельности. *Углеводы и липиды* являются источниками энергии, а стероидные гормоны регулируют некоторые процессы обмена веществ.

Белки — основа жизни животных и растительных клеток. Они выполняют различные функции. В обмене веществ участвуют белки, называемые *ферментами*. Они могут ускорять реакции в сотни тысяч раз; известно более 1000 ферментов, и каждый из них действует только на определенную реакцию, не затрагивая иные. Белки выполняют *строительную* функцию, когда входят в состав мембран и органоидов клетки. Белки, попадающие с пищей организм, расщепляются в процессе пищеварения до аминокислот, в том числе и незаменимых, а потом при попадении в клетки вновь строятся в структуры. *Движение* организма обеспечивают в мышечных волокнах белки *миозин* и *актин*, *транспортную* — *гемоглобин* (доставляет кислород). Многие *гормоны* — тоже белки (гормон поджелудочной железы — инсулин — активизирует захват молекул глюкозы и по необходимости либо запасает их внутри клетки, либо расщепляет их). Гормоны управляют деятельностью ферментов. Есть и *резервные* белки, предназначенные для питания плода или для выработки защитных белков — антител. Они распознают чужеродный белок возбудителя заболеваний, связываются с ним и подавляют его активность. Белки выполняют *защитную* функцию, обеспечивая свертывание крови, входят в состав иммунной системы. Они служат и источниками энергии: при распаде 1 г белка выделяется 17,6 кДж. При недостатке жиров или углеводов могут окислиться аминокислоты с выделением энергии. Огромное разнообразие живого определяется различиями в составе белков.

Белки — это сложнейшие органические соединения, состоящие из мономеров — аминокислот. В клетках и тканях — свыше 170 аминокислот, но в состав белков входят только 20 из них. Из элементов, помимо углерода, кислорода, водорода и азота, в некоторых белках содер-

жится еще и сера. Белки — большие молекулы, нерегулярные полимеры, в которых аминокислоты «нанизаны, как бусинки на нить» (их может быть до 1000). Все макромолекулы — цепи более мелких единиц, причем описать последовательность аминокислот, каждая из которых имеет свое название и обозначается одной из 20 букв алфавита, это значит и описать белок. Разные белки образуются при соединении аминокислот в разной последовательности, составить которую из 1000 по 20 можно огромным числом способов. И каждое такое распределение — определенный белок. Растения могут синтезировать все аминокислоты из более простых веществ, а животные — только часть. Оставшиеся аминокислоты, называемые «незаменимыми», организм животного должен получать с пищей.

Аминокислоты играют в белках роль мономеров. У каждой из них есть *карбоксильная группа* ($-\text{COOH}$) и *аминогруппа* ($-\text{NH}_2$), присоединенные к одному атому углерода. К нему присоединена и одна из многих возможных белковых групп, которыми и отличаются все 20 аминокислот. Обычно это бесцветные кристаллические вещества, растворимые в воде, но нерастворимые в органических растворителях. В нейтральных водных растворах они ведут себя, как *амфотерные соединения* (проявляют свойства и кислот, и оснований), и существуют в виде *биполярных ионов*. Амфотерная природа аминокислот дает им способность препятствовать в растворе изменению кислотности: при увеличении pH они — доноры положительных ионов водорода, при понижении — акцепторы. Каждая аминокислота характеризуется своим значением pH, при которой она электрически нейтральна (в *E*-поле не перемещается ни к аноду, ни к катоду). Мономеры принято обозначать какой-либо буквой латинского алфавита, поэтому полимер представляется длинным сочетанием букв.

Биополимерами являются не только белки, но и *полисахариды*, и *нуклеиновые кислоты*. Строение молекул (число и разнообразие различных звеньев, их порядок расположения) во многом определяет их свойства. При этом часто бывает, что какая-то группа мономеров периодически повторяется, такой полимер называют *регулярным*. Но есть и *нерегулярные* полимеры.

Полипептид — длинная цепь, содержащая от 100 до 300 аминокислот, так как они связаны *пептидной связью*. Молекулы гемоглобина, например, состоят из четырех полипептидных цепей, каждая из которых держит 145 аминокислот. Для правильного функционирования такие цепи должны быть *скручены* и определенным образом *ориентированы* в пространстве. Полимерную цепь в растворе заставляет самопроизвольно скручиваться второе начало термодинамики. Белки функционируют в водном растворе, их скрученность противодействовала бы их точности и специфичности действия, поэтому они все время флуктуируют, и в них происходят повороты вокруг разных связей. Но эта внутренняя свобода является и ограниченной, и *структура белков строго упорядочена*.

Возможные структуры белковых цепей изучили с помощью рентгеноструктурного анализа. Полинг и Корн установили, что имеют место несколько устойчивых конфигураций и прежде всего форма α -спирали. В водном раст-

воре группы NH- и CO-пептидных связей соединяются между собой, причем первое звено цепи соединено водородной связью с пятым, а второе — с шестым и т.д., поэтому и α -спираль устойчива в водном растворе. Между положительно и отрицательно заряженными боковыми группами аминокислот устанавливается *ионная связь*, между атомами, несущими частично положительные и частично отрицательные заряды, — *водородная связь*, между атомами серы и двумя молекулами аминокислоты цистеина — *ковалентная связь*. Неполарные боковые цепи стремятся объединиться друг с другом и не раствориться в воде, образуя *гидрофобное объединение*. Таким образом, при расправлении этой определенной цепи она вновь скрутится единственным, присущим только ей образом. Если заменить хотя бы один атом или одну аминокислоту в полипептиде, получится молекула с другой структурой и другими свойствами.

Образование структуры — это уменьшение энтропии, тогда как вне белковой структуры энтропия должна скомпенсировать это локальное уменьшение и возрасти. При образовании водородной связи выделяемая энергия рассеивается. Водородная связь возникает между пептидными связями цепи: —N—H...O—C, и она определяет *вторичную структуру белка*. Так, в молекуле гемоглобина четыре цепи, каждая из которых обвивается вокруг атома железа. Точное повторение ее формы в миллиардах молекул указывает упорядоченность. Кроме α -спирали, были установлены и другие устойчивые конфигурации (например, β -форма белка), их относят ко вторичной структуре белка. Не вся спираль закручивается, некоторые ее части не влезают, например, *пролин*, и тогда структура прерывается неупорядоченными участками (рис.28).

При выполнении определенных функций спираль изгибается, сворачивается и образует *глобулу (третичную структуру)*. При этом основную роль играет кулоновское взаимодействие между электрическими зарядами частей цепи, а также установление водородной связи между пептидными группами разных частей спирали. Спираль изгибается, часть энергии выделяется в окружающее пространство, и маловероятно, чтобы эта энергия вновь вернулась. Пример тому — денатурация белка при варке яйца, когда разрушаются все возникшие структуры. При образовании глобулы важную роль играет *гидрофобное взаимодействие* частей цепей. Аминокислотные остатки содержат массивные углеводородные части, которые ведут себя подобно капелькам масла в воде. Образуются окружающие молекулы «ловушки», создается структура, и энтропия локально уменьшается. Естественное направление процессов оказывается таким, что маслоподобные части молекул оказываются скрытыми от воды в глубинах структур белка, а водоподобные — обращаются к воде, растворителю. Так возникает подстройка специфической формы молекулы.

18.2. УСТАНОВЛЕНИЕ СТРОЕНИЯ И СТРУКТУРЫ МОЛЕКУЛ ДНК И РНК

Другие важнейшие полимеры — молекулы ДНК и РНК состоят из мономеров, называемых *нуклеотидами*. Как белки состоят из последовательно соединенных аминокислот, так и нуклеиновые кислоты — из последовательности связанных между собой нуклеотидов.

Изучают глобулы *методами рентгеноструктурного анализа*. Эти работы начал Дж.Бернал, разработавший классификацию структур белков. Если четыре белковые нити — глобулы (каждая с характерной третичной структурой) объединяются вместе, энтропия мира несколько возрастает из-за выделившейся энергии и из-за того, что гидрофобные части укрывают друг друга в глубине молекулы. Они слипаются, как капельки масла, и молекулам воды не приходится расставлять много «ловушек». За счет этого возникает и *четвертичная структура*. Так стремление мира к беспорядку, хаосу прижимает белковые нити друг к другу.

Итак, последние три типа структур обусловлены ростом энтропии во Вселенной и локальным уменьшением энтропии. Может быть, этим же обусловлен и первичный порядок расположения аминокислот, но при создании первичной структуры важно и образование цепи при копировании ее в результате сложных химических реакций. Они регулируются специальными белками, ферментами, а весь процесс в целом называется *биосинтезом белка*.

Простейшая животная клетка содержит всего 5000 различных видов белков. Одни похожи на волокна и служат материалом для клеточных стенок, перегородок и мембран; другие — настолько гибки, что скручиваются в клубки, очень активны и способны перемещаться, из них состоит почти все студнеобразное пространство клеток. Это активные глобулярные белки. Они могут участвовать в химических реакциях, обеспечивающих рост. Такое сложное строение белков позволяет им осуществлять столь сложные операции.

Оптическая активность живого была открыта Л.Пастером. Все аминокислоты, входящие в растительные и животные белки, оказались *вращающими влево* плоскость поляризации проходящего через них света, тогда как молекулы неорганических веществ построены симметрично, а в нуклеиновых кислотах — только *правовращающие сахара*. Пастер связал это с *молекулярной хиральностью* (от греч. *cheir* «рука»), или асимметрией правого и левого. Объяснение такое: поскольку живое возникло из неживого, то симметричное должно потерять симметрию, что могло случиться под влиянием каких-либо космических факторов. Но эта гипотеза пока не подтверждена. Выходит, *предбиологическая среда потеряла первичную симметрию*, и с этого момента стал работать принцип Реди «все живое из живого». Опыты последних лет показали, что только в хирально чистых растворах могло возникнуть биологически значимое удлинение цепочки полинуклеотидов и процесс саморепликации. Живые системы организованы так, что *тРНК* из правых сахаров присоединяют к себе только левые аминокислоты. Все живые системы поддерживают *хиральную чистоту*.

Сотрудник Мишера А.Коссель обнаружил, что в их состав входят *пуриновые* (А, Г) и *пиримидиновые основания* (Ц, Т) и простейшие *углеводы*; он выделил *аденин* (А) и *гуанин* (Г), *фосфорную кислоту* и *углеводы*. Так что, если в построении белка участвует 20 аминокислот, то нуклеотидов всего 4 (хотя сами они — достаточно сложные образования). К началу 1900 г. в лаборатории П.Левина (США) расшифровали углеводную часть кислот. У всех живых существ молекулы ДНК и РНК построены по одному плану, каждый нуклеотид состоит из трех компонентов, соединенных химическими связями.

Нуклеотид состоит из одной молекулы фосфорной кислоты, одной молекулы сахара и одной молекулы органического основания. Их фосфатные группы освобождают в растворах ионы водорода. Сахар может быть в двух вариантах: *рибоза* (Р), представляющая сахар с 5 атомами С, к одному из которых присоединена гидроксильная группа (—ОН), и *дезоксирибоза* (Д), в молекуле которой в отличие от глюкозы не 6, а 5 атомов С (*пентоза*) и к одному из атомов С присоединен атом Н. При этом они никогда не встречаются одновременно, поэтому этим сахарам соответствуют два типа нуклеиновых кислот — ДНК и РНК. ДНК находится в основном в ядре (хромосомах), а частично — в других клеточных компонентах (например, хлоропластах зеленых растений). РНК содержится как в цитоплазме, так и в ядрышке. Кроме того, иногда временно цепь ДНК соединяется с цепью РНК. *Основания* — другой компонент нуклеотида — названы так, потому что реагируют как основания: в кислой среде способны присоединять ион водорода. Они тоже могут относиться к двум группам: *пиримидинов*, в основе строения которых — шестичленное кольцо, и *пуринов*, у которых к пиримидиновому присоединено пятичленное кольцо. В ДНК входят два пурина (А, Г) и два пиримидина (Ц, Т), а в РНК — только три: А, Г и Ц, а вместо тимина — другой пиримидин — урацил (У). То есть в составе каждой из нуклеиновых кислот — по четыре основания. В ДНК последовательно соединены дезоксирибонуклеотиды, каждый из которых содержит какое-то из четырех оснований (А, Ц, Г, Т), а РНК — рибонуклеотиды, содержащие тоже по одному основанию (А, Ц, Г, У). Все молекулы имеют форму цепи (от 77 до нескольких миллионов нуклеотидов).

Рентгенограммы ДНК получил У.Астбери, автор термина *молекулярная биология*, вместе с Ф.Беллом (1938 г.). Они показали, что азотистые основания располагаются одно за другим, построенные как пластинки. В 1948 г. английский химик-органик А.Тодд, подробно изучая структуру ДНК, выяснил, как связываются между собой четыре азотистых основания с пятиатомным кольцом сахара рибозы или дезоксирибозы и молекулой фосфорной кислоты. *Нуклеотид* — не только составная часть нуклеиновых кислот, они входят в состав ферментов в качестве активных групп — *коферментов*. Тодд так назвал комплекс азотного основания, углевода и остатка фосфорной кислоты. Блоки А, Г, Т, Ц образуют длинную полимерную цепь, соединяясь друг с другом в разных комбинациях. За эти исследования нуклеотидов Тодд стал лауреатом Нобелевской премии 1957 г.

Американский биохимик (родом из г. Черновцы) Э.Чаргафф сформулировал (1948 г.) *правила регулярности* в

парных отношениях пуриновых и пиримидиновых оснований в молекулах нуклеиновых кислот:

1) общее количество гуанина и аденина (из группы пуринов — Г и А) равно количеству цитизина и тимина (из группы пиримидинов — Ц и Т), т.е. $A + G = T + C$;

2) отношения А/Т и Г/Ц примерно равны единице, т.е. $A = T$ и $G = C$;

3) При этом $G + T = A + C$;

4) ДНК из разных источников может иметь отличия — в одних случаях $A + T > G + C$, а в других — $G + C > A + T$.

Эти правила явились предтечей открытия двойной спирали ДНК.

Для молекулы ДНК тоже характерна структура трех видов — *первичная*, *вторичная* и *третичная*. *Первичная структура* ДНК состоит из нуклеотидных цепей, у которых скелетную основу составляют чередующиеся сахарные и фосфатные группы, соединенные ковалентными связями, а боковые представлены одним из четырех оснований и присоединяются одна к другой молекулой сахара. Нуклеотиды расположены друг за другом и связаны ковалентно с фосфатом и сахарным остатком, и получается полинуклеотидная цепь.

Вторичная структура была сформулирована Д.Уотсоном и Ф.Криком. Две идущие рядом нити, скрепленные одна с другой перемычками и свившиеся в двойную спираль, и есть молекула ДНК. Обе нити одинаковы по длине, остатки пар А-Т и Г-Ц разделены одинаковыми расстояниями. Двойная спираль имеет упорядоченный характер, так как каждая связь основание-сахар находится на одинаковом расстоянии от оси спирали и повернута на 36 градусов. В каждой в зависимости от вида ДНК могут быть до 10^6 блоков — нуклеотидов, порядок их чередования определяет *наследственную информацию*, записанную в ДНК и передаваемую следующим поколениям. Первую догадку о роли нуклеиновых кислот в качестве генетического материала высказал (1914 г.) доцент Петербургского университета А.Щепотьев. Химики понимали, что ДНК собрана из нуклеотидов, имеющих фосфатную группу, связанную ковалентно с пятиуглеродным сахаром, который связан с одним из четырех азотистых оснований. Нуклеотиды соединены друг с другом так, чтобы фосфатная группа одного была связана с сахаром предыдущего, и из их чередующихся комбинаций образуется длинная цепочка — сахарофосфатный остов молекулы.

Молекула ДНК оказалась закручена в спираль: снаружи спирали — остов, а внутри — перпендикулярные ему основания. На один виток спирали приходилось примерно по десять нуклеотидов, а ее толщина указывала, что скручено более одной нити. Итак, вторичная структура отражает форму нуклеиновой кислоты. Степень скручивания ДНК зависит от ферментов.

Р.Франклин исследовала на фотоплёнке пятна от рентгеновского излучения, рассеянного кристаллами очищенной ДНК (1952 г.). В обсуждении результатов принимал активное участие и физик М.Уилкинс, работавший в той же лаборатории. Полученные рентгенограммы стимулировали многих ученых к поиску модели структуры ДНК. История открытия структуры ДНК описана американским биохимиком Дж.Уотсоном в его книге «Двойная спираль»

(1968 г.). В 1951 г. Уотсон встретился в Копенгагене с Уилкинсом и ознакомился с рентгенограммами ДНК. Руководитель Уилкинса Сальвадор-Лурия договорился о стажировке Уотсона в Кавендишской лаборатории, где работала группа ученых, занимавшихся рентгеноструктурным анализом сложных биомолекул и сравнивавших свои модели с опытными данными на первых, весьма несовершенных ЭВМ. В Кембридже Уотсон познакомился с Криком, физиком, переквалифицировавшимся в биохимику, и узнал, что структурные формулы химиков были далеки от совершенства.

Уотсон и Крик решили, разобравшись в структуре *пуринов* (А, Г) и *пиримидинов* (Т, Ц), что они должны быть связаны между собой. Для объяснения *правила Чаргаффа* ДНК должна состоять из двух цепей, которые должны закручиваться так, чтобы сохранялись определенные углы между разными группами атомов. И возникла *двойная спираль*, в которой пурины и пиримидины выстроены по типу ступенек лестницы: «перекладин» — основания, «веревки» — сахарофосфатные остовы.

Каждая перекладина образована из двух оснований: А и Т или Г и Ц, что и объясняет правило Чаргаффа. Так как в каждой паре есть одно основание с одним кольцом и одно — с двумя, величина перекладин одинаковая, и остовы цепей находятся на одном расстоянии. Основания присоединены к двум противоположным цепям, удерживаемым водородными связями между основаниями. Так как звеньями цепи являются пары Ц с Г и А с Т, удобнее использовать образ лестницы, составленной из ступенек ЦГ, ГЦ, ТА и АТ, следующих в определенном порядке. Из-за закрученности в спираль, она похожа на винтовую лестницу со ступеньками из пар нуклеотидов.

В живых клетках цепи содержат до 10^8 пар в ряд и свиты в плотный клубок. У человека длина такой винтовой лестницы в размотанном состоянии достигает нескольких метров, и это одна молекула! Отсюда — огромность числа возможных вариантов расположения молекул в ДНК. И это разнообразие связано с разнообразием жизни, а расположение четырех типов пар в молекуле ДНК задает всю программу, говорит клетке, как ей развиваться и что делать.

Диаметр двойной спирали 2 нм, расстояние между соседними парами оснований спирали — 0,34 нм, полный оборот спирали завершен через 10 пар, а длина зависит от организма, которому принадлежит эта молекула ДНК.

Длина плодовой мушки (дрозофилы) 4 мм, а самой длинной ее хромосома — 40 мм. У простейших вирусов ДНК содержит несколько тысяч звеньев, у бактерий — несколько миллионов, а у высших — миллиарды. Если выстроить в одну линию молекулы ДНК, заключенные в одной клетке человека, то получится длина в 2 м, т.е. длина в 10^9 раз больше толщины. Она уместается в клеточном ядре, т.е. ее «укладка» такова, чтобы по всей длине она была доступна для белков, которым нужно «читать» гены. Основания, соединенные слабой водородной связью, взаимно дополняют друг друга, и каждая цепь автоматически поставляет информацию для нахождения партнера. В эукариотических клетках основная часть ДНК и белков сплетены так, что напоминают нить бус. Каждая такая «бусинка» окружена четырьмя ядерными блоками и содержит около 200 двоек оснований, а «нить» состоит из ДНК и ядерного белка (*гистона*), отличного от входящих в состав «бусинок».

О расшифровке структуры ДНК сообщалось в статье Уотсона и Крика, занявшей всего две странички в журнале, но открывшей новую эпоху в раскрытии тайны жизни. В публикации (1953 г.) Крик и Уотсон отметили, что такая структура хорошо объясняет и процесс «воспроизводства» этой молекулы. При рассоединении цепей возможно присоединение новых нуклеотидов к каждой из них, тогда около каждой старой возникнет новая цепь, точно ей соответствующая. Так впервые пришли к структуре, *способной к самовоспроизведению*. Число «два» удовлетворило биологов, поскольку и клетки, и хромосомы воспроизводятся путем деления исходной на две. Физики Крик и Уилкинс вместе с биохимиком Уотсоном стали лауреатами Нобелевской премии по физиологии и медицине (1962 г.). Третья структура ДНК, определяемая трехмерной пространственной конфигурацией молекул, пока изучена не достаточно.

К настоящему времени исследователи научились синтезировать в необходимом количестве и получать в достаточно чистом виде короткие участки ДНК заданной последовательности, что позволяет закристаллизовать фрагменты молекулы длиной от 4 до 24 пар оснований и исследовать эти кристаллы с помощью рентгеноструктурного анализа. Исследования дали действительно похожесты обеих форм на гибкую лестницу, закрученную спирально вокруг центральной оси.

18.3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ РЕПРОДУКЦИИ, СИНТЕЗА БЕЛКА И ИЗМЕНЧИВОСТИ

Предпосылкой учения о наследственности и изменчивости явилось в некоторой степени создание *клеточной теории*. Идея единства живой природы нашла выражение в морфологическом строении, в нахождении универсальной единицы структурной организации живой материи. И стали считать, что процесс образования клеток тоже должен регулироваться единым механизмом, скрывающим тайну наследственности и изменчивости.

Дискретный характер наследственности установил О.Сажрэ. Исследуя отдельные признаки скрещивающихся при гибридизации растений (тыквы), он отметил, что признаки распределяются между потомками не равно.

Чешский ученый Г.Мендель стал исследовать наследственные свойства у растений при гибридизации, выделяя отдельные признаки. Некоторые свойства переходили непосредственно, а другие были рецессивными, появляясь через поколение. Так он пришел в 1865 г. к открытию двух законов — *доминирования и расщепления признаков*. Третий закон Менделя — *закон независимого комбинирования*. При формулировке своих законов Мендель применил *вариационно-статистический метод*, он дал количественные определения явления наследственности и обобщил материал в количественном отношении. Эта смесь ботаники с математикой противоречила понятиям того

времени. Его законы опередили время почти на 40 лет. Каждому из наследуемых признаков он сопоставил материальную частичку живого, передаваемую из поколения в поколение, — *ген*.

Сначала он скрещивал организмы, отличающиеся только одним признаком (моногибридное скрещивание) — горошины желтого и зеленого цветов. В первом поколении получил только желтые горошины, т.е. желтый цвет доминировал. Когда он скрестил два гетерозиготных растения первого поколения, то во втором поколении получил уже и зеленые горошины в соотношении 3:1. Затем он установил, что эти законы относятся не только к цвету, но и к форме семян, к цвету цветков и др.

Законы Менделя были «переоткрыты» в 1900 г., когда Г. де Фриз в Голландии, К. Корренс в Германии и Э. Чермак в Австрии проводили независимые исследования по *делению клеток*. Они оставили приоритет за Менделем. Тогда же было установлено, что хромосомы находятся внутри клеточного ядра. Основой новой науки — *генетики* — стал ген, элементарная единица наследственности. Общее количество генов в больших организмах огромно — несколько миллиардов, так как они входят в состав всех клеток организма. С биохимической точки зрения основу гена составляют нуклеиновые кислоты, в составе которых основную роль играют азот и фосфор.

Генетика изучает наследственность и изменчивость организмов; признаки и свойства, передающиеся по наследству, фиксируются в генах — участках хромосомы (или молекулы ДНК). После работ одного из ее основоположников В. Иогансена сложилась *терминология генетики*.

Ген — участок хромосомы (или молекулы ДНК), определяющий возможность развития отдельного элементарного признака или синтез одной белковой молекулы. Гены, расположенные в одних и тех же местах хромосомы и отвечающие за развитие одного признака, называли *аллельными*. Поэтому *доминирование* — явление, при котором доминантный ген полностью подавляет проявление другого гена аллели, называемого *рецессивным*. Если доминантный ген не полностью подавляет проявление другого аллельного гена, то имеет место *неполное доминирование*. *Расщепление* — это появление в потомстве нескольких групп фенотипов и генотипов. Если расщепления при скрещивании не наблюдается, то это *чистая линия*. Если два аллельных гена не оказывают влияния друг на друга, проявляясь в гетерозиготном организме в полной мере, это — *кодоминирование*.

Генофонд — совокупность всех вариантов каждой из аллелей, характерная для популяции или вида в целом. **Геном** — совокупность всех генов организма. **Генотип** — это совокупность всех взаимодействующих генов организма. **Фенотип** — совокупность всех признаков организма.

Хромосома — самостоятельная структура, которая имеет плечи и центромеру и включает две хроматиды. В хромосоме расположены в линейном порядке гены. Это — структурная единица ядра клетки, содержащая ДНК, в которой заключена *вся наследственная информация организма*. Процесс самоудвоения и распределение хромосомы по дочерним клеткам при клеточном делении обес-

печивает передачу наследственных признаков организма следующему поколению. Совокупность хромосом в каждой клетке организма создает хромосомный набор. Такой набор постоянен и характерен для данного организма. В половых клетках каждая хромосома встречается один раз, а в большинстве соматических клеток большинства видов — двойной набор хромосом.

Переход от белковой к нуклеиновой трактовке природы гена осуществился в конце 40-х годов. Но еще в 1928 г. Н.Н. Кольцов предположил, что при размножении клеток происходит *матричная ауторепродукция* материнских молекул. В 1936 г. А.Н. Белозерский получил из растения тимонуклеиновую кислоту, выделяемую ранее только в животных организмах. Так было доказано *на молекулярном уровне единство растительного и животного миров*.

Гены — элементарные единицы на молекулярно-генетическом уровне организации. Еще до открытия многих молекулярных деталей биологи поняли, изучая передачу наследственных признаков при скрещивании, что каждый признак определен отдельной частичкой, которую называли геном. Потом установили, что гены находятся в клеточном ядре, в хромосомах. В цепях РНК и ДНК каждые три, следующие друг за другом, основания составляют триплет. Основные структуры, содержащие коды наследственной информации, представлены молекулами ДНК, состоящих из цепочки элементов кода — триплетов *азотистых оснований*, образующих гены. По модели Уотсона–Крика, в молекуле ДНК генетическую информацию несет последовательность расположения оснований: А, Т, Г, Ц. Но как могут четыре основания кодировать порядок расположения в молекулах белка 20 аминокислот? Г. Гамов предложил для *кодирования* одной аминокислоты использовать сочетания из *трех нуклеотидов ДНК*. Для триплетов, учитывая, что оснований всего 4, это число составит $4^3 = 64$.

Подсчет возможных сочетаний из четырех букв показывает, что сочетания по 2 обеспечивают лишь 16 возможностей, а из трех — сразу 64. И только сочетания из трех букв обеспечат построение 20 аминокислот. Поэтому и наименьшая длина «слова», определяющего ту или иную аминокислоту, это три нуклеотида.

В 1961 г. эта гипотеза Гамова была подтверждена, и расшифровали механизм считывания генетической информации с молекулы ДНК при синтезе белков.

Каждый триплет управляет включением в белок определенной аминокислоты. Это наивысшее число возможных триплетов (64) может достигаться лишь в том случае, когда последовательности нуклеотидов или оснований считываются только в одном направлении (моноклиотиды отличаются только основаниями, так как сахар в нуклеиновой кислоте каждого типа и фосфорная кислота во всех нуклеиновых кислотах одинаковы). Поэтому последовательность нуклеотидов определена только последовательностью оснований. Так как названия оснований начинаются с разных букв, то и используют только начальные буквы. В РНК содержатся А, Ц, Г, У, а в ДНК — А, Ц, Г, Т. Например, триплет ГАУ кодирует аспарагиновую кислоту; триплет ГЦУ — аминокислоту аланин; триплет ЦЦУ — пролин. Значит, последовательность ГАУ–ГЦУ–ЦЦУ соответствует

«приказу» клетке производить построение белка по схеме: первой — аспарагиновая кислота, потом — аланин, затем — пролин. И последовательность оснований включает информацию о последовательности аминокислот. Она — есть источник информации, и в то же время «негатив» или искомая «матрица». Порядок чередования аминокислот определен последовательностью триплетов. Эта элементарная единица наследственного материала была названа **кодоном**.

Соответствие последовательностей кодонов и аминокислот носит коллинеарный характер. И синтез белков протекает в соответствии с информацией, заключенной в последовательности кодонов. Группа из трех стоящих подряд нуклеотидов, действуя через довольно сложный механизм, заставляет рибосому — внутриклеточную частицу, отвечающую за синтез белков. — подхватывать из цитоплазмы определенную аминокислоту, следующие три нуклеотида через посредников «диктуют» рибосоме, какую именно аминокислоту постыть в цепочку белка на следующее место, и так постоянно получается молекула белка. Так что информации, записанной в ДНК тройками пар нуклеотидов, достаточно для построения нового организма со всеми его особенностями.

Из 64 возможных триплетов для кодирования аминокислот достаточно только 20 (в белках 20 аминокислот). Значит, оставшиеся 44 являются «запасными», и каждая аминокислота закодирована несколькими кодонами.

Репликация молекулы ДНК происходит поэтапно: 1) сначала разрываются водородные связи между цепями, и они разделяются; 2) разматываются полинуклеотидные цепи; 3) синтез вдоль каждой из цепей новой цепи с комплементарной последовательностью азотистых оснований (рис.29). Разделение и разматывание начинается с одного конца молекулы, продолжается в направлении к другому концу, сопровождаясь одновременным синтезом новых цепей. В результате каждая новая молекула ДНК состоит из одной старой цепи и одной новой, комплементарной старой. Этот способ был опробован, механизм репликации молекулы доказан опытами М.Месельсона и Ф.Сталя (1958 г.).

В основе комплементарности лежит свойство оснований спариваться: А с Т, Ц с Г в ДНК; и А с У и Ц с Г — в РНК, вернее, нуклеотидов при помощи своих оснований. И молекуле РНК, состоящей, к примеру, из 146 кодонов, будет соответствовать 146 определенных «анти-кодонов». ДНК часто сравнивают с застежкой-молнией: как растегивается молния, так и расходятся цепи ДНК.

Синтез белков производится в цитоплазме под контролем ДНК. В нем принимают участие молекулы трех видов *рибонуклеиновой кислоты*. **Транспортная** — тРНК — соединяется с активированными аминокислотами. Активация — за счет энергии, вырабатываемая митохондриями. **Информационная** — иРНК — передает от молекул ДНК, находящихся в хромосомах, генетическую информацию о составе белка в рибосомы цитоплазмы. **Рибосомная** — рРНК — входит в состав рибосом. Так реализуется тесная взаимосвязь между биохимическими процессами в цитоплазме и ядре. Рибосомы осуществляют процесс синтеза. Предварительно на каждом гене в виде молекулы РНК

синтезируется его копия. Эти копии упакованы определенным образом, они вытекают из ядра через поры его оболочки, попадают в цитоплазму, где соединяются с рибосомами, прикрепленными к канальцам ЭПС. Как только к ним приблизятся молекулы РНК, несущие информацию от генов, начинается синтез ферментов. Готовые ферменты уплывают в цитоплазму и делают свою работу.

После открытия роли ДНК и механизма синтеза белков стало ясно, что ген — это участок цепочки ДНК, на котором записано строение молекулы определенного белка. В некоторых генах 800 пар нуклеотидов, а в других — около миллиона. Оказалось, что у человека 30–40 тыс. генов.

Генетическая информация содержится в наборе генов, контролирующей синтез соединений, обеспечивающих удвоение ДНК при определенных условиях. Происходит формирование оболочки, отделяющей участок ДНК и создаваемых генами структур, которые способствуют синтезу копий самой ДНК, как подчеркивает А.Балболянц в книге «Молекулы, динамика и жизнь» (1990 г.). Изменения самих генов влияют на другие структуры организма, что обеспечивает эволюцию. И генетическая информация, или совокупность генов, регулирует целенаправленную деятельность любой живой клетки через последовательность расположения оснований, и говорят, что генетическая информация записана в ДНК определенной *последовательностью оснований*.

Проблема генной активности раскрывает особенности функционирования на молекулярном уровне, решена Ф.Жакобом и Ж.Моно (1960 г.). Они разделили гены на *гены-регуляторы* (кодируют структуру белка) и структурные (синтез ферментов). В дальнейшем оказалось, что синтез ферментов напрямую зависит от состояния генной активности. Под действием жесткого излучения синтез ферментов прекращается. Значит, *основная функция генов — кодирование белка*.

В более сложных системах протекают более масштабные процессы, но в цепях сигнализации, образуемых ферментативными реакциями, тоже есть механизмы обратной связи, и за последнее десятилетие многие из них были расшифрованы. При этом «узнавание» клеток происходит через мембраны. «Если измельчить до клеток живую губку и поместить их во вращающийся сосуд, то образуется скопление, подобное чайкам в стакане чая, помешанного ложкой. И в таком скоплении клетки вновь объединяются, губка воссоздается!», — отмечает Волькенштейн. После работ Жакоба и Моно выяснилось, что регуляторами генов могут быть гистоны — белки, которые ранее считали упаковочным материалом для ДНК. В клеточном ядре они объединяются с длинными цепями ДНК, содержащими гены, образуя хроматин, из которого построены хромосомы. Будучи положительно заряженными, гистоны представляются чем-то вроде «шпильки», на которую плотно наматывается отрицательно заряженная цепь ДНК, уместаясь в ядре клетки. Установлено, что гистоны способны подавлять или ускорять транскрипцию. К началу 90-х годов выяснили, что многие регуляторные белки соединяются попарно, что необходимо для связывания с ДНК. Есть гипотеза, что это соединение определяет, в каких клетках какой ген будет работать, а в каких — нет. «Зубчики», как

в застёжке-молнии, соединяя молекулы регуляторных белков друг с другом, почти всегда состоят из остатков аминокислоты лейцина. Кроме этого «молниевое» механизма был открыт и другой — типа «спираль — петля — спираль».

Знания по регулировке работы генов были получены в основном на отдельных генах и не давали цельной картины регулировки генома как единого целого.

В настоящее время бурно развивается техника биочипов — маленьких пластинок, на которые с помощью прецизионных приборов в тысячи точек, на строго определенных расстояниях наносят микроскопические количества фрагментов ДНК. Такой биочип может содержать, например, 19 тыс. генов червячка нематоды — червячка в 1 мм длиной, у которого удалось полностью прочитать весь геном в конце 1998 г. Нематода состоит всего из 959 клеток, из которых 30% — нервные, и можно следить за поведением и судьбой буквально каждой клетки! Эта работа продолжалась 8 лет при темпе 1 млн пар нуклеотидов за год. В ней участвовали два исследовательских центра по сто ученых в каждом. Оказалось, что гены сосредоточены плотнее в центре хромосом, что только у 7 тыс. генов можно установить их функции, а 12 тыс. остались «молчащими». У дрожжей, относящихся к одноклеточным грибам, геном (впервые!) был расшифрован в 1997 г. — у половины генов была неизвестна функция. Значения этих расшифровок генома уже многоклеточного (нематоды) — это не только полигон для расшифровки генома человека. Сейчас известно уже более 20 геномов бактерий, и их можно сравнить с другими геномами! У человека только в 5 раз больше генов, чем у нематоды, поэтому 20% генов будут известны, и их поиск будет облегчен. Это поможет понять и смысл «молчащих» генов нематоды. Кроме того, гены червячка легко изменять (мутировать) и наблюдать за изменением структуры гена и свойств организма.

Науку о наследственности вывело на молекулярный уровень открытие микробиологами О.Эвери, К.МакЛеодом и М.МакКарти *трансформирующей активности свободной молекулы ДНК*: она может переносить свойства одного организма к другому (1944 г.). Рождение *молекулярной генетики* связано с еще одним открытием (1941 г.). Опыты Дж.Бидла и Э.Тэйтума установили прямую связь между состоянием генов, входящих в ДНК, и синтезом ферментов (белков). Отсюда выражение «*Один ген — один белок*». Вскоре выяснили, что *кодирование белка — основная функция генов*. За это открытие, сделанное вместе с Дж.Ледербергером, все трое были удостоены Нобелевской премии 1952 г. Эти открытия сразу привлекли внимание к молекуле ДНК.

Геномная программа уже доказала свое выдающееся значение для развития знаний о жизни в целом. Пионерами в расшифровке генома человека были Дж.Уотсон (США) и академик А.А.Баев (СССР), они обратились к Президентам своих стран, и на программу «Геном человека» деньги были выделены, хотя многие сомневались в выполнимости такой работы. В клетках человека, как известно, 46 хромосом, длина генома достигает 2 м и состоит из 3 млрд нуклеотидных пар.

За последнее десятилетие стало ясно, что добытая информация не могла быть получена простой поддержкой сотен исследовательских групп, но секвенирование генома в столь гигантском масштабе могло быть получено только индустриальными методами. Для картирования генома, начального этапа, были разработаны специальные техники. Например, собраны коллекции клеток, в которых удалены разные небольшие фрагменты каждой из хромосом, или искусственные дрожжевые хромосомы, содержащие огромные фрагменты хромосом человека, бактериальные и фаговые векторы, позволяющие размножить (клонировать) фрагменты ДНК человека. Эти техники позволили построить детальную карту генома человека, которая в конце 1998 г. содержала более 30 тыс. маркеров. Для программы расшифровки генома за основу взяли методы, разработанные в США Гилбертом и Сэнглером, за что они стали Нобелевскими лауреатами. В разработке этих методов принимали участие и наши соотечественники — ученые РАН А.Д.Мирзабеков, и С.К.Василенко, и Е.Д.Свердлов. Суть метода Сэнгера в том, что молекулу ДНК с помощью специальной обработки ферментами не только расщепляют на фрагменты, но «расплетают» ее спираль на две нити. Потом по каждому из полученных отрывков, состоящих из отдельных нитей нуклеотидов, с помощью специальных химических «затравок» восстанавливают недостающую нить нуклеотидов. Но ее синтез обрывает на разных нуклеотидах, так получается набор цепей ДНК с меняющейся длиной. На концах их отмечают какой-то меткой, чтобы легче обнаружить. Если ранее считали, что у человека генов около 90 тыс., то теперь это число — между 30 и 40 тыс.

В феврале 2001 г. были опубликованы почти полные нуклеотидные последовательности ДНК человека. Теперь задача — понять функции генов. Из тех 32 тыс. генов, о которых теперь известно, понимаем мы лишь 5%. А для чего нужны остальные участки — пока не понятно. Но обращает на себя внимание закономерность — у бактерии «бессмысленных» участков вовсе нет, у дрожжей — почти нет, т.е. по мере повышения уровня организации организма накапливается все больше такой некодирующей ДНК. Возможно, они — «склад запчастей» или испорченные гены, погибшие из-за мутаций, или молекулярное «кладбище древнейших вирусов», заразивших когда-то предков человека. Кроме того, в геноме много и повторяющихся участков. Оказалось, что по геному человек мало отличается от мыши — различия в структуре генов всего на 10–15%, а от шимпанзе почти нет отличий. Этот вывод сделан, конечно, по изученным отдельным участкам. Так что проблема происхождения человека сложнее.

Механизмов изменчивости на молекулярно-генетическом уровне существует несколько. Важен сам *механизм преобразования генов*, происходящий в хромосоме при сильном воздействии. При мутации генов оказалось, что порядок их расположения в хромосоме сохраняется. Процесс образования мутаций в пространстве и во времени называют *мутагенезом*.

Впервые мутации описал голландский ученый Г. де Фриз (1901 г.), построивший и основы теории мутаций. Организмы, обладающие свойствами, находимыми в при-

роде, называют диким типом; им соответствуют наборы генов, которые являются природными. Такие организмы являются эталоном, с которым сравнивают мутантные организмы или мутантные гены. Мутации возникают на стадии индивидуального развития организмов и поражают гены и хромосомы во всех типах клеток и на всех стадиях клеточного цикла. Поэтому мутации по типу клеток делят на генеративные, происходящие в половых клетках, и соматические. Последние будут сохраняться только в этих клетках (у животных и человека), а у растений (из-за возможности вегетативного размножения) они могут выйти за пределы этих клеток.

Мутации генов — основные поставщики материала для прямого действия естественного отбора. Иной механизм — это рекомбинация генов, т.е. создание новых комбинаций генов в конкретной хромосоме. Если в одной из соматических клеток организма произошла мутация, т.е. наследуемое изменение в молекулах ДНК, изменяются не только наследственные признаки клетки, но и части организма, которые образуются из ее потомков. Если мутации произойдут в половых клетках, то наследственные признаки передадутся потомкам. Мутации могут быть вызваны разными факторами, например, излучениями, вызывающими разрывы или повреждения каких-либо участков ДНК, так что могут быть выведены из строя целые участки хромосом. Некоторые химические вещества, вступающие в химические реакции с нуклеотидами, тоже могут быть включены в ДНК, и эта ошибка передается потомкам. Сами гены не меняются, но перемещаются вдоль хромосомы или происходит обмен генами между разными хромосомами. Этот процесс происходит при половом процессе у высших животных. Возможна и *неклассическая рекомбинация* генов, когда увеличивается генетическая информация, и в геном включаются новые генетические элементы (*трансмиссионные*). Этот механизм был открыт при явлении *трансдукции* (от лат. *transductio* «перемещение») генов (П.Ледерберг и Н.Циндер, 1952 г.). Перенос молекул ДНК здесь осуществляется как в составе вирусов бактерий. Этот вид рекомбинации был детально изучен, выделено несколько типов *трансмиссионных* генов. Они отличались структурой генома и способом связывания с клеткой хозяина. Одни из самых активных — плазмиды (двухцепочечные кольцевые ДНК), вызывающие привыкание к лекарствам после длительного употребления. Такие мигрирующие генетические элементы вызывают мутации генов и хромосомах. На создании рекомбинантных молекул основывается *генная инженерия*. Ее цель — создание новых форм живых организмов с наперед заданными свойствами.

Т.Морган начал в Колумбийском университете (1909 г.) эксперименты с помощью существа, которое могло быстро размножаться в ограниченном пространстве и при малых затратах, — плодовой мушки *дрозофилы*. Он установил, изучая распределение наследственных признаков у мушки, что гены находятся в хромосомах, и есть три группы генов, наследуемых как единое целое. Он назвал это явление *сцеплением генов*. В клетках мушки — три большие хромосомы и еще одна небольшая, которую через несколько лет Меллер связал с найденной им четвертой группой генов. Морган установил линейное расположение генов в хромо-

соме, а Н.К.Кольцов соединил с этим открытием идею кристаллизации. Так Кольцов пришел к своей *матричной концепции*. Морган установил, что в следующих поколениях гены, принадлежащие к одной группе, оказывались в разных группах, т.е. между хромосомами происходит обмен генетическим материалом. Это — эффект *кроссинговера* (он видел в микроскоп, как две хромосомы сближались и скреплялись, обмениваясь фрагментами).

Морган представил гены упорядоченными по длине хромосом наподобие бусинок в ожерелье. Так он пришел к идее создания *генетических карт*, в основу которых положено уменьшение вероятности разрыва связи между генами с увеличением расстояния между ними. Впоследствии была введена единица «морган» для оценки кроссинговера (1 морган = 1% эффекта). Морган получил в 1933 г. Нобелевскую премию по физиологии и медицине за создание хромосомной теории наследственности. Но мутации в его исследованиях составляли весьма малую долю. С 1934 по 1937 г. Меллер работал в СССР с Н.И.Вавиловым и другими биологами, он привез из США бесценную коллекцию мутантных линий дрозофилы в подарок Кольцову, что способствовало успехам советской генетики в 20–30-е годы. С мушкой дрозофилой работали Н.В.Тимopheев-Ресовский, М.Дельбрюк и другие. Меллер установил, что число мутаций увеличивается с ростом температуры. В 1925 г. Г.А.Надсон и Г.С.Филиппов подвергли рентгеновскому облучению дрожи, положив начало *радиобиологии*. Меллер стал тоже использовать это облучение, повысив частоту мутаций в 1000 раз. В 30-е годы радиобиология развивалась быстрыми темпами. В 1935 г. в Москве был измерен размер гена дрозофилы. За разработку хромосомной теории наследственности Меллер в 1946 г. стал лауреатом Нобелевской премии.

Современный уровень знаний в области биохимии позволяет не только понять и проследить эти тонкие процессы, но и использовать их в своих целях. Разрабатываются методы *генной инженерии*, позволяющие внедрить в клетку желаемую генетическую информацию. В 70-е годы появились методы выделения в чистом виде фрагментов ДНК с помощью электрофореза. В руки ученых попали «молекулярные ножницы». Транспортным средством переноса генетической информации в клетку стал вирус. Явление *трансдукции* — переноса генов из одной клетки в другую с помощью вирусов изучали еще с 50-х годов. Но вирус не должен был сразу уничтожить всю клетку, поэтому не все вирусы подходили для этой роли. Известно, что бактериальные клетки могут обмениваться генетическим материалом при помощи *плазмид* (небольших частиц с фрагментами ДНК). Поэтому введение нужного гена в плазмиду позволяет в дальнейшем перенести этот ген в бактерию (это еще один из механизмов транспорта в генной инженерии).

Появилась возможность изучать распределение нуклеотидов в определенном гене или получать нужный белок. Для этого создается *рекомбинантная ДНК*, которая возникает, когда ДНК одного организма внедряется в клетки другого. В качестве последнего используются клетки организма, который размножается много быстрее первого, например, бактерии. Так, в 80-е годы были разработаны

интерфероны — белки, способные подавлять размножение вирусов. Были выбраны наиболее подходящие для переноса гены и мобильные участки ДНК. Например, культурным растениям вводят гены, повышающие их иммунитет и устойчивость. В 1983 г. Барбара Макклиток при изучении генетики кукурузы обнаружила в ее геноме один «подвижный» ген, отвечающий за цвет початка. Независимо от нее *подвижные гены* были открыты методами молекулярной генетики советским ученым Г.П.Георгиевым. В 1981 г. процесс выделения генов и получения из них различных цепей был автоматизирован. Генная инженерия в сочетании с микроэлектроникой предвещают возможности управлять живой материей почти так же, как научились управлять неживой. Но подобное сверхтонкое вмешательство в самые сокровенные тайны живой природы слишком опасно, да и готов ли по своим моральным качествам к подобному управлению живым миром сам человек?!

Специализация клеток, как известно, связана с блокировкой части генов в клетке, и при этом важно влияние соседних клеток. Если выделить одну клетку и освободить

ее от влияния соседних, подобрав питательную среду, эта клетка будет вести себя как зародышевая. И хотя она может быть взята из любой ткани, из нее может вырасти весь организм, поскольку блокировка части генов теперь снята. Так работа генов регулируется соседними клетками через *химическую сигнализацию*. Такие опыты были поставлены на растениях, и английский биолог Гордон создал искусственных двойников лягушки, доказав регулируемую роль цитоплазмы, определяющей активность генов. Опыты, подтверждающие единство генетических программ во всех клетках одного организма, легли в основу клонирования, создания генетических двойников. Когда будут выяснены механизмы активации и репрессии генов, легче будет понять, чем вызывается нарушение регулирования внутриклеточных процессов, приводящее к какой-либо болезни (типа рака). Итак, жизнь зависит от точности передачи информации. «Сообщение», которое несет молекула ДНК, передается молекуле РНК и считывается в рибосоме, где происходит процесс сборки белка в соответствии с информацией, содержащейся в гене.

18.4. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВ И ЭНЕРГИИ

Обмен веществ (метаболизм) — это совокупность изменений и превращений вещества и энергии в организмах, обеспечивающих их рост, развитие, жизнедеятельность, самовоспроизводство и самосохранение организмов. Процесс метаболизма — это непрерывно протекающие реакции потребления и усвоения поступающих веществ, превращения их в собственное тело организма (*ассимиляции*), а также противоположных реакций разрушения некоторых веществ (*диссимиляции*). Ассимиляция может быть *автотрофной* (фотосинтез у зеленых растений) и *гетеротрофной* (пищеварение у животных). При химическом разложении молекул выделяется энергия, скрытая в форме химических связей в исходном соединении, и становится доступной для живой клетки. Примеры диссимиляции: *дыхание, брожение*. Пищеварение включает в себя процессы расщепления. Реакции между органическими соединениями идут очень медленно. В живой клетке выработались ускорители реакций — *ферменты* — это биологические катализаторы, присутствующие во всех клетках, они имеют белковую природу. Их активность зависит от условий окружающей среды, определенной рН и отсутствия ингибиторов. Они не изменяются и не расходуются в ходе реакций, как и катализаторы. Огромна их производительность — одна молекула фермента может за 1 мин. разложить до 5 млн молекул *субстрата* — вещества, на которое действует фермент.

Для каждого вида организмов генетически закреплён свой тип обмена веществ, зависящий от условий существования. Его интенсивность и направленность обеспечиваются регуляцией проницаемости биомембран и синтеза и активности ферментов гормонами, координируемыми центральной нервной системой. Ферменты широко применяются в сельском хозяйстве, пищевой и легкой промышленности, медицине.

Фермент воздействует только на одно изменение; обозначают его путем прибавления к названию субстрата окончания «аза». Так, фермент, разлагающий сахарозу —

сахараза. Если отмечается активность фермента в определенной реакции (гликолиза, например), его называют: «сахараза — гидролаза». Ферменты, отщепляющие водород, — *дегидрогеназы*. Они действуют лишь на свой субстрат — есть дегидрогеназа молочной кислоты, дегидрогеназа янтарной кислоты и пр. Сверхспециализированные ферменты расщепляют только один из двух стереоизомеров, например, молочной кислоты — *L*- и *D*-формы, которые отличаются направлением вращения плоскости поляризации. Но есть и не столь избирательные ферменты. Например, *липазы* — ферменты, образующиеся в поджелудочной железе, разлагают почти все жиры на глицерин и жирные кислоты.

Функции ферментов сложны — обеспечить узнавание своего субстрата, присоединение к нему и химическое его преобразование. Эти функции выполняют две разные части большой молекулы фермента. *Кофермент* — это низкомолекулярная часть (витамин или ион металла типа меди и молибдена). Например, многие дегидрогеназы используют одинаковые вещества в качестве коферментов: амид никотиновой кислоты (витамин В) и фосфорную кислоту. У ферментов, отщепляющих CO_2 , коферментом служит тиаминпиррофосфат — витамин В₁, а у ферментов, отщепляющих аминогруппы (NH_2) — витамин В₂. Именно коферменты отвечают за специфичность действия. В зависимости от собственного строения они способны химически изменять присоединенный субстрат, это их функция. Другая часть фермента — *апофермент*. Эта белковая часть выбирает субстрат и соединяет его с коферментом. Апофермент определяет специфичность субстрата. Только при соединении вместе эти две части приобретают ферментальную активность.

Гомеостаз (постоянство внутренней среды организма) обеспечивается метаболизмом. Обмен веществ осуществляется на клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях. В живой клетке постоянно происходит непрерывное движение веществ через ее оболочку — мембрану.

Значительное количество энергии высвобождается и при фотосинтезе.

Выяснение механизмов превращения энергии в биосистемах — одно из больших достижений науки в XX в. Стало понятно, как солнечная энергия преобразуется в специальных пигментных структурах растений в энергию химических связей, как превращаются вещества в процессах брожения и гликолиза (окисление углеводов без кислорода), как происходит внутриклеточное дыхание — перенос электронов в митохондриях от коферментов к кислороду.

В центре этих превращений в клетке находится АТФ, которая синтезируется из АДФ и H_3PO_4 за счет световой энергии или энергии, выделяемой при гликолизе, брожении или дыхании. При гликолизе АТФ выделяется энергия, необходимая для совершения всей работы живого организма — от создания градиентов концентрации ионов и сокращения мышц до синтеза белка. Углеродные остовы для синтеза метаболитов поставляет процесс распада липидов.

Открытие этих общих для всех организмов биохимических процессов, осуществленное усилиями исследователей во многих лабораториях мира (в Германии — О.Мейергоф, К.Ломан, Ф.Липман; в СССР — В.А.Энгельгардт, М.Н.Любимова, В.А.Белицер, Я.О.Парнас и др.), стало возможным благодаря применению в биологии идей термодинамики. В.А.Энгельгардт сформулировал *принцип механохимических преобразований энергии* непосредственно на макромолекулах ферментов. В 1961 г. английский биохимик П.Митчелл выдвинул гипотезу *хемииостотического сопряжения*, обратив внимание на возможность синтеза АТФ за счет энергии электрохимического потенциала (из-за неравновесной концентрации ионов по разные стороны биологических мембран) и прямого электрохимического преобразования энергии.

Обменные процессы в неживой природе характеризуются *круговоротом веществ*, циклическостью. В круговорот втянуты все геосферы, в них происходят процессы переноса веществ, меняющие их локальную концентрацию. С появлением жизни в обменные процессы, происходящие в неживой природе, стали втягиваться и процессы биосферы. *Биосфера* представляет единство живого и минеральных элементов, вовлеченных в сферу жизни. Она распределена по земной поверхности крайне неравномерно и в различных природных условиях принимает вид относительно независимых комплексов — *биогеоценозов* (или экосистем). Живая часть биогеоценоза — *биоценоз* — состоит из популяций организмов разных видов. В обменных процессах, происходящих в неживой природе, нельзя выделить взаимосвязанные процессы ассимиляции и диссимиляции. Хотя все эти процессы происходят циклически во всех геосферах, они не направлены на цели роста, самосохранения, воспроизводства, адаптации и других характеристик, свойственных живым организмам. Согласно концепции Вернадского, «миграция химических элементов на земной поверхности и в биосфере в целом осуществляется или при непосредственном участии живого вещества (биогенная миграция), или же она протекает в среде, геохимические особенности которой (кислород,

углекислый газ, водород и др.) обусловлены живым веществом, как тем, которое в настоящее время населяет биосферу, так и тем, которое действовало на Землю в течение всей геологической истории».

Структурную основу метаболизма обеспечивает *клеточный матрикс*, определяющий пространственное размещение молекулярных компонентов клетки, занятых в процессе жизнедеятельности. Среди клеточных органелл особую роль играют *хлоропласты* клеток зеленых растений и *митохондрии* любых организмов. В хлоропластах происходит связывание энергии солнечного света в процессе фотосинтеза. В митохондриях же извлекается энергия, заключенная в химических связях поступающих в клетку питательных веществ.

Функция клеточных органелл — митохондрий — была долгое время неясна. Они на 85% состоят из воды, как и целые клетки, а их сухое вещество — из белка и липидов. Митохондрии богаты элементарными мембранами, состоящими из бимолекулярной липидной пленки, покрытой с двух сторон белковой пленкой. На внутренней поверхности мембраны упорядоченно расположены *ферменты, обеспечивающие синтез АТФ*. В митохондриях — множество ферментов клеточного дыхания и ферментов синтеза АТФ. В них много собственных ДНК и РНК, есть рибосомы, поэтому они сами могут синтезировать белки. Размножаются митохондрии делением пополам.

Энергия, необходимая для биосинтеза, выделяется в процессах диссимиляции (*дыхание и брожение*). Важнейший субстрат этих процессов — углеводы: для дыхания — еще белки и жиры, а для брожения — спирты, органические кислоты и др. *Процесс сжигания глюкозы* до двуокиси углерода CO_2 происходит в несколько стадий, чтобы предотвратить его взрывной характер и успеть усвоить выделяющуюся энергию. При *расщеплении глюкозы* энергия выделяется на каждом этапе реакции при участии ряда ферментов: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6H_2O + 6CO_2 + 2875 \text{ кДж}$. При этом часть энергии выделяется в виде тепла, а часть идет на образование АТФ (аденозинтрифосфата), «энергетической валюты» клетки. И в дыхании, и в брожении расщепление глюкозы начинается с анаэробного распада глюкозы с образованием пировиноградной кислоты, АТФ и кофермента НАДФ (никотинамид аденин динуклеотид). Этот процесс называют гликолизом. В процессе брожения при участии ферментов продолжается дальнейшее расщепление веществ в отсутствие кислорода. Распад одной молекулы глюкозы приводит к образованию двух молекул АТФ, в каждой из которых сохраняется в виде химической связи до 40% энергии. Оставшаяся энергия расщепления рассеивается в виде теплоты. Для организмов типа дрожжей этого было бы достаточно — они только отщепляют углекислый газ от пировиноградной кислоты, присоединяют водород, который имели «в запасе», и получается этиловый спирт. Этот процесс называют *спиртовым брожением*. При этом приобретает еще молекула фосфата. Гликолиз происходит не в митохондриях, но последующие стадии дыхания клетки без них не обходятся. Не вдаваясь в детали, которые изучены очень подробно, выделим основное.

Другой вид энергетического обмена — *кислородный* — называется *аэробным (дыханием)*. Вещества расщепления

глюкозы, полученные при гликолизе, в присутствии кислорода расщепляются до воды и углекислого газа. При этом образуется 30 молекул АТФ, а окисление двух молекул НАДФ в электротранспортной сети митохондрий сопряжено с синтезом еще шести молекул АТФ. Итак, в процессе дыхания образуется 36 молекул АТФ, а с учетом еще двух, образовавшихся при гликолизе, — 38 молекул АТФ. Энергия молекулы АТФ во внутриклеточных условиях — около 42 кДж/моль, а для 38 молекул — 1600 кДж/моль. Это значит, что КПД процессов равен 55% (рис.30).

Пировиноградная кислота расщепляется под действием ферментов до углекислого газа и водорода, а на последней стадии водород окисляется кислородом с образованием воды. Молекулы H_2O и CO_2 очень бедны энергетически, поэтому энергия, содержащаяся ранее в пировиноградной кислоте, обнаруживается в богатом энергией химическом соединении — АТФ и частично переходит в тепло. *Образование АТФ — главный результат и «цель» клеточного дыхания.* Образуется АТФ присоединением к имеющейся в клетке АДФ третьей молекулы фосфорной кислоты (процесс *фосфорилирования*), и митохондрии поставляют клетке АТФ, используемую в различных процессах, требующих затраты энергии. Поэтому их называют *энергетическими фабриками* клетки, и мышечные клетки имеют большее число митохондрий, чем другие. Увели-

чение числа митохондрий происходит за счет их деления, которому предшествует стадия репликации ДНК. Они содержат кольцевую молекулу ДНК и способны осуществлять полуавтономный синтез белков. Для аккумуляции химической энергии в клетке природа выбрала одно универсальное соединение — АТФ.

АТФ — это *аденозинтрифосфат, нуклеотид*, концентрация которого в клетке мала (0,04%). Молекула АТФ состоит из аденина, рибозы и трех остатков фосфорной кислоты. При гидролизе остатка фосфорной кислоты выделяется энергия: $ATP + H_2O = ADP + H_2PO_4 + 40 \text{ кДж/моль}$. Поскольку связь между остатками фосфорной кислоты почти в 4 раза больше, чем при расщеплении других связей, *АТФ хранит энергию живого организма.* Клетки используют энергию АТФ при производстве тепла, биосинтезе, движении, в процессе фотосинтеза, проведении нервных импульсов и пр.

Лизосомы выполняют в клетке роль желудка, ферменты — желудочного сока. В них — до 30 ферментов, способных расщеплять белки, липиды, нуклеиновые кислоты и др. Лизосомы — пузырьки диаметром около 0,4 мкм, окруженные мембраной. Разрыв их мембраны растворит клетку, так как ферменты очень активны и способны «съесть» ее всю. При голодании они растворяют некоторые органоиды, не убивая саму клетку.

18.5. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ КЛЕТКАМИ

Благодаря ДНК клеточное ядро выполняет свои главные функции: *хранения и воспроизведения генетической информации и регуляции процессов метаболизма в клетке.* Жизненный цикл клетки — это промежуток времени от ее возникновения до гибели. Совокупность процессов при подготовке к делению и сам процесс называют *митотическим циклом*. Период подготовки — *интерфаза* — состоит из синтеза РНК и белков, необходимых для редупликации ДНК; самого процесса редупликации ДНК; синтеза РНК и белков, необходимых для митоза; процесса удвоения клеточного центра.

Митоз (греч. *mitos* «нить») — процесс деления клетки, состоящий в точном распределении генетического материала между дочерними клетками. *Деление клетки* начинается с ядра, когда хромосомы уже удвоились: ядерное содержимое в них уплотняется; область ядра приобретает вытянутость, и в разные концы ее направляются половинки каждой хромосомы. Там они собираются вместе (в том же составе и числе, что и целые хромосомы до начала деления), окружаются новой мембраной, разрыхляются и теряют свои четкие контуры. Содержимое ядра вновь начинает равномерно окрашиваться, образуются два, совершенно идентичных, новых ядра. Затем между ними появляется перегородка, разделяющая содержимое клетки, прежде всего цитоплазму, на две равные части, и возникают две одноядерные клетки, содержащие совершенно одинаковую генетическую информацию, не отличающуюся от информации клетки-родительницы. Этот способ деления клетки называется *митозом*, в результате обе дочерние клетки получают одинаковый набор хромосом.

Митоз можно наблюдать в световой микроскоп за 1,5–2 часа, но управляющие митозом процессы — пусковые, управляющие и регуляторные — лежат на молекулярном уровне, и, по-видимому, они аналогичны происходящим при синтезе белков. Некоторое время считалось, что митоз запускается нарушением равновесия между растущим ядром и цитоплазмой по массе, объему и поверхности. Поскольку ядро растет медленнее, условия окружения становятся все более неблагоприятными для него, достигая порогового значения, и ядро начинает делиться. Но пока объективных доказательств такого объяснения «начала» нет. Через процесс митоза, или через механизм «расхождения двойной спирали», *наследуются мутации*, но их частота мала.

Биологическое значение митоза огромно. Правильность функционирования органов и постоянство строения невозможны без сохранения одинакового набора генетического материала во многих поколениях. Он обеспечивает эмбриональное развитие, рост, восстановление органов и тканей после повреждений, физиологическую регенерацию. Простейшие размножаются путем митоза.

Все виды размножения делят на половые и бесполовые. При *бесполовом* размножении новая особь развивается из соматических клеток. Такими являются митотическое деление, почкование и спорообразование, свойственные как одноклеточным, так и многоклеточным организмам. *Половым* размножением называют смену поколений и развитие организмов на основе специальных, половых клеток, называемых *гаметами* (от греч. *gamete* «жена»). Половые клетки объединяются, и их ядра сливаются с образованием *зиготы* (греч. *zygotos* «соединенный

вместе») — оплодотворенного яйца, содержащего уже одно ядро с двойным набором хромосом. При этом способе генотип потомков возникает путем *комбинации генов*, принадлежащих обоим родителям. Все многообразие многоклеточных своим началом имеет оплодотворенную клетку — зиготу. Этот вид размножения обеспечил очень большие эволюционные преимущества по сравнению с бесполовым, поскольку механизм позволяет перемешивать и по-новому сочетать гены.

Гаметы развиваются в половых клетках в несколько стадий. Первичные половые клетки делятся в результате митоза, их число растет, и происходит редубликация ДНК (интерфаза-1). Период созревания называют *редукционным делением*, или *мейозом*. При мейозе возникает неидентичное родителям потомство, потомки получают несколько измененными. В отличие от митоза мейоз возникает только при наличии хромосом или истинного ядра, т.е. он отсутствует у бактерий и других безъядерных организмов. На втором этапе необходимо преобразовать геном (совокупность генов) и перестроить хромосомы.

При мейозе в экваториальной плоскости расположены не отдельные хромосомы, а пары двоядных хромосом, и делению подвержены только клетки с двойным набором хромосом — *диплоидные* (греч. *diploos* «двойной» + *eidos* «вид»). Начало процесса похоже на митоз, ядро окрашивается равномерно, начинается делиться на хромосомы, появляются тонкие нити — стадия *лептолемы* (греч. *peptos* «сваренный, переваренный»), хромосомы расположены хаотично. На второй стадии — *зигонеме* (от греч. *zugon* «пара») возникает структура, характерная для мейоза, и нити укладываются друг подле друга. На следующей стадии — *пахинеме* (греч. *rachis* «толстый») нити спариваются полностью, и вместо двух удвоенных хромосом получается одна пара, и клетки содержат два набора удвоенных хромосом. На стадии *диplotемы* хромосомы, располагающиеся попарно, расходятся и одновременно укорачиваются. Как только распадется клеточная мембрана, наступает стадия *диакинеза*. Далее процесс проходит так же, как и в митозе, но появляются *новые комбинации хромосом*, и меняется суммарная информация. Появляются две гаплоидные клетки, разные и с новым набором хромосом. Половые клетки содержат один набор хромосом (гаплоидные), тогда как все другие клетки организма — двойной (диплоидные). За счет мейоза и возникает неидентичное родителям потомство.

Если бы на стадиях зигонемы и диplotемы не происходило взаимодействия партнеров, то эти процессы не имели бы особого смысла. На этих стадиях при наблюдении в микроскоп удается видеть перекресты между хроматидами — *хиазмы* (греч. *chiasmata* «крестообразное расположение»). Это выглядит так, будто в каких-то точках произошли разрывы, потом разорванные участки срослись, но все не совсем так. Процесс, начинаясь раньше, приводит к *обмену участками между хроматидами*, что очень важно для потомства (для гонов и выросших из них организмов), так как все они оказываются различными. Даже один перекрест ведет к рекомбинации. *Частота перекрестов* (и рекомбинаций) пропорциональна расстоянию между генами, поэтому она может служить мерой этого расстояния. Эти частоты могут складываться друг с другом, и

можно строить *хромосомные карты*, где нанесены гены и расстояния между ними. Частоты рекомбинаций обычно около 50%, т.е. вероятность того, что после мейоза две хромосомы окажутся в одном ядре, равна 50%. Это напоминает полученное еще Менделем соотношение (расщепление) 1:1. Но, если гены находятся в одной хромосоме, то образуется 0% рекомбинаций при условии, что сцепление не нарушено. Сейчас уже получены значения частот рекомбинации до 0,02%, измеряемые расстояния — порядка 10^{-9} м. Таким образом, генетический анализ позволяет различать на таких расстояниях точки на ДНК. Хорошие электронные микроскопы дают разрешение до 3 А. Если ген состоит из 150 кодонов (450 нуклеотидов), то его длина составляет около 1500 А. Но возможна рекомбинация и внутри одного гена!

Синтез белка по заданной ДНК программе осуществляется рибосомами. Информация, «записанная» в ДНК, «переписывается» (этот процесс называется *транскрипцией*) в РНК и переносится к клеточным органеллам — рибосомам. В эукариотических клетках процесс синтеза в РНК более сложный, чем простая транскрипция. Прежде чем выйти сквозь поры в ядерной мембране в цитоплазму, первичный транскрипт РНК подвергается созреванию (*«процессингу»*), и этот процесс достаточно сложен. К этому пришли после открытия двойной спирали, причем многие гены были разорваны на куски. Значит, при транскрипции многие молекулы РНК разрываются, а потом соединяются (*«сплайнинг»*). Тогда и получается мРНК, не точная копия ДНК, а отредактированная, т.е. какие-то ее части выброшены. Понимание *процессинга РНК* позволило иначе взглянуть на функционирование клетки и понять, почему в одном организме клетки становятся разными. Процесс сплайнинга позволяет проследить за тем, чтобы основная информация сохранялась, — ведь ошибка в один нуклеотид может привести к потере функциональных свойств белка. Экспериментальное изучение сплайнинга началось в конце 70-х годов. Этот процесс обнаружен даже у бактерий. Опыты показали вероятность того, что первыми генами могли быть сплайнированные РНК (рис.31).

Специальные сигнальные системы обеспечивают работу в согласованном режиме миллиардов клеток. Сигнал передается вдоль нервного волокна в виде электрического импульса. На границе с клеткой-исполнителем он преобразуется в химический с помощью выделения окончаниями нервных волокон специального посредника — *нейромедиатора*. *Нейроны* посылают дискретные «сообщения» определенным клеткам-мишеням, ими могут быть мышечные клетки, клетки желез и другие нейроны. Эти сообщения — нейромедиатор, посылаемый в специальный участок — *синапс* (греч. *synapsis* «соединение»). Здесь молекулы нейромедиатора связываются с рецептором (специальной белковой молекулой) на поверхности клетки, воспринимающей сигнал, и вызывают изменения в мембране и внутри клетки. Сигнал за 10^6 с доходит до адресата. Электрофизиологические исследования показали, что не только разные нейромедиаторы, но и один и тот же нейромедиатор может вызывать разные эффекты, зависящие от типа синапса. Т.Хекфельд из Королевского института в Стокгольме показал (1977 г.), что окончания многих

нейронов содержат по 2–3 нейромедиатора, чем увеличивают возможности передачи большего количества информации.

Химический канал связи также существует в организме, кроме передачи информации нервной системой. Клетки сами выделяют вещества, которые через кровь или окружающую среду путем диффузии могут достигнуть других клеток (некоторые из них называют гормонами). *Связь через гормоны* происходит иначе. Обычно гормоны образуются в клетках эндокринной системы, поступают в кровь и переносятся по системе кровообращения к другим клеткам и органам, находящимся далеко от эндокринной железы. Каждая клетка-мишень наделена рецепторами, распознающими молекулы только тех гормонов, которые должны действовать на нее. Рецепторы извлекают гормон из крови, связываются с ним и передают информацию в клетку. Связь через гормоны много медленнее: ведь гормон, секретлируемый специализированной железой, должен отыскать в организме свою мишень, что может занять несколько часов. Молекулы, обладающие гормональной активностью, чаще всего являются *пептидами* — короткими цепочками аминокислот.

Хотя химический канал передает информацию с меньшей скоростью, чем электрический, наличие двух каналов обеспечивает надежность и многообразие связей внутри организма. Обе системы связи между клетками — и *нейронная*, и *гормональная* — действуют через специализированные молекулы, контактирующие с тоже специализированными рецепторами клеток-мишеней. Некоторые молекулы-медиаторы активно передают сигналы в обеих системах связи. Например, гормон норадреналин выделяется надпочечниками для стимуляции сердечных сокращений, расширения бронхов и усиления сокращения мышц конечностей. Одновременно он — и нейромедиатор в симпатической нервной системе, где способен вызывать сужение кровеносных сосудов, повышая артериальное давление, т.е. он может передавать различную информацию в обеих системах.

Если у амебы ее единственная клетка выполняет все функции, необходимые для поддержания жизни, то в многоклеточных организмах эта задача решается силами многих совершенно различных клеточных популяций, тканей и органов, находящихся далеко друг от друга. Для

координации всех этих функций должны быть какие-то механизмы. У большинства высших организмов два способа коммуникации между клетками: при помощи гормонов и через нейроны — нервные клетки. По мере того, как исследователи расшифровывают особенности структуры и функционирования химических веществ, служащих переносчиками информации, открываются новые возможности создавать все более безопасные и эффективные препараты для лечения различных заболеваний сердца, гормональных или психических расстройств.

Точная координация функций клеток многоклеточного организма осуществляется путем передачи *химических сигналов*. Большая часть адресованных клетке сигнальных молекул не попадает внутрь клетки. По наружной поверхности клетки расставлены молекулы рецепторов, которые играют роль антенн. Они распознают приходящие сигналы и приводят в действие внутриклеточные каналы передачи информации, которые регулируют внутриклеточные процессы — метаболизм, сокращение, секрецию, рост. Плазматическая мембрана клетки — *барьер для потока информации*.

На молекулярном уровне передача информации обеспечивается *цепочкой мембранных белков*, последовательно взаимодействующих друг с другом. Это приводит к перестройке следующего в цепочке белка, а изменение структуры влечет изменение его функции. На определенной стадии передача поручается находящимся в цитоплазме ионам и малым молекулам — «вторичным мессенджерам». Их диффузия обеспечивает быстрое распространение информации внутри клетки, хотя их число невелико. Они способны регулировать огромное число физиологических и биохимических процессов. Известны два пути передачи сигналов внутри клетки. Одним из вторичных мессенджеров является сАМР (циклический аденозинмонофосфат), другим — комбинация ионов кальция, инозитолтрифосфата и диацилглицерола. Последние два вещества образуются из самой плазматической мембраны. На обоих каналах работают G-белки — мембранные белки, активизирующие усилительный фермент, находящийся на внутренней стороне мембраны, и уже он превращает молекулы предшественников в молекулы вторичных мессенджеров. Оба канала имеют результатом изменение структуры клеточных белков.

Глава 19. ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНИ

19.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КЛЕТочНОЙ ТЕОРИИ, МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА КЛЕТКИ

Онтогенетический уровень живого представлен отдельными организмами (особями). Клетки, как элементарные структуры действуют как самостоятельные организмы (бактерии, простейшие...), а также являются клетками многоклеточных организмов. Особенность *клеточного подуровня* в том, что именно с него и начинается жизнь.

Клетка — элементарная живая система и основная форма организации живой материи: она усваивает пищу, способна существовать и расти, может разделиться на две, каждая из которых содержит генетический материал, идентичный исходной клетке. Клетка — это один из

основных структурных, функциональных и воспроизводящих элементов живого. Между клетками растений и животных нет принципиальной разницы по строению и функциям, некоторые отличия лишь в строении мембран и некоторых органелл. За 3 млрд лет существования на Земле живое вещество развилось до нескольких миллионов видов, но все они — от бактерий до высших животных — состоят из клеток. Специфичность клеточного подуровня в специализации клеток. В человеческом организме до 10^{15} клеток. Половые клетки служат для размножения, соматические (греч. *soma* «тело») клетки отличаются по строению и

функциям (нервные, мышечные, костные). Клетки отличаются своими размерами, формой, количеством поглощенного красителя. Среди живого есть одноклеточные и многоклеточные организмы. Вирусы — неклеточные организмы, они размножаются в чужих клетках. Некоторые водоросли потеряли свое клеточное строение. На клеточном уровне происходит разграничение и упорядочение процессов жизнедеятельности во времени и пространстве, что связано с приуроченностью функций к различным субклеточным структурам.

Об открытии клеточного строения живого вещества сообщил в 1665 г. Р.Гук в книге «Микрография, или некоторые физиологические описания мельчайших тел посредством увеличительных стекол» (тогда же он впервые употребил термин «клетка»). Гук, впервые применивший микроскоп для исследования живой ткани, увидел только клеточные стенки, отличающиеся размерами и толщиной. В конце XVII в. А.Левенгук при 200-кратном увеличении наблюдал «зародыши» и различные одноклеточные организмы, в том числе *бактерии*.

Клеточная теория, или *цитология* (греч. *kytos*... «сосуд, клетка») сложилась в течение XIX в., когда появились более совершенные микроскопы (в последнее время ее чаще называют *биологией клетки*). Английский ботаник Р.Броун открыл *ядро* (1833 г.), описав его как характерное тельце растительных клеток. Его открытие послужило толчком к другим открытиям. У клеток выделяют два уровня организации — *прокариоты* не имеют оформленного ядра, а оно есть у *эукариотов*; клетки могут иметь различные органеллы, пластиды, оболочки. Обобщил наблюдения Броуна и установил клеточную природу растительной ткани немецкий ботаник М.Шлейден. Вместе со своим другом Т.Шванном он впервые сформулировал **основные положения о клеточном строении всех организмов и образовании клеток** (1839 г.). Чешский естествоиспытатель Я.Пуркине, открывший ядро яйцеклетки (1825 г.) и проводивший исследования по физиологии зрительного восприятия, ввел понятие *протоплазмы* для клеточного содержимого (1839 г.), когда понял, что именно оно, а не стенки клетки, является живым веществом. Позже протоплазму клетки стали разделять на *цитоплазму* и *ядро*.

«Все клетки образуются в результате деления других клеток» — дополнил немецкий патолог и антрополог Р.Вирхов (1855 г.) клеточную теорию Шлейдена и Шванна. Он считал, что любой организм есть «совокупность живых клеток, организованных наподобие небольшого государства». И каждая клетка ведет самостоятельную жизнь. Установили, что хранение и передача наследственных признаков осуществляется с помощью клеточного ядра (Вирхов, Геккель). При большем увеличении микроскопов в клетках открыли постоянные специализированные структуры (органониды, или органеллы) — *пластиды* (такие, как хлоропласты, характерные для клеток, способных к фотосинтезу) и *митохондрии*. В 1898 г. итальянский гистолог К.Гольджи изобрел новый метод изучения клеток через микроскоп, вводя в них соли серебра, и обнаружил в нервных клетках совы и кошки сетчатые структуры, позднее названные *аппаратом Гольджи*.

Следующие положения — основа клеточной теории: *клетка — основная структурная единица теории и единица развития живых организмов; ядро — основная составляющая клетки; клетки размножаются только делением; всем клеткам присуще мембранное строение; клеточное строение — свидетельство единого происхождения растительного и животного мира* (рис.32).

Процесс митозного деления клетки и особенности поведения хромосом были описаны в 1873 г. (И.Д.Чистяков, Э.Страсбургер). Затем установили, что первичное ядро зародышевой клетки образуется путем слияния сперматозоидов и яйцеклетки (О.Гервинг, Г.Фоль), что существует закон постоянства хромосом для каждого вида (Т.Бовери, Э.Страсбургер). В 1880 г. Флеминг описал хромосомы и последовательность событий при *митозе*, а через 10 лет были выяснены и более сложные явления, происходящие в ядре при мейозе. К началу XX в. возможности светового микроскопа были исчерпаны, хотя занимались совершенствованием техники исследований. В начале XX в. многие биологи повторили опыты австрийского естествоиспытателя И.Менделя, открывшего еще в 1865 г. существование индивидуальных наследственных факторов (*генов*).

Все это способствовало развитию *цитогенетики*. Современная клеточная теория исходит из единства расчлененности многоклеточного организма на клетки и его целостности, основанной на взаимодействии клеток. В *цитоплазме* различают цитолимфу, включения и органеллы. *Цитолимфа* — жидкая часть цитоплазмы, содержащая растворенные продукты жизнедеятельности клеток, а *включения* — нерастворимые структуры (капли жира, зерна крахмала, глыбки гликогена). Органеллы подразделяют на *мембранные* (наружная плазматическая мембрана — НПМ, эндоплазматическая сеть — ЭПС, аппарат Гольджи — АГ, лизосомы, митохондрии, пластиды) и *немембранные* (рибосомы, клеточный центр, жгутики и реснички, цитоскелет). От окружающей среды клетка отделена *плазматической мембраной*, которая регулирует обмен между внутренней и внешней средой и служит границей клетки. В каждой клетке содержится генетический материал в форме ДНК, регулирующий жизнедеятельность и самовоспроизведение, и цитоплазма.

Размеры клеток измеряются в микрометрах (мкм) и нанометрах (нм). Например, соматическая животная клетка средних размеров имеет 10–20 мкм в диаметре, растительная — 30–50 мкм; длина хлоропласта цветкового растения 5–10 мкм, бактерии — 2 мкм.

Для изучения клеточного строения световые микроскопы не годятся, так как их разрешающая способность ограничена длиной световой волны — чем меньше длина волны, тем выше разрешающая способность. Даже фиолетовой линии соответствует разрешение в 200 нм, что недостаточно для изучения клеточных структур. Более высокое разрешение было достигнуто в 30-е годы с помощью *электронного микроскопа*. С развитием методов исследования стало понятно, что клетка — это самовоспроизводящаяся химическая система, поэтому она должна поддерживать баланс с окружением, поглощать те вещества, которые требуются ей в качестве «сырья», и выводить наружу накапливающиеся «отходы», т.е. обеспечивать *гомеостаз*.

Электронный микроскоп устроен почти как световой, но роль пучка света в нем играют электроны. Пучок электронов обладает волновыми свойствами, а длина волны электронов короче, чем у света. Вместо обычных линз используются электромагнитные, направляющие пучок электронов, вылетающий из электронной пушки. На фотопластинке получается изображение предмета. Но срезы вещества должны быть достаточно тонкими, чтобы сквозь них могли проходить электроны, и, чтобы электроны не захватывались молекулами воздуха, нужно обеспечить условия почти полного вакуума. Это весьма сложно, и в 50-е годы *трансмиссионный тип* электронного микроскопа заменили *сканирующим*. Электроны в нем отражаются от поверхности объекта, и изображение получается в обратном направлении. Разрешение несколько хуже, чем у предыдущего типа, но требования к вакууму снижены, и можно проводить прижизненные исследования некоторых организмов. Фотографии получаются очень хорошего качества с самыми мелкими деталями поверхности. Получаемую с помощью электронного микроскопа структуру стали называть *ультраструктурой*.

Химический состав клеток весьма сложен, так как каждая клетка выполняет свою функцию в организме. Специализация достигается за счет усиленного развития тех или иных свойств, присущих почти всем типам клеток. Кроме воды (около 70%), в ней содержатся белки, нуклеиновые кислоты, ионы минеральных солей, углеводы, жироподобные вещества — липиды и другие вещества меньшего молекулярного веса, которые являются строительным материалом для биополимеров.

Все *соматические* клетки живых организмов специализированы: клетки костной ткани образуют скелет, клетки крови отвечают за иммунитет и разносят кислород, нервные проводят электрические импульсы и т.д. (рис.33). *Эмбриональные стволовые* клетки «хранят» информацию обо всем организме и «знают», как ею воспользоваться, чтобы размножиться в миллиарды клеток растущего живого организма. Эти клетки еще не «включили» механизмы, запускающие специализацию, их геном не начал даже и программу размножения и формирования многоклеточного организма; такая клетка может стать одной из 150 видов зародышевых клеток, а пока она способна только переносить *mРНК* в следующее клеточное поколение. Из эмбриональных стволовых клеток формируются островки в различных тканях и органах, поэтому все органы построены из специализированных клеток с вкраплениями эмбриональных стволовых. При хранении зародыша в холодильнике при $T = +40^{\circ}\text{C}$ за 4–5 часов все клетки погибнут, кроме эмбриональных стволовых.

В разных организмах число клеток существенно отличается, и по числу клеток все живые организмы делят на пять царств. Самые древние ископаемые организмы — это одиночные клетки, значит, и эволюция жизни сопровождалась усложнением структуры и числа клеток.

Прокариоты — *бактерии и сине-зеленые водоросли*. Одноклеточные организмы, имеющие самое простое строение и под микроскопом похожие на точки, называются *монерами* (греч. *moneres* «простой»), или бактериями. Внешне они похожи на сферы, спирали и палочки. Разно-

образии химического состава позволяет им существовать в разных условиях, самим синтезировать пищу из двуокиси углерода и энергии, получаемой из разных химических реакций или света. Некоторые бактерии используют пищу, вырабатываемую другими организмами, обитая в живых организмах или трупах, способствуя их разложению на более простые компоненты и возвращению их в круговорот веществ в природе. Бактерии могут и оберегать нас от инфекций. Некоторые из них используются в качестве консервантов, на бактериальном брожении основаны процессы квашения капусты, приготовления маринадов, простокваши, кефира, уксуса и пр. Многие бактерии восприимчивы живыми организмами как яды, поскольку они вырабатывают соответствующие токсины (например, ботулизм). Быстрая эволюция бактерий обусловлена их быстрым размножением.

Одноклеточные организмы с более сложной структурой относят к *царству водорослей*, или *протистов*. При рассмотрении планктонных организмов под микроскопом можно выделить зеленые или желтые тельца — хлоропласты, осуществляющие фотосинтез. Среди водорослей есть и простейшие многоклеточные организмы. У диатомовых водорослей каждая отдельная особь окружена клеточной оболочкой, пропитанной кремнеземом — веществом, из которого состоят песок и стекло. Большие пласты диатомей расположены у земной поверхности и используются как абразивный материал. Другие простейшие многоклеточные — динофлагеллаты имеют жгутики на оболочке, которые проталкивают их через воду. Среди них есть виды, которые испускают свет, или люминесцируют. Некоторые вырабатывают смертельный яд для человека — нейротоксин. Ими питаются моллюски, поэтому при увеличении численности этих протистов (они содержат красный пигмент, и прилив приобретает красный оттенок) опасно употреблять моллюски в пищу.

Среди водорослей есть и простейшие многоклеточные организмы. У диатомовых водорослей каждая особь окружена клеточной оболочкой, пропитанной кремнеземом. В основном они залегают неглубоко, и их добывают, используя как абразивный материал. Есть виды, которые накапливают азот, калий и йод, поэтому обладают большой пищевой ценностью для животных. Многие водоросли покрыты студенистым веществом, позволяющим им сохранять влагу, если они находятся в зоне отлива. Из него получают агар, служащий основой питательных сред для выращивания бактерий и грибов. Альгинат, выделяемый из бурых водорослей, используется для предотвращения образования кристалликов льда при изготовлении мороженого.

В докембрийских отложениях обнаружены останки многоклеточных. Клетка с этого времени стала воспроизводить не только свою структуру, но и организацию многоклеточного организма. Возник *онтогенез* — индивидуальное развитие многоклеточной особи, и степень его совершенства стала определять верность воспроизведения клеточной организации. В процессе эволюции животные становились крупнее, их организмы усложнялись, и клетки все более специализировались. Уже у водорослей клетки *специализируются*: одни отвечают за фотосинтез, другие — за размножение и т.д.

К многоклеточным организмам надцарства эукариотов относят растения, грибы и животных. Биологи классифицируют живые организмы в связи с их эволюционным родством, поэтому считается, что многоклеточные имели своими предками проститы, а те произошли от монер. Но эти три многоклеточных царства произошли от разных проститов.

Вирусы в 50 раз меньше бактерий (20–300 нм). Они обладают генетическим материалом (ДНК или РНК), т.е. их структура способна воспроизводить себя, но лишь в чужой клетке. Проникнув в нее, вирусы как бы отключают хозяйскую ДНК и заставляют ее производить только вирусы. Русский ботаник и микробиолог Д.И.Ивановский выделил инфекционный экстракт из растений табака, пораженных мозаичной болезнью (1892 г.). Когда экстракт пропустили через фильтр, инфекционные свойства остались в отфильтрованной жидкости. Нидерландский микробиолог М.Бейеринк ввел в 1898 г. в научный оборот термин «*вирус*» (лат. *virus* «яд»), чтобы подчеркнуть их инфекционную природу. Впоследствии выяснили, что вирусы по химической природе являются нуклеопротеинами, но размеры этих частиц (меньше 0,5 длины световой волны) не позволяли их исследовать в световом микроскопе. Многие не считают вирусы живыми. Существуют вирусы, нападающие на бактерий, — *бактериофаги*. Считают, что вирусы произошли от нуклеиновой кислоты, потерявшей способность воспроизводить себя вне клетки-хозяина и приобретшей паразитический «образ жизни».

Вирусы герпеса или гриппа имеют специальную защитную оболочку, образованную из мембраны клетки-хозяина. Оболочки вирусов часто построены из повторяющихся субъединиц, способных кристаллизоваться и образующих высокосимметричные структуры. Эти вирусы поражают лимфоидную ткань и вызывают у человека различные ОРЗ. Вирус табачной мозаики, с которого началось изучение вирусов, содержит РНК и 2130 белковых субъединиц, которые вместе с РНК образуют структуру со спиральной симметрией.

Многоклеточная организация не только повышает эффективность поглощения света фотосинтезирующими бактериями, но и дает другие преимущества. Каждая группа многоклеточных организмов (растений, животных и грибов) имеет свой план строения, приспособленный к своему образу жизни, а у каждого вида в процессе эволюции сложилась определенная разновидность этого достаточно гибкого плана. Классификация Линнея основывалась на сходстве строения. Когда поняли, что все организмы связаны с какими-то древними формами жизни, появилась классификация на основе эволюционного родства — эволюционная теория. Поскольку внешнее сходство свидетельствовало о наличии родственных связей, обе классификации оказались похожими. Сейчас существуют разные комиссии по классификации животных, растений и бактерий.

Наличие слаженной *системности* в клетке (ядро, рибосомы, митохондрии и др.) отражает системность и на

уровне многоклеточных организмов. Это — совокупность сосудистой, дыхательной, нервной, пищеварительной систем. По концепции русского физиолога П.К.Анохина, эта *функциональная системность*, когда функционирование одних частей или систем невозможно без содействия других, обеспечивает целостность каждой системы, когда процессы на низших уровнях организации определяются функциональными связями на высших уровнях. Вся история развития живого организма, физиологии животных и человека подтверждает наличие функциональной системности на онтогенетическом уровне (рис.34).

Тканевый подуровень представлен тканями, объединяющими клетки определенного строения, размеров, расположения и сходных функций. На этом уровне происходит специализация клеток. Ткань образуют клетки одного типа. Ткани возникли вместе с многоклеточностью в филогенезе. У многоклеточных они образуются в онтогенезе как следствие дифференциации клеток. У животных несколько типов тканей: мышечная, из которой состоит сердце, или *эпителий* (греч. *epi* «на, над, сверх» + *thele* «сосок»), покрывающий тот или иной орган и выполняющий защитную, выделительную и всасывающую функции (например, кожа). У растений различают меристематическую, защитную, основную и проводящую ткани.

Органный подуровень представлен органами организмов. Каждый орган состоит из многих тканей, каждая ткань образуется особыми клетками. При большем увеличении в клетках можно обнаружить *органеллы*, выполняющие свой набор функций. В ядре хранится генетическая информация; в секреторных (лат. *secretio* «отделение») гранулах запасаются вещества, которые потом выделяются из клетки. Наружная мембрана контролирует поступление веществ внутрь клетки и выход из нее. Органелла выполняет свою функцию через серию сопряженных химических реакций, каждая из которых катализируется *ферментом* (лат. *fermentum* «закваска»). *Органеллярная организация* клетки играет важную роль в ее функционировании, иначе упорядоченная активность клетки была бы невозможна.

Организменный подуровень представлен самими организмами. На этом уровне происходит декодирование и реализация генетической информации, создание структурных и функциональных особенностей, свойственных организму данного вида.

Популяционный подуровень отражает надорганизменную систему, обладающую определенным генофондом и определенным местом обитания. В популяциях начинаются эволюционные преобразования и выработка адаптивной формы.

Видовой подуровень определяется видами животных, растений и микроорганизмов. В составе одного вида может быть много популяций, поскольку представители вида могут иметь много мест обитания и занимать разные экологические ниши. Вид является единицей классификации живых существ и продуктом эволюции. Одни виды могут сменять другие виды.

19.2. СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИИ ОСНОВНЫХ ОРГАНЕЛЛ КЛЕТКИ

Ядро — основная часть клетки. В ядре различают кариоплазму, хроматин и ядрышко. Ядро расположено в центре клетки, окружено ядерной мембраной и содержит ДНК. Под электронным микроскопом ядро беспорядочно зернисто, а в одной его части зернистость резко возрастает, образуя ядрышко. **Ядрышко** (иногда их несколько) — это скопление рибосомальных белков и частей рибосом (*p*РНК), в основе которого лежит участок хромосомы, определяющий ее структуру, несущий ген. В растительных и животных клетках ДНК присутствует в виде структур, размером около 1 мкм — хромосом (греч. *chroma* «цвет, краска»), число которых постоянно для каждого вида. **Хромосомы** — это самостоятельные ядерные структуры, состоящие из двух продольных нитевидных половинок — сестринских *хроматид* (по внешнему виду их разделяют на равноплечие, неравноплечие и палочковидные). Клеточное ядро окрашено ядерными красителями почти равномерно, в микроскоп видна только его зернистость. Основные красители связываются *нуклеиновыми кислотами*. **Кариоплазма** — жидкая фаза ядра, в которой находятся растворенные продукты жизнедеятельности.

Ядру, содержащему хромосомы (с ДНК) принадлежит ведущая роль в явлениях наследственности. Функции ядра описаны в предыдущей главе.

Цитоплазма — это живая часть клетки, помимо ее ядра. Снаружи она окружена клеточной мембраной, а внутри — ядерной. Пространство между ядром и внутренней поверхностью плазматической мембраны заполнено *нитеями клеточного матрикса*, который определяет форму клетки и принимает участие в функциях, связанных с движением (деление клетки и ее перемещение, внутриклеточный транспорт везикул и органелл). Матрикс обеспечивает и структурную основу метаболизма, определяя пространственное размещение молекулярных компонентов клетки, занятых в процессе жизнедеятельности. В ее состав входят рабочие части клетки: рибосомы, эндоплазматическая сеть (ЭПС), пластиды, лизосомы и пр. Среди клеточных органелл особую роль играют *хлоропласты* клеток зеленых растений и *митохондрии* любых организмов. В хлоропластах происходит связывание энергии солнечного света в процессе фотосинтеза. В митохондриях же извлекается энергия, заключенная в химических связях поступающих в клетку питательных веществ.

Митохондрии (греч. *mitos* «нить» + *chondrion* «зернышко, крупинка») — *энергостанции клеток* — наблюдали в световой микроскоп, как самые крупные *клеточные органеллы*. Они входят в состав любой клетки, по строению похожи на клетки прокариот, имеют округлую форму, а при соединении нескольких рядов могут выглядеть как нити с длиной менее 1 мкм. Внутри митохондрий находятся окислительные ферменты, РНК, ДНК и рибосомы, отличающиеся от цитоплазматических. В ее мембраны встроены ферменты, участвующие в процессах преобразования энергии пищевых веществ в энергию АТФ, необходимую для жизнедеятельности (см. гл.18). В клетках растений имеются пластиды (хлоропласты, хромопласты и лейкопласты), которые тоже имеют двухмембранное строение, как и митохондрии.

Хлоропласты (греч. *chloros* «зеленый» + *plastos* «вылепленный, образованный») — особые органеллы в растительных клетках. Пигмент, окрашивающий их в зеленый цвет и поглощающий энергию солнечного света, назван *хлорофиллом* (греч. ...*phyllon* «лист»). При его участии хлоропласты синтезируют из воды и двуокси углерода глюкозу — основное органическое вещество, которым питается все живое. Без процесса фотосинтеза вряд ли была бы возможна жизнь. С помощью электронного микроскопа установлено, что хлоропласт окружен двойной мембранной оболочкой, как и митохондрии. В ней заключено основное вещество — *stroma* (греч. *stroma* «подстилка»), заполненная множеством пластинчатых структур — ламелл. **Ламеллы** расположены парами, на концах слипаются и окружают каждую цистерну, которые в хлоропластах сильно утолщены. В строме видны и крупные белые гранулы — это крахмальные зерна; значит, здесь продукт фотосинтеза — глюкоза — сразу же переводится в нерастворимый крахмал. Выяснение связи структуры хлоропластов с их функциями важно для осуществления реакции фотосинтеза «в пробирке» и возможности управлять этим процессом, что является одним из шагов на пути избавления человечества от забот о пропитании (рис.12.3).

Реснички и жгутики относят к органоидам движения. Они представляют выросты мембран размером около 0,25 мкм, внутри которых находятся тоненькие трубочки. Такие органоиды есть у многих клеток — у простейших, у одноклеточных водорослей, у сперматозоидов, в клетках дыхательного эпителия.

Эндоплазматическая сеть (ЭПС) — это сеть каналов в цитоплазме всех клеток, составляющая до 30–50% объема клетки. По ЭПС синтезированные вещества транспортируются в аппарат Гольджи; сеть делит клетку на отсеки и даже участвует в синтезе белков. **Гранулярная ЭПС** состоит из мембранных мешочков, покрытых рибосомами, на них синтезируются белки, которые потом поступают внутрь каналов, где приобретают третичную структуру. На мембранах *гладкой сети* синтезируются липиды и углеводы, поступающие потом тоже внутрь каналов.

Аппарат Гольджи (АГ) — система полостей, каналов, пузырьков, образованная гладкими мембранами. Эта органелла, обнаруженная во всех эукариотических клетках, состоит из множества хорошо уложенных мешочков, которые содержат олигосахариды — длинные цепи из простых сахаров. Стопки АГ обладают прецизионной внутренней структурой из трех отделов, специализирующихся на разных типах модификации белков. Белок, проходя через них, химически модифицируется в соответствии со своим предназначением, белки сортируются и отправляются по нужному адресу.

АГ наиболее ярко выражен в железистых тканях, поэтому посчитали, что он связан с *железами внутренней секреции*. В пузырьках накапливаются вещества, которые синтезируются и транспортируются по сети. В АГ эти вещества подвергаются химическим превращениям, потом упаковываются в мембранные пузырьки и выбрасываются из клеток в виде секретов. В структуре АГ образуются *лизосомы*. В железистых клетках неподалеку от *диктосом*,

на которые может распадаться структура АГ, особенно много митохондрий. Если заблокировать клеточное дыхание, пузырьки Гольджи не отделяются от диктосом, и прекращается образование клейкой слизи, выделяемой раньше и состоящей из углеводов. Низкомолекулярный сахар полимеризуется в макромолекулы и выделяется. Диктосомы участвуют в сборке полисахаридов. Так, в них у мяты образуются эфирные масла. То есть *синтез материала клеточной оболочки — одна из основных функций диктосом*.

Изучение диктосом позволило проследить за процессом выделения клетки. При соприкосновении со своей элементарной мембраной пузырька Гольджи, они как бы сливаются друг с другом, и в месте соприкосновения образуется «ямка». Пузырек, похожий на шарообразный кувшин, повисает на плазмолеме, а содержимое «кувшина» как бы выдавливается из него. Так выводится содержимое бывшего пузырька Гольджи из клетки. Чтобы избежать хаоса биохимических процессов, каждый из множества новообразованных белков должен быть определенным образом модифицирован, отсортирован и с большой точностью доставлен в соответствующий отдел. Перемещения макромолекул в клетке связаны с АГ.

19.3. ФУНКЦИИ КЛЕТОЧНЫХ МЕМБРАН. РАБОТА «ИОННОГО НАСОСА»

Клеткам присуще мембранное строение — это одно из положений клеточной теории. Среди мембранных органоидов: наружная цитоплазматическая мембрана (НЦМ), эндоплазматическая сеть (ЭПС), аппарат Гольджи (АГ), лизосомы (Л), митохондрии (М), пластиды (П). В основе всех этих органелл лежит биологическая мембрана, все они имеют единый план строения. Мембранные структуры — арена важнейших жизненных процессов.

Биологическая мембрана (клеточная или плазматическая) — пленка, покрывающая клетку, и настолько тонкая, что ее удалось обнаружить лишь с помощью трансмиссионного электронного микроскопа. Все мембраны построены по одному плану, всегда слоистые. Поперечный разрез показывает, что по обе стороны внутренней, более светлой, линии расположены более темные. Мембраны были открыты более века назад, но их роль в механизмах жизнедеятельности клеток до недавнего времени сводили, в основном, к *барьерной функции*. Как показали опыты, малые молекулы быстрее усваиваются живой клеткой, чем большие, и вещества, растворимые в воде и нерастворимые в жирах, проникают в клетку медленнее, чем растворимые в жирах. Значит, мембраны содержат жироподобные вещества — *липиды* (греч. *lipos* «жир») и белки, способные связывать воду.

Липиды в мембранах содержат фосфорную кислоту, потому их называют *фосфатидами*. Пример — лецитин. Капля такого липида мгновенно растекается по водной поверхности, и пленка образует мономолекулярный слой. Они обладают водоотталкивающими, или гидрофобными (греч. *phobos* «страх, боязнь») свойствами. **Фосфорная кислота** растворима в воде, или гидрофильна (греч. *philia* «любовь»). Она как бы притягивает воду, а водоотталкивающие остатки жирных кислот, расположенные на другом конце молекулы, как бы избегают ее. Так как

Вакуоли — пространства, заполненные клеточным соком. В них часто растворены вещества, образующиеся в клетках как своего рода отходы обмена веществ, так как растения не имеют специальной выделительной системы, как животные и человек. Получить их фотографии трудно, так как на границе между густой цитоплазмой и жидким содержимым вакуоли при фиксации возникает разрыв.

Выше перечислялись и как-то связывались с составом и строением компонентов клетки их основные функциональные особенности. Конечно, частично они перекрываются, но синтез белка, транспортирование, дыхание, фотосинтез, наследственность не исчерпывают всех процессов жизнедеятельности клетки. Во всех клетках можно выделить большое число разных пузырьков, гранул, пластинок, нитевидных структур и т.п., которые все время меняются и по внешнему виду, и по составу, — лизосомы, фрагмосомы и т.д. Поскольку перечисленные выше функции относятся, скорее, к процессам синтеза, то разумно предположить, что для равновесия клетки должны быть подвержены и процессу распада. Реакции разложения катализируются многими ферментами, их деятельность строго контролируется, чтобы они не мешали синтезу.

гидрофобные концы липидных молекул не могут сближаться ни с клеточной оболочкой, ни с протопластом, они обращены друг к другу «головами». Так образуется *бимолекулярный слой*, у которого наружу выставлены гидрофильные части. Дополнительные гидрофильные белки в мембране повышают устойчивость описанного выше липидного бимолекулярного слоя (рис.35).

Структуру мембран — внутри «масло» (двойная липидная пленка), снаружи «хлеб» (белковая оболочка) — называют *эндвич-структурой*. Такую структуру химик могут получать искусственно. Мембрана — двумерно ориентированный раствор разных белковых молекул и белковых кластеров из нескольких сотен молекул в вязком слое. Белковые молекулы в большинстве своем свернуты в клубки (*глобулы*) и асимметричны. Их выступающие из мембраны части обладают электрическими зарядами, причем на внешней поверхности суммарный заряд оказывается отрицательным. Молекула фосфолипидов сильно асимметрична. Одна ее часть несет электрические заряды, образуя «полярную» головку, другая — электронейтральный углеводородный «хвост». В водной среде полярные головки выступают из воды, а углеводородные хвосты, из-за гидрофильных и гидрофобных взаимодействий, погружаются. Так как все белки участвуют в диффузном движении, их распределение по мембране в каждый момент случайно. Коэффициент диффузии белковых молекул по мембране порядка $5 \cdot 10^{-10}$ см²/с, а для гемоглобина в водном растворе — на три порядка больше. Значит, вязкость мембранной фазы на три порядка больше, чем у воды. Некоторые белки способны только к поступательному перемещению, другие способны и вращаться в плоскости мембраны, есть и такие, которые перемещаются с одной стороны мембраны на другую. Последние участвуют в транспортировании веществ через мембрану.

Ионный перенос — проявление мембранной возбудимости. Через мембрану осуществляется обмен с внешней средой — питание и выделение отходов. Несмотря на хаотические движения, молекулы стремятся переместиться в сторону меньшего давления (перемещение по градиенту давления, или концентрации, называют *диффузией*). Мембрана обеспечивает *стабильность химического содержания клетки* и, обладая избирательной способностью, регулирует обмен с окружающей средой. Вещества, растворимые в липидах, проходят через мембрану, не растворяясь в ней. Перемещение ионов и органических мономеров типа аминокислот и глюкозы происходит много быстрее, чем этого можно было бы ожидать от полярных молекул. Имеет место и перемещение против градиента концентрации — так называемый *активный транспорт*, требующий затрат энергии. Наиболее изучен такой активный транспорт: процесс откачки ионов натрия из клетки и накачки в нее ионов калия, в котором «*Na – K — насос*» использует энергию АТФ. Этим путем откачиваются ионы натрия из клетки и накачиваются ионы калия *против градиента концентрации*.

Специальные белковые молекулы в мембране переносят различные вещества. Так, с их помощью клетки печени, эритроциты и мышечные клетки быстро поглощают глюкозу. В настоящее время выяснены пять молекулярных форм переносчика глюкозы, причем каждая из них приспособлена к нуждам той ткани, в которой она содержится. Посредством такой *облегченной диффузии* вещества могут выводиться из клеток. Через мембрану осуществляется и *пассивный транспорт*. Таков осмос — прохождение воды через полупроницаемую мембрану. Могут через нее и путем *диффузии* проникать вещества, растворимые в липидах (жирные кислоты и эфиры), и некоторые ионы.

Клеточная мембрана обеспечивает и обмен между цитоплазмой и внешней средой, из которой в клетку поступает вода, ионы, различные молекулы, а выводятся продукты обмена веществ и синтезированные в клетке вещества. *Транспортные функции* не ограничиваются маленькими молекулами. Благодаря *фагоцитозу*, открытому и описанному И.И.Мечниковым (1882 г.), в клетку могут проникать и крупные молекулы биополимеров. Твердая частица, оказавшаяся вблизи клетки, окружается выростами мембраны и затягивается в этом «пузырьке»

внутри. Процесс фагоцитоза свойственен простейшим, лейкоцитам, клеткам капилляров костного мозга, печени, надпочечников, селезенки. Существует и еще один вид активного транспорта — *пиноцитоз*. Таким путем происходит поглощение клеткой жидкости в виде мелких капель с растворенными в них высокомолекулярными веществами. Капли захватываются «выростами», погружаются в цитоплазму и усваиваются. Это явление свойственно животным клеткам.

Регулируя обмен между клеткой и окружением, мембраны обладают рецепторами, воспринимающими внешние сигналы (свет, движение бактерий к источнику пищи, ответы на гормоны). Безусловно, важно, что на них происходит превращение энергии. Так, на внутренних мембранах хлоропластов происходит фотосинтез, а на внутренних мембранах митохондрий — окислительное фосфорилирование. Компоненты мембран движутся и перестраиваются, поскольку созданы из белков и липидов, что определяет одно из важнейших свойств живого — *раздражимость*.

Роль мембран стала вырисовываться иначе после того, как английские ученые химик Д.Кроуфут-Ходжкин и физиолог А.Хаксли сформулировали *теорию проведения нервного импульса* (1952 г.), а Е.Сюзерленд открыл (1972 г.) существование на возбудимой мембране переносчика информации внутрь клетки (молекулы α АМФ — циклического аденозинмонофосфата). Этот вопрос все еще недостаточно изучен и является предметом особого интереса, так как через познание механизма функционирования *возбудимых мембран* лежит путь к диагностике и лечению многих болезней.

Возбудимость — реакция клетки на воздействие, происходящую с многократным усилением по энергии. Возбудимость — общее свойство клеток, не только сердечных, мышечных или нервных. Состояние мембраны отражает состояние клетки в целом. *Возбудимыми* называют мембраны, окружающие клетку и способные менять свою проницаемость для ионов при различных химических и физических воздействиях. Функционирование таких мембран обеспечивает не только внутриклеточную регуляцию, но и управление и синхронизацию работы соседних клеток и даже органов с помощью химических и электрических каналов связи, которые составляют основу *гормональной и нервной регуляции*. Основные компоненты этих систем находятся в мембранах.

19.4. ПРОЦЕССЫ ФОТОСИНТЕЗА И КЛЕТЧНОГО ДЫХАНИЯ

От фотосинтеза, который делает энергию и углерод доступными для живых организмов и обеспечивает выделение кислорода в атмосферу, зависит все живое на Земле. Менее 1% солнечной энергии, падающей на Землю, поглощается растениями. Они связывают CO_2 атмосферы (и воду) в количестве около $150 \cdot 10^{12}$ кг сухого органического топлива (или 1 кг сухого вещества с 1 м^2) за год. Часть этого органического вещества поглощается травоядными животными, которыми, в свою очередь, питаются другие животные и человек. Растительные и животные остатки разлагаются бактериями и грибами до уровня исходных неорганических веществ. Затем этот круговорот замыкается: энергия солнечного излучения, поглощенная растениями, переходит в тепло и излучается Землей в космос. И жизнь

на Земле — процесс поглощения солнечного света. Человечество зависит от *фотосинтеза* и потому, что оно *использует ископаемое энергетическое топливо*, образовавшееся за миллионы лет. Годовая фиксация углерода в процессе фотосинтеза оценивается в $75 \cdot 10^{12}$ кг. Из общего количества солнечной радиации, падающей на Землю, до поверхности доходит примерно 50%, а из нее только 25% лучей имеют длины волн, подходящие для фотосинтеза, 1% энергии доходит до растений, а 0,4% — используется ими для увеличения своей биомассы (рис.36).

Автотрофные («самопитающиеся») организмы осуществляют фотосинтез, не питаются другими организмами. Такие есть среди бактерий, источник энергии для них — химические реакции. Но запасы химической энергии на

Земле ничтожны по сравнению с энергией, поступающей от Солнца.

В конце XVIII в. считалось, что растения получают питательные вещества *из воды, находящейся в почве*. Голландский естествоиспытатель Я. ван Гельмонт проделал опыт по изучению процесса питания растений. Он посадил дерево ивы весом в 2,3 кг в кадку с землей весом 90,8 кг и, лишь поливая его, обнаружил через 5 лет, что вес почвы почти не изменился, а дерево стало весить 76,9 кг. Английский химик Дж. Пристли, открывший кислород (1774 г.) и получивший хлористый водород и аммиак, обнаружил, что растения и животные по-разному *меняют состав* окружающего их воздуха. Помещая в закрытый сосуд горящую свечу и мышь, он отметил, что свеча гасла, а мышь издыхала. Но, когда он помещал в сосуд живое растение, свеча после этого какое-то время горела, хотя сосуд был по-прежнему закрыт. Так Пристли установил, что «в растениях присутствует что-то способное исправлять воздух, испорченный горением свечи». В 1782 г. Ж. Сенебье сумел показать, что растения *поглощают* CO₂ и одновременно *выделяют* O₂.

К началу XIX в. было выяснено, что растения могут выделять кислород *только на свету*, отсюда и название — *фотосинтез*. Австрийский врач Я. Ингенхауз написал *первое уравнение процесса*, еще не зная, какие растительные ткани образуются. С помощью микроскопа нашли, что крахмальные зерна при фотосинтезе растут, т.е. при фотосинтезе возникают углеводы, имеющие своим источником CO₂.

Исходные соединения для фотосинтеза — неорганические вещества: вода и двуокись углерода. Они энергетически бедны, но из них строятся более сложные богатые энергией питательные вещества. В качестве побочного продукта фотосинтеза выделяется *молекулярный кислород*. Процесс фотосинтеза обычно представляют уравнением: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$.

Реакция идет за счет *энергии света и хлорофилла*, и получают *молекулы кислорода и сахара*. В 1941 г. с помощью масс-спектрометра методом изотопов было установлено, что *источником кислорода служит вода*. (Обычно кислород имеет массовое число 16, но есть и стабильный изотоп с массовым числом 18.) Оказалось, что на первой стадии фотосинтеза получается *водород путем расщепления воды*. Энергию для этого растения берут у света (реакция «*фотолиза*»), выделяя кислород как ненужный побочный продукт. Во второй стадии водород соединяется с двуокисью углерода, и образуется углевод. Присоединение водорода — один из примеров реакции восстановления. Для первой стадии характерны световые реакции, для второй свет не нужен, и хотя они тоже происходят на свету, их называют «*темновыми*» (рис.37).

В конце 50-х годов выяснили, что каждая из стадий реакций фотосинтеза происходит в разных частях листа: первая — в мембранах хлоропластов, вторая — в их *строме*. Арион показал (1958 г.), что *первая стадия во многом аналогична дыханию*, при котором происходят фосфорилирование АДФ с затратами энергии, перенос электронов в мембранах и *преобразование световой энергии в химическую*. Дыхание у растений — процесс окисления углеводов с освобождением энергии, необходимой для жизне-

деятельности, он происходит в митохондриях. У аэробных организмов поглощается O₂ и выделяется CO₂. Выделенная энергия идет на синтез АТФ. Поэтому процессы дыхания у растений и фотосинтез — две стороны обмена веществ — *диссимилиации и ассимиляции*.

Хлорофилл — зеленый пигмент хлоропластов, важен в процессе фотосинтеза — показал немецкий ученый Т.Энгельман в конце XIX в. Экспериментируя с водорослью спирогиры, он определил области спектра света, в которых выделение кислорода идет наиболее эффективно. Ими оказались красные и синие области, поглощаемые именно хлорофиллом, обеспечивая ему зеленый цвет. Другие пигменты хлоропластов (они имеют желтую или бурю окраску, наблюдаемую у листьев осенью, когда хлорофилл разрушается и уже не маскирует цвет листа) играют вспомогательную роль в этом процессе, перенося энергию (рис.38). Английский ученый Дж. Стоукс установил, что зеленый растительный пигмент состоит из смеси различных веществ (1864 г.). Русский физиолог и биохимик М.С.Цвет исследовал их с помощью изобретенного им метода *хроматографии*. Немецкий химик и биохимик Р. Вильштеттер разработал методы извлечения растительных экстрактов без повреждения молекул и детально исследовал хлорофилл, обратив внимание на аналогию с *гемоглобином крови*, за что был удостоен Нобелевской премии по химии за 1915 г. Его работы по изучению структуры хлорофилла продолжил химик-органик Х. Фишер, лауреат Нобелевской премии по химии за 1931 г.

Синтезировать молекулу хлорофилла удалось только в 1960 г. А.Калояну, Г.Колеру и Р.Вудворду (Нобелевская премия 1965 г.). Все эти исследования с хлорофиллом важны для консервации зеленых кормов, в которых потери питательных веществ обычно составляют более 50%. При определенной дозировке серной и соляной кислот, прекращающих процессы окисления в растительной массе, удалось обеспечить почти полное сохранение витаминов и белков. Выдающую роль в решении этих проблем сыграл финский биохимик А.Виртанен, создавший метод консервирования зеленых кормов (лауреат Нобелевской премии за 1945 г.).

Знаменитые опыты с хлореллой в 1946 г. провел американский биохимик М.Калвин, лауреат Нобелевской премии по химии за 1961 г. Он помещал зеленые водоросли в специальный сосуд и освещал их, одновременно пропуская CO₂ через воду, меченную изотопом C-14. При освещении изотоп включался в цепь фотосинтеза. Меняя время облучения (от 1 до 30 с), последовательно прослеживались разные этапы фотосинтеза. Калвин показал, что двуокись углерода фиксируется в форме фосфоглицериновой кислоты. Это было открытие — углерод просто подключался к одному из известных звеньев цепи углеводного обмена. Так было доказано, что *углерод входит в состав глюкозы и других сложных сахаров*. В последующем Калвин продолжал работы по применению открывшейся ему тайны фотосинтеза в повышении урожайности и развитию «*зеленой энергетики*».

Водоросли, составляющие огромную группу растений, являются фотосинтезирующими организмами, выделяющими кислород. Они эволюционировали в водной среде и освоили ее. Считают, что из сине-зеленых водорослей

произошли все хлоропласты растений. На долю океана приходится 50% мировой первичной продукции в виде фиксированного углерода, и ее образуют водоросли, хотя фотосинтез происходит только в поверхностных слоях, куда проникает солнечный свет и где лимитирующим фактором является доступность биогенных элементов, особенно азота и фосфора. *С водорослей начинаются почти все пищевые цепи* (планктон, рыбы). Благодаря фотосинтезу поддерживается уровень кислорода в атмосфере, 50% которого поставляют водоросли. Найдены ископаемые остатки сине-зеленых водорослей, живших 3 млрд лет назад, а первые организмы, освоившие сушу, возникли лишь 420 млн лет назад. Вероятно, при переходе на сушу главной проблемой было *обезвоживание* — нужно было выработать приспособления для добывания и запасаения воды. Для фотосинтеза и дыхания нужно, чтобы обмен двуокиси углерода и кислорода происходил не с окружающим раствором, а с атмосферой. Проблематично было и размножение растений без воды и питания. На суше фотосинтез происходит над поверхностью земли на свету, а минеральные соли и вода находятся в земле, поэтому часть растения должна быть в темноте под землей, а часть — в воздухе. Кроме того, водная среда обеспечивает постоянство условий внешней среды, а воздух более подвержен изменениям таких параметров, как температура, интенсивность освещения, концентрация ионов в среде и кислотность рН.

В настоящее время выявлены молекулярные механизмы одного из типов фотосинтеза у бактерий. Спектроскописты определили последовательность и временные параметры световых реакций фотосинтеза и скорости взаимодействий. Пикосекундная абсорбционная спектроскопия позволила разрешить временные интервалы до триллионной доли секунды. Интенсивности двух лазерных лучей, проходящих

через исследуемую кювету, были столь малы, что не нарушали процессов фотосинтеза, короткая вспышка только инициировала фотосинтез почти одновременно во всех частях исследуемой области. Световой луч контролировал изменение состава образца.

Удалось проследить путь электрона от одной мембраны до другой вследствие поглощения фотона. Специалисты по *рентгеноструктурному анализу* расшифровали пространственную структуру области, где происходят световые реакции, и выяснили взаимное расположение в ней различных молекул. *Молекулярные генетики* установили локализацию и организацию генов, кодирующих основные компоненты в этой области, так что теперь можно манипулировать этими генами. Д.Юван сумел так изменить их, что получил бактерии, отличающиеся от обычных. Это открывает новые *возможности генной инженерии* и позволяет досконально понять процессы. Особенностью фотосинтеза этих бактерий было отсутствие выделения кислорода в отличие от зеленых растений, но в фотосинтезе принимают участие те же молекулы хлорофилла. Интерес к этим бактериям связан с тем, что они получают необходимую энергию разными способами, а не только от света.

Хемосинтез — процесс синтеза органических веществ из неорганических за счет энергии химических реакций, протекающих при окислении неорганических веществ. Хемотрофы — бактерии нитрификаторы, серобактерии, железобактерии и пр. — в качестве источника водорода используют не воду, а H_2 или H_2S , поэтому они кислород не выделяют. И за счет только процесса хемосинтеза аэробные организмы жить бы не смогли.

На клеточном уровне организации действуют управляющие ее работой механизмы.

Глава 20. КОНЦЕПЦИИ ЭВОЛЮЦИОННОЙ БИОЛОГИИ

20.1. ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕЙ ЭВОЛЮЦИИ В БИОЛОГИИ

Развитие во времени — неотъемлемое и характерное свойство живой природы. *Идеи единства и развития природы* можно проследить с древнейших времен. Проблемы происхождения и эволюции жизни на Земле были в центре философских и религиозных систем. Так, Г.Лейбниц, развивая идеи Аристотеля, провозгласил принцип градации и предсказал существование переходных форм между растениями и животными. В России эти идеи активно поддерживал А.Н.Радищев. В дальнейшем этот принцип был развит в представлении о «лестнице существ» от минералов до человека и Бога, доказывая *трансформизм* живой природы. Так выявлялась не эволюция, а общность и сходство форм и усложнения организмов. Но сопоставлялись время существования Земли и формирование форм живого на ней. Бюффон обосновывал в своей «Естественной истории» историю Земли и доказывал единство происхождения живого планом строения. Кант в «Космогонии» говорил о развитии живого мира в течение миллионов лет.

Линней считал, что близкие виды внутри рода могли развиваться естественным образом без участия высших сил.

Эволюционные представления были характерны для К.Вольфа, М.В.Ломоносова и А.Н.Радищева. Ломоносов считал изменения в неживой природе причиной изменений мира живого, по останкам вымерших форм судил о условиях существования их в далекие времена. Он писал, что время, необходимое для создания организмов, больше, чем определяется церковным исчислением. Но эти идеи формировали пока только представление о последовательности природных тел. *Ограниченную трансформацию видов* допускал Ж.Бюффон, считая, что разные типы животных имеют разное происхождение и возникли в разное время. Эта концепция обобщала многие наблюдения и факты, выделяла идею глубокой взаимосвязи между видами, подвидами, родами и другими таксонами, подготавливая почву для эволюционизма. Так до конца XVIII в. господствовала мысль о «целесообразности порядков в природе» (сотворении кошек для пожирания мышей и т.п.). Постепенно возникал вопрос о возникновении такой целесообразности. Общество не могло еще воспринять идеи эволюции, так как обсуждались не доступные для проверки масштабы времен.

Идею эволюции живого перевел на уровень теории эволюции Ж.-Б.Ламарк. Он считал, что Бог сотворил материю и движение, а далее развитие происходило по естественным причинам. Опираясь на многочисленные факты изменчивости видов, Ламарк в книге «Философия зоологии» (1809 г.) выдвинул гипотезу о *механизме эволюции*, основанном на двух предпосылках: *наследование приобретенных признаков и упражнение или неупражнение* частей организма. Он представил эволюционное обоснование «лестницы существ», основанное на принципе градации (внутреннего стремления к совершенству) и на принципе изначальной целесообразности реакции организма на изменение внешней среды (признание возможности прямого приспособления). Далее Ламарк формулировал два закона: 1) изменение привычек следует сразу за изменением условий и 2) эти изменения передаются по наследству. Основа эволюции — врожденная способность к самосовершенствованию, фактор явно нематериальный: «творить может только Бог, тогда как природа может только производить», а изменения во внешней среде могут изменить формы поведения, поэтому органы или структуры способны приобрести новые функции, а эти новые функции органов и изменения в них могут быть переданы потомкам. Так вытянулась шея у жирафа, увеличились перепонки у водоплавающих, развивается мускулатура при занятиях спортом. Эта часть учения Ламарка была отвергнута, как противоречащая появляющимся новым знаниям о механизме наследования, для нее еще не пришло время. Большую роль в возникновении новых видов Ламарк отводил перемена климата и гидрогеологического режима. Политические страсти внутри биологии скомпрометировали важность идей типа «наследуется все благоприобретенное». Как подчеркивал К.А.Тимирязев, Ламарк не сумел объяснить целесообразность организмов. Но «роль Ламарка в биологии колоссальна», — отметил современный генетик Л.Н.Серавин (1994 г.).

Предшественником идей Дарвина в России был зоолог К.Ф.Рулье, развивавший идеи возникновения органического мира из неорганического. Он выделял наследственность и изменчивость в качестве основных свойств организмов, говорил и о постепенном изменении организмов под влиянием внешних условий.

Учение о катастрофизма отражало идеи развития к началу XIX в. Французский зоолог Ж.Кювье выделял 4 типа животных — позвоночные, мягкотелые, членистые и лучистые. И с каждым из них он сопоставлял некий «план композиции», некую «творящую силу», которая после очередной катастрофы в геологической истории обеспечивает восхождение органических форм. Тем самым геологическая эволюция планеты связывалась с эволюцией живого, признавалась роль катастроф и неравномерности темпов преобразований в природе, что не потеряло своего значения и поныне. Ему возражал У.Смит, один из основоположников *биостратиграфии*, отмечавший непрерывность распространения сходных видов в близких по возрасту слоях.

Концепцию униформизма сформировали противники теории катастроф. Дж.Геттон, Ч.Лайель, М.В.Ломоносов критиковали идеи Кювье за неопределенность причин

катастроф, за укорачивание возраста Земли. Под впечатлением успехов классической механики они считали мир познаваемым и предлагали опираться на преемственность настоящего и прошлого, выделяя непрерывность действия законов и факторов в истории Земли и возможность обратимости явлений. При эволюции живого Лайель допускал возможность актов божественного творения, демонстрируя прогрессивные изменения ископаемых останков. Униформисты считали, что вымирание несовместимо с естественным образованием новых видов и потому предполагали участие творца. Фактически они свели историю планеты к цикличности и случайным изменениям.

Униформизм, как и ламаркизм и катастрофизм, предвзвляли *теорию естественного отбора*, частично конкретизировали идею эволюции. Английский экономист Т.Мальтус привлек внимание к репродуктивному потенциалу человека и указал на экспоненциальный рост численности населения. Он в 1788 г. опубликовал «Трактат о народонаселении», в котором убедительно и ярко обрисовал, к чему может привести ничем не сдерживаемый рост населения. Благодаря Дарвину выражение Мальтуса «*борьба за существование*» приобрело широкую известность. Они оба считали ее результатом несоответствия между быстрым ростом популяции и ограниченностью пищевых ресурсов. Идеи Мальтуса и Лайеля оказали большое влияние на Ч.Дарвина. Он верил в познаваемость законов природы, в возможности объяснения наблюдений. Дарвин считал проблему происхождения человека связанной с эволюцией неорганического и органического мира. К середине XIX в. в разных областях биологии был накоплен огромный фактический материал, который нуждался в обобщении. Да и практика сельского хозяйства требовала теории, которая бы открыла пути селекции.

Понятие «эволюция» в биологию было введено швейцарским ученым Ш.Бонне (1762 г.). Он понимал под этим термином не только саму идею развития, но и отмечал изменчивость и некий отбор в становлении форм живого. Ламарк объяснял изменчивость влиянием наследственности и внешних факторов — питанием, климатом, упражнением органов. Дарвин создал в 1859 г. развернутую теорию эволюции, обобщив отдельные эволюционные идеи и разрешив накопившиеся противоречия. У него эволюция определяется триадой: *наследственность, изменчивость и естественный отбор*.

Остовом теории эволюции путем естественного отбора послужил огромный материал, собранный и до Дарвина, и им самим. Ч.Дарвин, в юности собирающийся стать пастором, интересовался зоологией как любитель. Он предпринял пятилетнее морское путешествие на корабле «Бигль», во время которого занимался геологическими исследованиями, собирал ботанические, зоологические и палеонтологические коллекции. Кульминацией, с точки зрения формирования его эволюционных взглядов, явилось исследование флоры и фауны Галапагосских островов, где он увидел в действии процесс эволюции при сравнении близких видов вьюрков, ящериц, черепах, о чем он написал в своей первой книге (1839 г.). По прибытии в Англию он проанализировал историю селекции и выявил отличия между породами и сортами. Здесь он усмотрел творческое

начало в деятельности селекционеров, позволяющее накопить изменения в результате отбора.

Дарвин собрал обширный материал об *изменчивости организмов и видов* и отметил почти всегда *постоянную численность популяций*. Способность к размножению, свойственная всему живому, обеспечивает сохранение вида. Численность популяций на Земле контролируется различными факторами среды (пространство, свет, пища, тепло). Исследуя и сопоставляя огромный материал и находясь под впечатлением идеи Мальтуса, Дарвин начал понимать, что при интенсивной *конкуренции* между членами популяции любые изменения, благоприятные для выживания в данных условиях, повышают способность особи к размножению и оставлению плодовитого потомства. Но каждый вид производит больше особей, чем выживает их до взрослого состояния, а среднее число взрослых особей почти постоянно. Ненужные формы при этом отбрасываются путем нового механизма — *естественного отбора*. Черновой вариант своей теории он сделал в 1842 г.

Понятиям изменчивость и наследственность, которые Ламарк связывал с приспособляемостью, передаваемой по наследству и являющейся основой видообразования, Дарвин придал принципиальное значение. *Определенная изменчивость* — это способность всех особей определенного вида одинаковым образом реагировать на изменения среды, при этом изменения в организмах не наследуются (сейчас это — *адаптивная модификация*). *Неопределенная изменчивость* приводит к существенным изменениям в организме, которые наследуются с усилением в следующих поколениях (*мутация*, по современной терминологии). Она тоже связана с условиями окружающей среды, но не непосредственно. Дарвин считал, что именно такая изменчивость играет ведущую роль в эволюции.

Естественный отбор — механизм эволюции, материал для него — наследственная изменчивость. В нем Дарвин соединил многие биологические знания, в том числе опыт практической селекции.

А. Уоллес, один из основоположников *зоогеографии*, много путешествовал по Южной Америке и Юго-Восточной Азии. Он тоже читал Мальтуса и пришел к идеям, близким к теории Дарвина. Уоллес и Дарвин выступили с сообщениями на заседании Линнеевского общества. В 1859 г. Дарвин опубликовал свою книгу «Происхождение видов путем естественного отбора», она разошлась в первый же день и, говорят, по своему воздействию на человеческое мышление уступала только Библии. Эти идеи вызвали бурные дискуссии в обществе и церкви. Уоллес отрицал приложимость отбора к «возникновению человеческих способностей», а Э. Геккель, страстный сторонник Дарвина, назвавший его «Ньютоном органического мира», прилагал идею естественного отбора к развитию общества. Ботаник А. Н. Бекетов в работе «Гармония в природе» (1858 г.) привел обширные материалы об изменении растений в разных условиях и выделил их борьбу за существование. Русский князь, географ и геолог П. А. Кропоткин, известный как теоретик анархизма, много путешествовавший по Сибири, наблюдал перемещения больших масс животных, спасающихся от стихийных бедствий. На основе этого он выделил

в качестве факторов эволюции *взаимопомощь и кооперацию*.

Так пришли к представлению о том, что органический мир представляет некое единство, имеет свою историю, а его нынешнее состояние есть результат предшествующего. Заслуга Дарвина в том, что из сопоставления фактов борьбы за существование и всеобщей изменчивости свойств и признаков он вывел неизбежность избирательного уничтожения одних особей и размножения других — естественного отбора. Начинаясь с наблюдения, познание жизни продолжалось на уровне мыслительных процедур. В *классической биологии* эксперимент еще не был методом познания живого. Механистический детерминизм игнорировал функциональное единство живых систем, а телеологический подход основывался на целесообразности организмов. С теории эволюции Дарвина, в основе которой лежал *рациональный подход*, началось преодоление идеалистической тенденции в биологии. Ч. Дарвин похоронен в Вестминстерском аббатстве рядом с И. Ньютоном.

Учение Дарвина (наследственность, изменчивость и естественный отбор) за несколько лет вытеснило все антиэволюционные и креационистские концепции. При этом сопоставляли данные палеонтологии, сравнительной анатомии и эмбриологии (метод Геккеля). Данные *палеонтологии* доказывали существования эволюции живого. Это показал еще В. О. Ковалевский на примере развития вида лошадей, обнаружив существование предка с пятипалой конечностью, жившего 60 млн лет назад. Последовательные ряды ископаемых животных он выстроил в ряд для наглядности эволюционных изменений. (Такие ряды называют *филогенетическими*.) До конца XIX в. эволюционные идеи овладевали умами, строились филогенетические древа для всех крупных групп растений и животных. Существуют и *эмбриологические* доказательства эволюции. *Закон Геккеля–Мюллера* утверждает, что каждая особь в своем индивидуальном развитии (онтогенезе) повторяет историю развития своего вида (филогенез). К доказательствам относят и *наличие рудиментальных органов*, и явления атавизма. Существуют и *биогеографические* доказательства: сравнение животного и растительного мира разных континентов показывает, что различия внутри вида тем больше, чем дольше длилась их изоляция. *Биоразнообразие* — неизбежный результат отбора.

В результате изучения эволюции групп (*макроэволюции*) сформировался так называемый *классический дарвинизм*: установлена необратимость эволюции, принцип мультифункциональности органов и эволюции органов путем смены функции, биогенетический закон и др. Но многие ученые не приняли дарвинизм, и это неприятие и критика особенно усилились в период возникновения генетики, можно даже сказать, что распространение эволюционных идей сопровождалось в это время острой критикой теории естественного отбора. Отсутствие обнаружения переходных форм препятствовало принятию дарвиновских идей, а с появлением генетики естественный отбор все больше подвергался критике. Так, Ф. Дженкин показывал, что при скрещивании произойдет «растворение признаков», которые были единично поддержаны отбором. Основу такой критики составило отсутствие строгих доказательств

наследственной изменчивости, которые давала генетика (теория мутаций, учение о чистых линиях и принцип корпускулярной наследственности). В.Иоганнсен показал неэффективность отбора в чистых линиях (в потомстве одной самооплодотворяющейся особи). Г. де Фриз в 1889 г.

20.2. ПОНЯТИЕ О НЕОДАРВИНИЗМЕ И СИНТЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЭВОЛЮЦИИ

Постепенно стал складываться *синтез генетики и классического дарвинизма*. Уточнялась терминология. Сначала после опытов Вейсмана и появления мутационной гипотезы де Фриза были вскрыты закономерности распределения хромосом при клеточном делении.

Хромосомная теория наследственности, сформулированная А.Вейсманом, выдвинула *принцип невозможности передачи по наследству «благоприобретенных» признаков*. Отрезанные хвосты у мышей во многих поколениях даже не укорачивались. Приобретенные признаки не влияли на половые клетки, передающие признаки следующим поколениям, роль среды фактически сводилась к сортированию возникающих независимо от нее наследственных изменений. Требовалось *уточнение понятия изменчивости*. Т.Морган установил, что признаки, гены которых «сцеплены» в одной хромосоме, наследуются совместно. Поэтому и третий закон Менделя выполнялся не всегда. После обнаружения у дрозофилы групп сцепления генов по числу имеющихся хромосом эта теория оформилась (Т.Г.Морган, А.Стертевант и др.). В 1950 г. была найдена *тонкая структура гена* (С.Бензер), понят язык, на котором была записана *генетическая информация*. Эти генетические механизмы наследственности существенны и для понимания изменчивости как основы отбора.

Изменчивость — способность живых организмов приобретать новые признаки и свойства, она отражает взаимодействие организма с внешней средой. Различают *наследственную (генотипическую или мутационную)* изменчивость и *ненаследственную (модификационную)* изменчивость (вместо неопределенной и определенной изменчивости у Дарвина, соответственно). Первая связана с мутациями, возникает из-за изменения структуры гена или хромосом и служит *единственным источником генетического разнообразия внутри вида*. Причиной мутаций могут быть внешние жесткие излучения, химические причины и пр. мутагены (например, вирусы). Большая часть мутаций рецессивна и не проявляется у гетерозигот. Рекомбинации при половом размножении также порождают множественные мутации, которые приводят к *комбинативной изменчивости*, создающей материал для естественного отбора. Но новых видов при этом не образуется. При изменении внешних условий некоторые ранее вредные рецессивные мутации могут оказаться полезными, и их носители могут получить преимущество при естественном отборе. Мутации — фактор случайный, подчиняющийся статистическим законам. Поэтому они, как и перестройки генов, и волны численности популяции, не могут быть решающим фактором эволюции.

Модификационная изменчивость — это сходные изменения признаков у всех особей потомства популяции какого-то вида в сходных условиях существования. Она не затрагивает гены и не передается по наследству. Модификационные изменения адаптационны, т.е. приводят популяцию к лучшей приспособленности к изменению условий. Они могут происходить лишь в пределах генотипа и не выходят за пределы нормы данного признака, и для эволюции не существенны. Благодаря изучению генетических процессов в популяции эволюционная теория интенсивно развивалась.

выдвинул *мутационную гипотезу* о скачкообразном возникновении новых видов путем крупных изменений наследственности (мутации) без ведущего участия естественного отбора.

Генные мутации — главная причина возникновения новых наследственных свойств. Они и есть основные предпосылки эволюции, постоянно действующий источник наследственной изменчивости. Мутация может быть *доминантной, полудоминантной и рецессивной* в зависимости от состояния гена, в котором она произошла. Гены мутируют с определенной частотой, и природные популяции насыщены самыми разнообразными мутациями из-за одновременных мутаций многих генов.

Рецессивные мутации могут накапливаться в генофондах популяций, составляя резерв наследственной изменчивости. Классические работы Четверикова связали закономерности отбора в популяциях с динамикой процесса эволюции. На нескольких видах мушек дрозофил он показал, что в каждой популяции есть большое количество разных рецессивных мутантных генов. Эти гены не выявляются в признаках организма, так как подавлены нормальными доминантными аллелями, но могут проявиться в случае, когда встретятся и оставят потомство две особи с одним и тем же рецессивным мутантным геном. Так *колебания частоты генов* в популяциях связаны с *внешними условиями среды*.

Этот закон Четверикова был многократно проверен и на других объектах, породив мнение, что наличие таких рецессивных мутантных генов является предпосылкой эволюции. Но важно, чтобы эти особи не имели иных дефектов, мешающих нормальной работе организма, и обладали какими-то преимуществами перед другими. Так, при близкородственном скрещивании (инбридинг) потомство оказывается гомозиготным не только по этому мутантному гену, но и по большим отрезкам хромосом, что не способствует эволюции.

Доминантные мутации должны играть основную роль, — считает, с другой стороны, Гершенсон, — а рецессивные — могут изредка поддерживаться отбором. Хотя у дрозофил численность рецессивных мутантных генов велика, но частота каждого мала (порядка сотых долей процента). Такой случайный спектр рецессивных мутаций свидетельствует о ненаправленном характере мутационного процесса в популяции. Доминантные же мутации почти все принадлежат к очень ограниченному числу типов и вызывают лишь несколько определенных небольших изменений в структуре жилок крыльев, числе и расположении щетинок. В популяциях их доля около 15%, сохраняющаяся из года в год. Отсюда и предположение о действии естественного отбора, обеспечивающего и сохранность типов.

Мутации как бы нащупывают *экологические условия*, способствующие выживанию и размножению особей с данной мутацией. Одновременно идет отбор генотипов, в которых она наиболее благоприятна. Важно ее влияние и на *норму реакции* организма. Так мутантный признак закрепляется в наиболее подходящих местах, где мутанты становятся постоянной частью природной популяции. Затем на стадии сосуществования мутантов с немутантами происходит приспособление популяции к более эффективному использованию среды обитания. При этом *эволюционная пластичность* популяции высока и позволяет быстро перестроиться при стойких изменениях среды. Появившаяся мутация может повысить *адаптивные свойства* организма, тогда можно говорить о третьем этапе, о появлении *нового экотипа*. И, если какой-нибудь из этих экотипов окажется в изоляции от других популяций вида, то начнет образовываться новая разновидность, способная стать и новым видом. Эта схема сильно упрощена, не учтено множество факторов, могущих повлиять на процесс, в том числе и недавно открытых — перемещения гена в пределах генома, умножение числа какого-то гена в геноме и т.п. В контексте геологических времен *видообразование* — процесс почти мгновенный, интервал от позднего докембрия до современности, равный примерно 700 млн лет, за который сложилась современная жизнь, безусловно, мал для развития ее без скачков.

«**Принцип Харди-Вайнберга**» — без внешних давлений *частоты генов в популяции постоянны* (1908 г.) — служил первым существенным шагом к объединению дарвинизма и генетики. Этот закон означает, что накопленные изменения в генофонде не исчезают бесследно. Исходя из него и учитывая влияние отбора и возникновение новых мутаций, С.С.Четвериков показал, что из-за постоянных мутаций во всех популяциях создается существенная наследственная гетерогенность, что отбору подвергаются не отдельные особи и виды, а *генотип популяции*. С работы С.С.Четверикова «О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики» (1926 г.) наступил период синтеза представлений. *Мутации* — основа эволюции, они перерабатываются *естественным отбором*. Исследования конца 20-х годов показали, что большую роль в эволюции играет не только появление новых мутаций, но и изменение *частоты встречаемости существующих аллелей* (гена) из-за случайных процессов — *колебания численности популяций* и пр. (Р.А.Фишер, Н.П.Дубинин, Д.Д.Ромашов, С.Райт и др.). При резком снижении численности популяций (в связи с ростом близкородственных скрещиваний) снижается наследственная изменчивость. По Райту, это «*дрейф генов*», а по Дубинину, «*генетико-автоматический процесс*». Другим проявлением «*волн жизни*» является *изменение концентрации различных мутаций и уменьшение разнообразия генотипов популяции*. Они могут привести к изменениям направленности и интенсивности действия отбора.

Генетика позволила проследить протекание эволюционного процесса от появления первого признака в популяции до возникновения нового вида. При исследованиях на микроэволюционном (внутривидовом) уровне применялись точные экспериментальные методы. И пришли к

элементарной единице эволюции — популяции, *элементарному эволюционному материалу и элементарному явлению*. Учение о микроэволюции сформулировали Ф.Г.Добжанский и Н.В.Тимофеев-Ресовский (1939 г.). Современная теория не только добавила к дарвиновской «триаде» новые факторы эволюции, но и основные факторы переосмыслила иначе. Сейчас к ведущим факторам эволюции относят *мутации, популяционные волны численности и изоляцию*. Возникла и глобальная цель — *управления процессом эволюции*.

Учение о развитии биосферы и биосферы как новое направление *эволюционной биологии* стало развиваться с 20-х годов XX в. благодаря трудам выдающихся ученых В.И.Вернадского, В.Н.Сукачева и А.Тенсли. Закономерности эволюции экосистем разрабатываются и сейчас (см. гл.14).

Популяция относительно генетически обособлена от других популяций того же вида и обладает общим генофондом, что обеспечивает генотипическое сходство входящих в нее особей. Из-за малой продолжительности жизни отдельной особи по сравнению с временами эволюции ее генотип не скажется на эволюции. Возникшие наследственные изменения особи в силу свободного скрещивания могут распространиться в популяции, создавая генетическую неоднородность особей и условия для естественного отбора. *Популяция* — *часть вида*, т.е. входящие в нее особи принадлежат к одному виду (генетически замкнутой системы, представители которой не могут скрещиваться и давать плодотворное потомство с представителями других видов). Поэтому возникшая мутация не выйдет за пределы вида, и реальные эволюционные сдвиги можно обнаружить лишь в популяциях. Значит, *популяция* — *элементарная биологическая единица*, в которой возникают эволюционные процессы.

Синтетическая теория эволюции появилась в 30–40-е годы, объединив разные учения на основе дарвинизма, данных генетики и экологии. В ней признают популяцию в качестве основной единицы эволюции и выделяют два типа эволюции — на микро- и макроуровнях.

Микроэволюцию составили несколько разделов биологии. Среди них — *генетико-экологическое изучение структуры популяции* (Н.И.Вавилов, Е.Н.Синская, Дж.Клаузен, М.А.Розанова), экспериментальное и теоретическое *изучение борьбы за существование и естественного отбора* (В.Н.Сукачев, Дж.В.Холстейн, Г.Ф.Гаузе и др.), данные теоретической и экспериментальной *генетики* (М.Лернер, И.И.Шмальгаузен, Н.П.Дубинин, Г.Стеббинс и др.), *развитие теории вида* (Н.И.Вавилов, Э.Майр, К.М.Завадский и др.). Теория микроэволюции изучает *необратимые преобразования генетико-экологической структуры популяции*, которые могут привести к образованию нового вида.

Макроэволюция сформировалась в работах Н.И.Вавилова, И.И.Шмальгаузена, Дж.Г.Симпсона, А.Н.Северцева и др. Она изучает *происхождение надвидовых таксонов* (семейств, отрядов, классов и пр.), основные направления и закономерности *развития жизни на Земле в целом*. Эти процессы недоступны наблюдению и могут быть только реконструированы.

Основные положения синтетической теории эволюции (неодарвинизма) таковы:

1. Естественный отбор — главный движущий фактор эволюции, является следствием конкурентной борьбы за существование, особенно острой внутри вида и популяции. Факторами образования видов являются мутации, дрейф генов и различные формы изоляции.

2. Расхождение признаков организмов в ходе эволюции от общего предка (дивергенция) происходит через отбор мелких случайных мутаций. Новые формы образуются через крупные наследственные изменения, жизнеспособность которых определяет отбор.

3. Исходным материалом эволюции служат мутации, случайные и не направленные. Организация популяции и изменения условий среды выделяют наследственные изменения в сторону прогресса.

4. Макроэволюция, ведущая к образованию надвидовых групп, осуществляется через процессы микроэволюции.

Положение об элементарных явлениях и факторах эволюции сформулировал Тимофеев-Ресовский: а) популя-

ция — элементарная эволюционная структура; б) изменение генотипа популяции — элементарное эволюционное явление; в) генофонд популяции — элементарный эволюционный материал; г) элементарные эволюционные факторы — мутации, «волны жизни», изоляция, естественный отбор. Отбор может быть в трех формах.

Эволюционное учение, основанное на дарвиновской идее естественного отбора, активно противостоит креационизму и в наши дни.

Эволюционный подход становится *методологической основой биологии*. Конкретный материал, теории и гипотезы разных ее областей осмысливаются с эволюционных позиций. Эволюционное учение соединяет разрозненные, узко специализированные биологические дисциплины, противодействует их разобщению и поэтому занимает центральное место в современной биологии. Принцип *актуализма* («современность — ключ к познанию прошлого») здесь сочетается с принципом *историзма* («ключом к изучению настоящего является познание прошлого»).

20.3. ПОНЯТИЯ МИКРО- И МАКРОЭВОЛЮЦИИ

Современный эволюционизм подразделяет эволюционный процесс на микро- и макроэволюцию.

Микроэволюция — процесс перестройки внутри вида, ведущий к образованию новых популяций, подвидов и заканчивающийся образованием нового вида. Микроэволюция может происходить в достаточно короткие промежутки времени. В результате *мутаций* (наследственной изменчивости) происходят *случайные изменения генотипа*. Мутации чаще всего рецессивны и редко оказываются полезными для вида, но все-таки какие-то могут оказаться полезными. Если так оказывается, то особь получает сразу большое *преимущество* перед остальными особями популяции. Так, жирафы с более длинной шеей получали преимущество питаться листьями с высоких деревьев. Появление нового признака вызывает процесс дивергенции в популяции.

Расхождение признаков (дивергенция) заключается в том, что особи с ярко выраженными вариантами какого-то признака будут или преимущественно выживать, или вымирать (не оставлять потомства). Наиболее приспособленная группа будет более интенсивно размножаться и передавать полезный признак по наследству, укрепляя его и увеличиваясь в численности. Особи с неявно выраженным признаком будут постепенно вытесняться более приспособленными. Таким путем возникают новые подвиды и виды. Дивергенция всегда имеет характер группового отбора особей с полезными признаками из-за естественного отбора, т.е. из-за мутаций, лежащих в основе отбора.

Пример: более 20 видов лютиков имеют одного предка. Причина расхождения — географическая — болото, луг, лес и т.д. Если в одинаковых условиях существования животные, относящиеся к разным группам, приобретают сходное строение, то говорят о *конвергенции*, а для генетически близких групп — о *параллелизме*.

Численность популяции изменяется дивергенцией. Волны численности, существующие в популяции, зависят от изменений климата, количества врагов, количества пищи

и т.п. Может даже случиться, что сумеют выжить только те особи, которые приобрели полезный признак.

Так, в засушливый год выжили жирафы с более длинной шеей. Если бы они не были пространственно отделены от других популяций и могли бы скрещиваться с живущими рядом в соседней долине, где засуха не столь существенна из-за водоема, жирафами с короткой шеей, то новый вид бы не образовался.

Изоляция популяций необходима для образования нового вида, она — важнейший фактор *микроэволюции*. Изоляция как фактор *видообразования* может достигаться различным образом:

1. **Географическая изоляция** связана с расширением зоны обитания (*ареала*). В новых условиях постоянно происходит мутации, наследственные изменения, действует естественный отбор, что приводит к новому виду. Препятствиями могут быть реки, горы, ледники и пр. Этим путем образование вида занимает сотни и тысячи поколений. Дарвин выделял роль среды в видообразовании. Животные, обитающие на островах Зеленого Мыса, несмотря на некоторое сходство с материковыми видами, имели существенные различия.

2. **Временная изоляция** достигается несовпадением сроков размножения между двумя подвидами. В результате подвиды расходятся еще больше и возникают два новых вида. Таких примеров много среди рыб.

3. **Репродуктивная изоляция** возникает из-за различий в поведении или несовместимости генетического материала.

Макроэволюция — процесс формирования более крупных единиц: из видов — новых родов, из родов — новых семейств и т.д. Эти процессы нельзя изучать непосредственно, поскольку они очень длительны. Но в основе макроэволюции лежат те же движущие силы, что и в микроэволюции: а) *наследственная изменчивость и начало дивергенции*; б) *естественный отбор и продолжение дивергенции, гибель менее приспособленных и образование*

новой структурной единицы; в) репродуктивное разобщение. Это доказывается несколькими независимыми путями.

Доказательства могут быть:

1) **анатомические атавизмы** (сохранившиеся у современных существ органы предков — хвост, волосной покров и т.п.), **рудименты** (находящиеся на стадии исчезновения уже ненужные органы — аппендикс, остаток третьего века и др.), **гомологические органы** (пятипалая конечность, в основе которой скелет плавников рыб). Единый план строения животных указывает на единство происхождения;

2) **эмбриологические**, основанные на сходстве зародышей ранних стадий развития, уменьшающемся по мере роста и развития. В конечной стадии начинают преобладать черты, свойственные данному классу, семейству, виду;

3) **палеонтологические** — остатки вымерших переходных форм. Так, обнаружение пятипалого и трехпалого предка у однопалой современной лошади доказывает, что предки лошади имели пять пальцев на конечности.

Движущие силы эволюции видов в природе — наследственная изменчивость и естественный отбор. Наследственная изменчивость дает материал для эволюции, а естественный отбор определяет, насколько полезен возникший из мутаций признак. По Дарвину, основа естественного отбора — **борьба за существование**. Это может быть борьба **внутривидовая** за воду и свет, за лучшие участки и доступ к водоему и др. Возможна и межвидовая борьба (как между хищниками и грызунами на одной территории). Это — и борьба с **неблагоприятными условиями среды**. И все новые признаки, возникшие в результате наследственной изменчивости, проверяются естественным отбором. Доказательством существования отбора он считал тот факт, что каждая пара организмов дает больше потомков, чем дорастет их до взрослого состояния. В борьбе за существование выживают те, которые смогли передать своим потомкам набор признаков, обеспечивающий им лучшую **приспособляемость**. Так, осетр мечет 2 млн икринок, а доживают до взрослых рыб — единицы.

Приспособляемость выражается в строении организмов, в поведении и т.д. Но она носит относительный характер, помогая выживать только в условиях, в которых сформировалась.

Так, вблизи промышленных предприятий темноокрашенные особи, как менее заметные, вытеснили светлоокрашенных. Некоторые животные выработали окраску, которая делает их похожими на опасные виды, чтобы защититься от нападения хищников. Форма дельфина позволяет ему развивать скорости до 40 км/час. Стриж имеет длинные узкие крылья, помогающие ему прекрасно летать. Но он не может взлетать с ровных поверхностей и, если ему не с чего спрыгнуть, он погибает.

Под действие отбора могут попасть и отдельные особи, и целые популяции. Он определяет направление эволюции, собирая и интегрируя многочисленные случайные отклонения, сохраняя не признаки, а комплекс признаков или фенотипы, т.е. определенные комбинации генов, свойственных организму. В этом **творческая роль естественного отбора**. Выделяют несколько форм отбора.

Движущий отбор проявляется при изменении условий существования вида. Его давление направлено в пользу особей, имеющих отклонение определенного признака от нормы. Происходит сдвиг общей нормы и возникает новая норма. Дивергенция между старой и новой нормой ведет к видообразованию. Движущий отбор — в основе появления популяций насекомых, устойчивых к определенному яду. Эти особи приобретают преимущества при размножении, и их потомки занимают места умерших насекомых, которые не обладали этим признаком. Таким путем исчезли и многие неиспользуемые органы в результате нескольких сотен поколений.

Стабилизирующий отбор действует в почти неизменных условиях существования. Он оказывает давление на пользу особей, имеющих средние значения какого-то признака. В результате происходит их укрепление, предохранение от разрушающего действия мутаций. И в местностях, где условия жизни не менялись, сохранились древние виды, вымершие в других местах. Например, сохранился реликтовый таракан, голосеменное растение гинкго, кистоперая рыба латимерия.

Разрывающий отбор действует при изменении условий существования, его давление направлено в пользу организмов, имеющих отклонения от нормы в обе стороны. И формируется новая норма реакции. Так, на островах, где сильны ветры, мухи с нормальными крыльями сдуваются и гибнут. Преимущество у мух или с недоразвитыми крыльями (они ползают), или с длинными крыльями (они летают хорошо и оказывают сопротивление ветру).

Биологический прогресс — результат успеха в борьбе за существование. Он характеризуется возрастанием численности особей, расширением ареала обитания, увеличением числа групп более низкого ранга. **Биологический регресс** характеризуется обратными признаками и ведет к вымиранию. К биологическому прогрессу ведут несколько факторов.

1. **Морфологический прогресс** — усложнение организма, поднятие его на более высокий уровень. Строение организма изменяется не как приспособление к изменяющимся условиям среды, оно позволяет расширить использование условий внешней среды. При дальнейшей эволюции эти изменения, называемые **арогенезом**, сохраняются и ведут к новым группам, видам.

2. **Аллогенез** — эволюционное направление, сопровождающееся **идеоадаптацией** — приспособлением к специальным условиям среды, полезным в борьбе за существование, но не меняющим уровня организации. Пример — колочки растений или изменение окраски животных.

3. **Катагенез** — эволюционное направление, сопровождающееся упрощением организации. Фактически — это морфологический регресс. Пример — переход к паразитическому образу жизни уменьшает конкурентные способности.

После возникновения морфологического прогресса начинается приспособление отдельных популяций к условиям существования путем идеоадаптации. Например, класс птиц при расселении по суше дал огромное разнообразие форм. Хотя основы их строения одинаковы, частные приспособления отличны. Поэтому чередование этих

главных направлений отражает эволюционную тенденцию в филогенезе почти всех групп.

Биологическая эволюция отлична от эволюции атомов, Земли, общества и др. В ее основе — «уникальные процессы самовоспроизведения макромолекул и живых организмов, которые таят в себе почти неограниченные возможности преобразования живых систем в ряду поколений», — отмечает известный эволюционист А.В.Яблоков. «Биологическая эволюция — *необратимое* и в известной степени *направленное* историческое развитие живой природы, сопровождающееся изменением генетического состава

20.4. ОСНОВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИВОГО

Проблема эволюции и происхождения живого на Земле является загадкой и предметом споров не одно столетие. Одно представление ориентировалось на идеи *творения мира*, приписывая всему живому особую жизненную силу, не зависящую от материального мира (*витализм*). Другое — на органическую *связь живого с неживым*, и появилась идея о возможности *самозарождения жизни*.

Анаксимандр считал, что и живое, и неживое образовано из айперона по одинаковым законам. Животные родились из воды и земли при нагревании солнечным теплом и светом, при этом все они возникли независимо друг от друга. Эмпедокл исходил из построения материи четырьмя элементами мира (огонь, воздух, земля, вода), которые взаимодействуют через любовь (притяжение) и вражду (отталкивание). Тепло недр Земли вырывалось из глубин и превращало тинообразную поверхность Земли в комья разной формы, так появились растения, а потом животные. Но они не были похожи на современные, и неприспособленные и уродливые формы исчезали, оставляя более совершенные для развития. Элементы стремились соединиться с себе подобными, поэтому важны для живого тепло и кровь. Без воды и огня наступает смерть. Атомистическая концепция Демокрита, представленная в поэме Лукреция Кара, отвергала легенду о сотворении людей богами. В поэме предложена периодизация истории человечества на основе использования материала для орудий труда: века каменный, медный (или бронзовый) и железный. Распад Римской империи в V в. привел к новому типу сознания, к религиозному мироощущению, когда естествознание лишилось своего предмета, своих реальных задач, вера во всемогущего Бога, создающего и творящего мир, вела к периоду мистицизма и иррационализма. Кроме того, отсутствие надежных средств хранения и передачи информации способствовало упадку науки.

До XVIII в. не было речи о *различии и единстве живого и косного вещества*. Человек — боговдохновенное создание, а остальная природа — материя, управляемая законами механики, и развитие биологии и геологии шло раздельно. *Теория эпигенеза* (У.Гарвей, Р.Декарт) отрицала предопределенность развития организма, развивающегося под определяющим влиянием окружающей среды. У.Гарвей, как и Аристотель, считал эволюцию стремлением к совершенству. Обращаясь больше к опытному изучению эмбриогенеза, эпигенетики отходили от идей божественного творения жизни. *Преформисты* (А.Левенгук, Г.Лейбниц, Н.Мальбранш и др.) считали, что в зародышевой клетке

популяций, формированием адаптаций, образованием и вымиранием видов, преобразованиями биогеоценозов и биосферы в целом». С возникновения жизни органическая природа непрерывно развивается сотни миллионов лет, и результатом процесса эволюции является то *разнообразие форм живого*, которое еще не полностью описано, классифицировано и изучено. Формы живого — и предмет, и объект эволюции. Результаты биологической эволюции многообразны, это всегда *соответствие развивающейся живой системы условиям ее существования*.

содержатся все структуры взрослого организма, и онтогенез — лишь количественный рост зачатков органов и тканей. Лейбниц провозгласил принцип градации, предсказал существование переходных форм между животными и растениями. Этот принцип затем был развит до представления о «лестнице существ» и концепции трансформизма.

Проблема происхождения и эволюции жизни относится к наиболее интересным и в то же время наименее исследованным вопросам, связанным с философией и религией. Практически на протяжении почти всей истории развития научной мысли считалось, что жизнь — явление самозарождающееся. Здесь было много чисто умозрительных рассуждений, теологических и научных. Перечислим основные теории, связанные с моделью развития Вселенной:

- 1) жизнь была создана Творцом в определенное время — креационизм (лат. *creatio* «сотворение»);
- 2) жизнь возникла самопроизвольно из неживого вещества;
- 3) жизнь существовала всегда;
- 4) жизнь была занесена на Землю из Космоса;
- 5) жизнь возникла в результате биохимической эволюции.

Согласно креационизму, возникновение жизни относится к определенному событию в прошлом, которое можно вычислить. В 1650 г. архиепископ Ашер из Ирландии вычислил, что Бог сотворил мир в октябре 4004 г. до н.э., а в 9 часов утра 23 октября — человека. Это число он получил из анализа возрастов и родственных связей всех упоминаемых в Библии лиц. Однако к тому времени на Ближнем Востоке уже была развитая цивилизация, что доказано археологическими изысканиями. Впрочем, вопрос сотворения мира и человека не закрыт, поскольку толковать тексты Библии можно по-разному. Сторонники этой гипотезы считали, что живым организмам присуща особая сила, независимая от материального мира, направляющая все жизненные процессы (*витализм*). В настоящее время около 50% жителей США придерживаются этой гипотезы.

Теория спонтанного зарождения жизни существовала в Вавилоне, Египте и Китае как альтернатива креационизму. Она восходит к Эмпедоклу и Аристотелю: определенные «частицы» вещества содержат некое «активное начало», которое при определенных условиях может создать живой организм. Аристотель считал, что активное начало есть в оплодотворенном яйце, солнечном свете, гниющем мясе. У Демокрита начало жизни было в иле, у Фалеса — в воде, у Анаксагора — в воздухе. Аристотель не

сомневался в самозарождении лягушек, мышей и других мелких животных. Платон говорил о самозарождении живых существ из земли в процессе гниения. Различные случаи самозарождения описаны Цицероном, Плутархом, Сенекой и Апулеем.

С распространением христианства идеи самозарождения были объявлены еретическими, и долгое время о них не вспоминали. Но Гельмонт придумал рецепт получения мышей из пшеницы и грязного белья. Бэкон считал, что гниение — зачаток нового рождения. Гарвей, как и Бэкон, думал, что черви и насекомые могут зарождаться при гниении. Парацельс пытался разработать рецепты создания искусственного человека — гомункулуса путем помещения человеческой спермы в тыкву. В XV–XVI вв. считали, что львы возникли из камней пустыни. Согласно Декарту, самозарождение — естественный процесс, который происходит при некоторых условиях. Идеи самозарождения жизни поддерживали Коперник, Галилей, Декарт, Гарвей, Гегель, Ламарк, Гете, Шеллинг. Их авторитет во многом определил широкое распространение этой идеи.

Итальянский биолог Ф.Реди серией опытов с открытыми и закрытыми сосудами доказал (1688 г.), что появляющиеся в гниющем мясе белые маленькие черви — это личинки мух, и сформулировал принцип: *все живое — из живого*. Так он отверг доктрину самозарождения жизни. Но только острые дискуссии в середине XIX в. потребовали экспериментальных исследований. Л.Пастер окончательно показал (1860 г.), что бактерии могут появляться в органических растворах только, если они были туда занесены ранее. Опыты Пастера подтвердили принцип Реди и показали несостоятельность идеи самозарождения жизни. Но они не могли ответить на основной вопрос о происхождении жизни. И для избавления от микроорганизмов необходима стерилизация, получившая название *пастеризации*. Отсюда укрепилось представление, что *новый организм может быть только от живого*.

Сторонники теории вечного существования жизни считают, что на вечно существующей Земле некоторые виды вынуждены были вымереть или резко изменить численность в тех или иных местах из-за изменения внешних условий. Четкой концепции на этом пути не выработано, поскольку в палеонтологической летописи Земли есть некоторые разрывы и неясности. С идеей вечного существования жизни во Вселенной связана и следующая группа гипотез.

Теория панспермии (от греческого — «всеобщее семя») не предлагает механизма для объяснения первичного возникновения жизни и переносит проблему в другое место Вселенной. Наша планета, возникшая 4,5 млрд лет назад, в первые 500 млн лет бомбардировалась потоками метеоритов, которые вроде бы препятствовали не только появлению жизни, но даже и образованию свободной водной поверхности. Но в пластах, имеющих возраст 4,3 млрд лет, найдены простейшие формы жизни, а 200 млн лет — слишком малый срок не только для самопроизвольного образования органики, не говоря о живых клетках. Во всей Вселенной за 13–15 млрд лет существования такой процесс мог бы осуществиться. В 1865 г. немецкий врач Г.Рихтер выдвинул идею космических зачатков — *космозоов*, пере-

носимых с одной планеты на другую. Зародившись в космосе, жизнь долго сохранялась в анабиозе почти при $T = 0$ К, и была занесена на Землю метеоритами. Либих считал, что «атмосферы небесных тел, а также вращающихся космических туманностей можно считать как вековечные хранилища оживленной формы, как вечные плантации органических зародышей», откуда жизнь рассеивается во Вселенной. Аналогично мыслили Кельвин, Гельмгольд и др. В начале XX в. с идеей *радиопанспермии* выступил Аррениус. Он описывал, как с населенных планет уходят в мировое пространство частички вещества, пылинки и живые споры микроорганизмов. Они, сохраняя жизнеспособность, летают во Вселенной за счет светового давления и, попадая на планету с подходящими условиями для жизни, начинают новую жизнь. Эту гипотезу поддерживали многие, в том числе русские ученые С.П.Костычев, Л.С.Берг, В.И.Вернадский и П.П.Лазарев.

Для обоснования панспермии обычно используют масштабные рисунки с изображением предметов, похожих на ракеты или космонавтов, или появления НЛО. Полеты космических аппаратов разрушили веру в существование разумной жизни на планетах Солнечной системы, появившуюся после открытия Скиапарелли каналов на Марсе (1877 г.). В 1924 г. многие каналы сфотографировали, и они казались доказательством существования разумной жизни. Фотоснимки 500 каналов зафиксировали сезонные изменения цвета, которые подтвердили идеи астронома Г.А.Тихова о растительности на Марсе, так как озера и каналы имели зеленый цвет. Ценная информация о физических условиях на Марсе была получена советским космическим аппаратом «Марс» и американскими посадочными станциями «Викинг-1» и «Викинг-2». Так, полярные шапки, испытывающие сезонные изменения, оказались состоящими из водяного пара с примесью минеральной пыли и из твердой двуокиси углерода (сухого льда). Но пока следов жизни на Марсе не найдено. Изучение поверхности с борта искусственных спутников позволило предположить, что каналы и реки Марса могли возникнуть в результате растапливания подповерхностного водяного льда в зонах повышенной активности или внутреннего тепла планеты или при периодических изменениях климата.

В конце 60-х годов вновь возрос интерес к гипотезам панспермии. Так, геолог Б.И.Чувашов («Вопросы философии», 1966 г.) писал, что жизнь во Вселенной, по его мнению, существует вечно. Он критиковал теорию Опарина, считал сомнительным применение понятия «естественного отбора» к анализу развития предбиологических систем, хотя и допускал возможность чрезвычайно редкого развития неживой материи до уровня живой. Потому оно может произойти только однажды в каждой данной галактике и переноситься спорами с метеоритами по планетным системам звезд.

При изучении вещества метеоритов и комет были обнаружены многие «предшественники живого» — органические соединения, синильная кислота, вода, формальдегид, цианогены. Формальдегид, в частности, обнаружен в 60% случаев в 22 исследованных областях, его облака с концентрацией около 10^3 мол./см³ заполняют обширные пространства. Предшественники аминокислот найдены в лунном

грунте и метеоритах (1975 г.). Сторонники этой гипотезы считают их посеянными на Земле. В предисловии к русскому изданию книги С.Фокса и К.Доде «Молекулярная эволюция и возникновение жизни» Опарин писал: «Земля уже при самом своем образовании получила эти вещества, так сказать, «в наследство от Космоса»». О существовании жизни вне солнечной системы пока сказать нельзя, но обнаружены в спектрах далекой галактики линии, соответствующие спирту.

Среди генетиков имеет некоторое распространение гипотеза о случайном возникновении жизни на Земле из первичной живой молекулы. Истоки этой идеи связаны с открытием роли ДНК в явлениях наследственности и восходят к взглядам Германа Меллера, одного из создателей радиационной генетики, удостоенного Нобелевской премии по физиологии и медицине в 1946 г. Он считал моделью такой «живой молекулы» частицу нуклеопротеида вируса табачной мозаики, но сейчас такое представление о вирусах стало уже достоянием истории науки. Однако идея случайного возникновения ДНК встречается в популярной литературе.

В представлениях о зарождении жизни в результате физико-химических процессов важную роль играет эволюция самой планеты. Земля существует почти 4,5 млрд лет, а органическая жизнь — около 3,5 млрд лет. В докембрийских породах найдены признаки живого. Состояние Земли за время ее существования все время изменялось. Очень давно Земля была горячей планетой с температурой $(5 \div 8) \cdot 10^3$ К. По мере остывания тугоплавкие металлы и углерод конденсировались, образуя земную кору. Но она не была ровной из-за активной вулканической деятельности и всевозможных подвижек формирующегося грунта. Согласно гипотезе Опарина (1923 г.), атмосфера первичной Земли сильно отличалась от современной. Легкие газы — водород, гелий, азот, кислород, аргон и другие — не удерживались еще недостаточно плотной планетой, а более тяжелые соединения оставались (вода, аммиак, двуокись углерода, метан). Вода оставалась газом, пока температура не упала ниже 100°C .

20.5. КОНЦЕПЦИЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИВОГО ПО ГИПОТЕЗЕ ОПАРИНА–ХОЛДЕЙНА

Атмосфера ранней Земли была, скорее, «восстановительной», так как в древних породах преобладают металлы — в восстановленной форме (например, двухвалентное железо), а в более молодых — в окисленной (железо трехвалентное). Опыты, проведенные в лаборатории, показывают, что органические вещества в такой среде создаются легче, чем в окисленной. На первой стадии из простых неорганических соединений появились *углеводороды*. Возможность образования сложных соединений из простых доказана многими исследованиями.

Так, еще в 1861 г. Бутлеров обнаружил, что в растворе формалина в известковой воде при стоянии в теплом месте образуются сахара. А.Н.Бах показал, что в водном растворе формалина и цианистого калия возникают еще более сложные вещества, которые могут служить питательной средой для микроорганизмов.

Химический состав Земли сформировался в результате космической эволюции вещества, возникли определенные пропорции соотношений атомов. Космическое обилие кислорода и водорода выразилось в обилии воды и ее многочисленных окислов, а высокая распространенность углерода — одна из причин, определивших большую вероятность возникновения жизни. Обилие кремния, магния и железа способствовало образованию в земной коре и метеоритах силикатов.

Источниками сведений о распространенности элементов служат данные о составе Солнца, метеоритов, поверхностей Луны и планет. Возраст метеоритов примерно соответствует возрасту земных пород, поэтому их состав помогает восстановить химический состав Земли в прошлом и выделить изменения, вызванные появлением жизни на Земле. 1. Сначала — период образования простых органических соединений. На других планетах и в космической газопылевой туманности обнаружены соединения углерода и даже углеводороды. 2. Второй этап — образование в водах океана белковых веществ. В разных странах удалось получить из смеси аммиака, метана, водорода и водяного пара при высоких давлениях и наличии электрических разрядов и ультрафиолетового облучения аминокислоты. Позже путем полимеризации были получены в этих условиях и более сложные органические соединения. 3. В дальнейшем процессы стали происходить в кислородной атмосфере, так как он стал накапливаться в течение 1,2 млрд лет, и соединения стали окисляться. Так родился «первичный бульон» жизни. Можно сказать, что Опарин обратился к простым формам неживой материи, распространял на их изучение дарвиновский принцип эволюции.

Научная постановка проблемы возникновения жизни принадлежит Энгельсу, считавшему, что жизнь сформировалась в ходе эволюции материи. В этом же ключе высказался и К.А.Тимирязев: «Мы вынуждены допустить, что живая материя осуществлялась так же, как и все остальные процессы, путем эволюции... Процесс этот, вероятно, имел место и при переходе из неорганического мира в органический» (1912 г.). Но окончательного ответа пока нет.

Органика (возможно, углеводороды) возникла в океане из более простых соединений — предположил Опарин. Необходимую энергию давало Солнце, ультрафиолетовая часть его излучения не поглощалась *озоновым слоем* (который еще не образовался). Разнообразие простых соединений в океанах, большая водная площадь, обилие солнечной энергии, действовавшей длительное время, образовали «первичный бульон», в котором стали возникать органические соединения. Похожая идея была положена в основу концепции и английского естествоиспытателя Дж.Холдейна (1929 г.).

По оценке К.Х.Уоддингтона, «в конце 20–30-х годов были заложены основы точки зрения, согласно которой жизнь рассматривается как явление, естественным образом возникающее из неживой природы». Вероятно, будущие исследователи истории идей отметят, что эта точка зрения на проблему происхождения жизни, представляющая рево-

люцию в философском понимании человеком своего собственного места в мире, впервые была разработана коммунистами. Опарин в Москве (1924 г.) и Холдейн в Кембридже (1929 г.) независимо друг от друга утверждали, что последние достижения геохимии... позволяют представить процесс происхождения систем, которые могут быть названы «живыми».

Опарин отметил, что организмы состоят из соединений, обладающих более сложной структурой, чем те продукты, которые они производят. И логично, что некоторые органические соединения предшествовали живым организмам и сыграли важную роль в их происхождении. В 1956 г. Опарин выпустил книгу в соавторстве с астрономом Фесенковым, в которой они придерживаются идеи Шмидта о том, что Солнце захватило часть пылевого облака во Вселенной. Но общей идеей для всех вариантов теории оставалось необходимое условие возникновения жизни — ее первоначальное отсутствие, причем и законы природы изменялись — с возникновением жизни появились законы биологические, а с появлением человека возникли законы социальные.

Момент перехода от неживого к живому — решающий для мировоззрения. У Опарина жизнь возникает на уровне многомерных структур — коагулянты, гели и коацерваты — в «момент выпадения геля или образования первородного студня», и «с некоторыми оговорками мы даже можем считать этот впервые возникший на Земле кусочек органической слизи *первичным организмом*. В самом деле, он должен был обладать многими из тех свойств, которые в настоящее время рассматриваются как признаки жизни». Он описал (1936 г.) *коллоидную фазу возникновения жизни* и развитие способности к фотосинтезу у предков растительных организмов. Коацерваты уже могут увеличиваться в размерах, делиться на части и подвергаться химическим изменениям ввиду явлений на границе возможного расслоения. Эти *граничные явления имеют зачатки метаболизма, а переход к живому происходит тогда, когда на сцену «соревнованию в скорости роста приходит борьба за существование»*. Возникновение и обострение этой борьбы — результат нехватки для «питания» коацерватов запасов «предбиологической» органики. Эта нехватка приводит к существованию различных путей получения пищи, организмы до перехода к биологическому уровню развития разделяются на автотрофные и гетеротрофные. При иссякании запасов органического материала вне коацерватов вступали в действие «естественный отбор» и другие биологические факторы, происходил переход к организмам. Хотя Холдейн в 1929 г. считал, что земная атмосфера была «до возникновения жизни» богата двуокисью углерода, и первые живые существа были «возможно, огромными молекулами», не упоминая ни о гелях, ни о коацерватах, его имя упоминается рядом с Опариним, и гипотеза названа «*гипотезой Холдейна–Опарина*».

Подобные условия создали в лаборатории американского геофизика Г.Юри. В 1953 г. Миллер пропускать искровой разряд через смесь метана, аммиака, водорода и воды. В его установке удалось синтезировать ряд аминокислот, глутаминовую кислоту, аденин, глицин и простые сахара, а после и простые нуклеиновые кислоты (рис.39).

Другие исследователи стали использовать нагревание, пропускание бета-лучей и ультрафиолета, и оказалось, что различные источники свободной энергии приводили к образованию сходных веществ. Наиболее эффективным источником оказалось *солнечное излучение в диапазоне длин волн $(2 + 2,5) \cdot 10^7$ м*. Попадание полученных веществ в воду предохраняло от обратного распада на простые соединения, а взаимодействие друг с другом открывало *возможность эволюции*.

В настоящее время излучение с $\lambda < 2,9 \cdot 10^{-7}$ м поглощается слоем озона и не доходит до земной поверхности. По оценкам Юри, в предбиологические времена доля свободного O_2 составляла около 10^{-3} от современного значения в атмосфере, что было недостаточно для образования *озонового слоя*. По расчетам геолога и палеонтолога Б.С.Соколова (1976 г.), содержание O_2 достигло 1% современного значения только 1 млрд лет назад. Опыты Миллера говорят в пользу теории Юри о *составе первоначального «бульона»*. Ранняя атмосфера Земли напоминала атмосферу современного Юпитера, в ней преобладали неокисленные газы — метан, аммиак и водород. Х.Оро в 60-е годы показал, что молекулы синильной кислоты HCN в одностадийной реакции могут конденсироваться с образованием аденина, а у Миллера — при электрическом разряде. Простейшие молекулы возникали в очень малых количествах, и нуклеотидов таким путем не смогли получить. Американский ученый К.Саган подсчитал (1966 г.), что образовавшиеся за счет энергии ультрафиолетовых лучей органические вещества способны создать в водах океана 1%-й раствор. За счет энергии химических связей образующегося АТФ может существовать популяция бактерий кишечной палочки до 20 тыс. экземпляров в столбе воды сечением в 1 см².

Итак, солнечное излучение способно обеспечить ход мощных процессов синтеза, неорганического фотосинтеза, чтобы начали вдруг «выживать» более сложные молекулы вместо простых. Если химическая эволюция Земли заняла 4,5 млрд лет, то этап биохимической эволюции, который привел к формированию простейших организмов, — более 2 млрд лет. Теория Опарина получила признание, но оставалось неясным, *как от сложных органических веществ перейти к простым живым организмам*. Большинство признавало этот процесс случайным — в результате взаимодействия простейших веществ вдруг образовалась молекула, способная размножаться. Так считал и известный американский генетик, лауреат Нобелевской премии 1937 г. Г.Меллер: *жизнь возникла в форме гена — элементарной единицы наследственности — путем случайного сочетания атомных групп и молекул, встречавшихся в водах первичного океана*.

В 1966 г. немецкий биохимик Г.Шрам подсчитал вероятность случайного сочетания 6000 нуклеотидов, образующих РНК вируса табачной мозаики, и получил число $1/10^{2000}$. Так как считается, что число нуклонов во Вселенной — 10^{80} , то за 10^9 лет, отведенных для синтеза простейшего организма, невозможно получить хотя бы одну такую молекулу. Поэтому гипотеза случайного соединения не пользуется признанием. Хойл высказался столь красочно, что его слова вошли в фольклор: эта идея «столь же нелепа

и неправдоподобна, как утверждение, что ураган, пронесшийся над мусорной свалкой, может привести к сборке «Боинга-747»».

Опарин разрабатывал свою гипотезу происхождения жизни — возникновение живого в результате взаимодействия простейших органических соединений при постепенном усложнении, и многие следовали ей, привлекая все новые и новейшие данные. Этим процессам благоприятствовали высокое содержание простых органических соединений в поверхностных водах еще молодой Земли, наличие разнообразных условий, постоянный приток энергии от Солнца, в том числе и жесткого ультрафиолета. Возник *круговорот веществ*, и из взаимных превращений абиотических веществ образовались процессы *синтеза и распада органики*, стали сохраняться более устойчивые соединения и распадаться малоустойчивые. Если бы шли только процессы синтеза, то структуры усложнялись, но никакого обмена веществ не получилось бы, т.е. получилась бы не жизнь, а кристаллизация. Если жизнь начала развиваться как единство процессов синтеза и деструкции органического вещества, то вряд ли на первых этапах она связана была с простейшими организмами, подчеркивал Бернал (1969 г.). Стало быть, жизнь появилась раньше живых организмов, и первичными были белковые коацерваты.

Возникновение молекулярной биологии привело к союзу *биохимии и генетики*, кульминацией которого было появление гипотезы Уотсона–Крика (1953 г.), объяснявшей, каким образом может быть записана *генетическая информация в молекулах ДНК*. Самое важное — все организмы обладают *одним и тем же генетическим кодом*.

Простейшие системы — *вирусы* — состоят из нуклеиновых кислот (ДНК или РНК), заключенных в белковую оболочку, так не является ли молекула ДНК первой живой формой? «План построения» молекулы ДНК не может быть признан случайным, а огромное количество информации не возникает внезапно. Для Опарина жизнь — *это процесс, поток, обмен веществ в материи, и потому не может быть отождествлен с какой-то застывшей формой*. В книге «Жизнь, ее природа, происхождение и развитие» (1960 г.) Опарин отмечает, что внутренняя организация паразитов упрощается по мере роста «зависимости от своих хозяев» и адаптации к этой экологической нише. И, хотя закодированные нуклеиновые кислоты вирусов — продукт эволюции более высокоорганизованных организмов, сами вирусы — конечный результат паразитического вырождения, утратившими все, кроме генетического материала. Они способны к самовоспроизведению при использовании метаболизма более высокоорганизованных организмов, и они не смогли бы появиться, если бы до них не имела место эволюция организмов, обладающая способностью к обмену веществ.

20.6. СОВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА КОНЦЕПЦИИ БИОХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ И ПАНСПЕРМИИ

Концепция Вернадского появилась в 1931 г. Он писал о *геохимических функциях биосферы*: «...среди миллионов видов нет ни одного, который бы мог исполнить один все геохимические функции жизни, существующие в биосфере изначально. Следовательно, изначальный морфологический состав живой природы в биосфере должен быть сложным.

В 1981 г. М.Эйген продемонстрировал, что в растворах мономеров нуклеотидов в присутствии фермента полимераза могут синтезироваться полимерные молекулы РНК, способные к репликациям, мутациям и даже к борьбе за существование с молекулами-предками (рис.40). В 1974 г. Л.Орджел экспериментально показал, что нуклеотидные мономеры полимеризуются и без полимераз, образуя в конечном итоге РНК, если в растворе имеется «затравка» этой молекулы. Таким образом, доказана автономность и возможность образования на Земле органических веществ, лежащих в основе метаболизма живых существ, и нуклеиновых кислот, носителей наследственной информации. На базе экспериментов Эйгена и Орджела сформировалась гипотеза возникновения жизни по схеме «гены — ферменты — метаболизм», утверждающая одномоментное появление репликации и метаболизма. Но есть доказательства, что эта схема не верна и даже ошибочна.

Известный биолог из Принстона Ф.Дайсон в своей книге «Происхождение жизни» (2000 г.) развивает свою гипотезу независимого появления репликации и метаболизма. Современные данные палеонтологии указывают на следы молекул углеводов и порфирина (предшественника хлорофилла) в ископаемых структурах Гренландии (возраст 3,5–3,8 млрд лет), тогда как остатков нуклеиновых кислот не обнаружено. Значит, одновременно эти явления не могли возникнуть, репликация и метаболизм имеют разных носителей (нуклеиновые кислоты и белки, соответственно) и возникли автономно. Кроме того, в предбиологической среде не было образцов РНК и тем более ферментов, поэтому приведенные опыты ничего не говорят о происхождении жизни, да и неизбежные ошибки при репликации должны накапливаться, что привело бы к гибели биосистем. Поэтому Дайсон считает наиболее правдоподобной гипотезу Опарина (*концепцию голобиоза*), согласно которой сначала появились белковые коацерваты — проклетки, которые обладали гомеостатом и размножались, но не имели механизма репликации. Компьютерное моделирование показало, что из неорганизованной молекулярной совокупности в коацервате возникает организованный комплекс, который приобретает белковый гомеостаз (при числе молекул более 2000 возникает 8–10 мономеров и дискриминантный фактор фермента порядка 60–100). Значит, на этапе предбиологической эволюции аминокислот достаточно 8–10 (а не 20, как сейчас), и для ферментов 60–100 (а не 5000–10000, как сейчас). Вероятность достижения порядка оказалась около 50%, а успешного синтеза полимров — 75%. Поэтому гипотеза Опарина–Дайсона проверена компьютерным моделированием и предлагает следующий порядок возникновения биоструктур — «клетка — ферменты — гены».

И первое появление жизни при создании биосферы должно было произойти не в виде появления одного какого-то организма, а в виде их совокупности, отвечающей геохимическим требованиям жизни». Вернадский связывал возникновение жизни с гигантской катастрофой, прервавшей безжизненную эволюцию земной коры и внесшей

столько противоречий, что они смогли породить жизнь. Он считал, что наука способна определить условия, при которых зарождение жизни окажется единственно возможным. Когда-то в прошлом при наличии физико-химических условий, не учитывающихся в настоящее время, был нарушен принцип Реди («все живое — из живого»). Этот принцип только указывает, что самопроизвольного возникновения жизни нет сейчас и не было в то время, когда жизнь уже существовала, раз возникнув. В биосфере, по Вернадскому, есть косное вещество (минералы), которое остается постоянным, и живое, меняющееся в процессе эволюции.

Оптические свойства живого и неживого веществ различны, и живое всегда оптически активно. Значит, молекулы живого обладают общей асимметрией и поляризуют проходящий через них свет. То же относится и к аминокислотам. Молекулы же «косного» вещества, имеющие разные виды симметрии, напротив, не способны поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света. Поскольку веществ, поворачивающих плоскость поляризации, вне Земли пока не обнаружено, естественно считать, что земная жизнь имеет земное происхождение. Появление *оптической активности* ранее было установлено Фарадеем под влиянием *приложенного* магнитного поля.

Некоторые предположения Вернадского подтверждены последующим развитием науки. Во-первых, был открыт генетический код, единый для всего живого. Этот четырехбуквенный алфавит выглядит как следствие процесса естественного отбора, отразившего «наиболее приспособленную к земным условиям форму передачи наследственной памяти, наследственной информации, которая кодируется нуклеиновыми кислотами», как выразился академик Н.Моисеев. Это единство генетического кода трудно объяснить, отрицая, что жизнь является продуктом эволюции Земли. Вернадский не мог утверждать это уверенно, поэтому использовал это положение, как не противоречащее опытным данным. Во-вторых, недавно были обнаружены следы жизни на Земле, которые просуществовали 3,6 млрд лет в глубокой пещере на дне океана. Это значит, что почти одновременно (по космическим масштабам времени) с возникновением нашей планеты на ней появилась жизнь.

Концепция «генобиоза» появилась в 50-е годы в связи с работами Холдейна. Он считал, что первичная среда была не структурой, способной к обмену веществ со средой (как у Опарина), а макромолекулярной системой (типа гена), способной к саморепродукции, он назвал ее «голым геном». Иногда эту концепцию называют *информационной*. Пастер тоже рассматривал зарождение живого как возникновение дисимметричной молекулы из симметричной неживой. Американский ученый Г.Блум (1951 г.) обратил внимание на то, что на ранних этапах эволюции жизни и *фотосинтез должен отличаться от современного*. Г.Гаффон делил эволюцию энергетике организмов на пять этапов, связанных с последовательной эволюцией внешних условий, в частности, с изменением состава солнечного излучения, достигающего земной поверхности (1962 г.). Примитивный фотосинтез использовал ультрафиолетовое излучение, а по

мере образования озонового слоя живое постепенно приспособлялось к фотонам меньшей энергии, но в большем количестве.

Концепция «голобиоза», в отличие от предыдущей, основана на первичности белков. Теория Опарина (1957–1960 гг.) включает разработку *эволюции процессов обмена веществ*. Он считал, что механизм запасаения солнечной энергии с помощью хлорофилла достаточно сложен и не мог возникнуть быстро, как и процесс окисления некоторых неорганических соединений (серы или железа), используемый микроорганизмами для биосинтеза. Как сторонник первичного обмена веществ, протекающего в коацерватной системе, он считал появление в ней нуклеиновых кислот завершением эволюции в итоге конкуренции протобионтов. Из-за амфотерности молекул белка образовывались коллоидные гидрофильные комплексы, создавая оболочку типа эмульсии. При слиянии таких комплексов друг с другом образуются *коацерваты* (лат. *coacervatus* «накопленный, собранный»), отделяющие коллоиды от остальной водной среды. Различные коацерваты являлись сырьем для «*биохимического естественного отбора*». В них происходили дальнейшие химические реакции, при поглощении ими ионов металлов образовывались ферменты. Вдоль границ выстраивались сложные углеводороды, типа мембран клетки, обеспечивающие стабильность.

Судьба коацерватной капли определялась тем, какой процесс в ней оказывался преобладающим — роста или распада. Так как среда, в которой они образовывались, мало отличалась по своему составу, сохранение устойчивости не испытывало затруднений. Отличающееся от среды распалось, а то, что не особенно отличалось от среды, сохранялось и росло. Происходил *отбор капель*, наиболее устойчивых в данных условиях. За миллионы лет отбора капель лишь малая часть сохранилась. Достигнув определенных размеров, одна капля могла распасться на дочерние, и те из них, которые соответствовали по структуре материнской, росли дальше, а резко отличные — распались. И сохранялись только капли, не теряющие своей структуры, т.е. приобретшие свойство самовоспроизведения. При попадании в коацерват способной к воспроизведению молекулы и внутренней перестройки липидной оболочки могла образоваться и простейшая клетка. Процесс мог развиваться и привести к образованию простейшего организма, питающегося органическими веществами из первичного бульона. Появление самовоспроизведения закрыло этап предистории развития жизни. Коацерватная капля стала живым организмом, открылась возможность прогрессивной эволюции.

Многие ученые признают верной эту гипотезу происхождения жизни и ищут детальное подтверждение ей. Как результат существования *единого генетического кода* оказалась возможной передача наследственных признаков у бактерий не непосредственно от клетки к клетке, а через бактериофагов. Такие данные получил советский биохимик С.М.Гершензон (1965 г.). Эта идея стала использоваться в генотерапии — исправление наследственных дефектов ДНК при переносе с помощью вирусов нормальной ДНК в дефектные клетки.

Понятие конкуренции гиперциклов, или циклов химических реакций, которые приводят к образованию белковых молекул, распространил на процессы, которые должны были происходить при эволюционном скачке кроме *принципа дарвиновского отбора*, и ввел Эйген в своей знаменитой работе «Самоорганизация материи в ходе химической эволюции» (1971 г.) (см. рис.40).

Полимеризация молекул на пути к живой клетке не могла идти путем перебора вариантов, для чего требуется время, большее времени существования Вселенной. Молекулы быстро и экономично складываются в полимерную цепочку по четкому правилу, коду. Те циклы, которые работают быстрее и эффективнее, чем остальные, и «побеждают» в *конкурентной борьбе*. Пищей служат молекулы мономеров, которые хотят поглотить, присоединить к себе макромолекулы полимеров, или, точнее, циклы реакций. В первичном бульоне присутствуют и катализаторы химических реакций, которые сами образуются в них как промежуточные продукты, тем самым протекающие реакции похожи на реакции типа Белоусова–Жаботинского, т.е. являются *автокаталитическими*. Эйгену еще не было известно, что через несколько лет такие *самоорганизующиеся системы* начнут изучать в разных областях науки, выделяют принципы самоорганизации и появится новая область знания — синергетика. Так появилась гипотеза о *механизме зарождения макромолекул*, необходимых для строительства белка в процессе эволюции, и новая модель предбиологической эволюции.

С критической позиции Эйгена выступил (1979 г.) Опарин, считая *появление жизни не случайным, а закономерным процессом*. Его поддержал преподаватель Пермского университета В.В. Орлов, утверждавший, что философия должна «объяснять» процессы происхождения жизни и сознания. Он верил в целенаправленность эволюции материи, кульминацией которой является происхождение человека. Этот телеологический способ мышления сближал Опарина и Орлова с философией природы Тейяра де Шардена. С их взглядами не согласился Дубинин: «*Жизнь — это не фатальное последствие химической эволюции. Жизнь на Земле могла и не возникнуть...*».

Концепция генобиоза в 70–80-е годы приобрела популярность. Начало живого — неравновесные диссипативные (рассеянные) структуры или открытые микросистемы с мощным ферментативным аппаратом, являющимся катализатором. Этот *биотид* подвержен эволюции из-за переходов (мутаций) между «видами», к переходам к более устойчивой структуре. Такими могут быть *кристаллы глины*, считал А.Дж. Кернс-Смит. Возникновение асимметрии в живой материи Дж.Трэнтер связывал с многократным усилением исчезающе малых асимметрий слабого взаимодействия в кристаллических структурах глин. Холдейн обратился к идее первичности макромолекулярной системы с функциями генетического хода. Эту его последнюю концепцию называют «*необиозом*».

Сначала нуклеотидная система была голой, т.е. находилась в комплексе с протеинами и обеспечивала свою саморепродукцию. Но в абиотических условиях сразу «зародился» нуклеиново-протеиновый комплекс, так как полинуклеотиды без ферментов не способны к саморепродукции. Общее признание в этой концепции получила идея, согласно которой блоками макромолекулы была ДНК или РНК. В 80-е годы было обнаружено, что РНК способна к самовоспроизведению без посредничества белков — ферментов (Нобелевская премия 1989 г.). В 1989 г. сформировалось представление о древней РНК, совмещающей черты фенотипа и генотипа (Д.Джойс), что реализовывало идею Дарвина о эволюции ее в ДНК с утратой самостоятельных каталитических функций. Но вскоре оказалось, что в условиях на древней Земле синтез РНК протекал бы с трудом. Кроме того, непонятно участие довольно редкого элемента — фосфора — в качестве компонента нуклеиновых кислот.

Появились новые гипотезы: в тонких пленках органики, адсорбированной на кристаллах пирита или апатитов; в геотермальных источниках на дне океана. Выделяют особую роль в происхождении жизни соединений серы (К. де Дюв, Нобелевская премия 1974 г.). Ясности пока нет, но очевидно, что существование жизни повышает энтропию Вселенной, переводя локально материю в организованное, структурированное состояние.

Глава 21. КОНЦЕПЦИИ САМООРГАНИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

21.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ УПОРЯДОЧЕННОСТИ В ГИДРОДИНАМИКЕ. ПОНЯТИЕ ХАОСА

Рассмотрим течение воды при термодинамическом равновесии, при малых и при больших отклонениях от него. Особенности перехода от ламинарного течения к турбулентному важны для практики, для гидро- и аэромеханики, и они неоднократно решались в рамках физики, механики и математики. Термин «турбулентность» ввел еще Кельвин, производя его от латинского «*turbulentus*» (беспорядочный). Точного описания нет до сих пор, как нет простой математической модели турбулентных движений, которые оказались связанными с нелинейностью.

В теории обычно имеют дело с безразмерным параметром — числом Рейнольдса Re , введенным в гидродина-

мические теории (1883 г.) и связанным с режимом течения. По определению число Re равно скорости потока v , умноженной на характерный линейный размер, фигурирующий в задаче — L , который делится на вязкость среды, отнесенную к плотности n : $Re = vL/n$. Такие теории (гидро- и аэродинамические) развивали русские ученые Н.Е. Жуковский, С.А. Чаплыгин и другие. Одна из наиболее стройных теорий перехода к турбулентности была построена в 1944 г. Л.Д. Ландау. Вообще, это явление очень сложное, можно сказать, что это целый комплекс связанных явлений.

При равновесии, если система замкнута и $v = 0$, ее энтропия максимальна. При наличии градиента давления

жидкость течет в сторону меньших давлений, ее движение происходит как бы слоями, параллельными направлению течения (*ламинарное течение*). Потоки и термодинамические силы связаны линейно, производство энтропии в стационарном состоянии (течении) минимально. При малых значениях числа Re единственная стационарная картина течения соответствует ламинарному течению. Небольшие отклонения скоростей движения от стационарных значений, возникающие из-за флуктуаций, экспоненциально затухают со временем, появляется пара вихрей. При увеличении скорости потока выше критической некоторые из малых возмущений перестают затухать, система теряет устойчивость и переходит в новый режим; вихри начинают осциллировать, движение жидкости становится *турбулентным*. Линейная зависимость потоков и сил нарушается, как и теорема Пригожина о минимальном приросте энтропии, хотя картина еще стационарна. В этом случае говорят о *первой бифуркации* (в пер. — раздвоение, разветвление) или *бифуркации Хопфа*.

С увеличением числа Re новый периодический режим вновь теряет устойчивость, возникают незатухающие колебания с частотой, определяемой величиной Re . Растет неравновесность, и вместе с ней число корреляций и параметров, характеризующих систему. При переходе к турбулентности между отдельными областями течения возникают новые корреляции, новые макроскопические связи. Затем появляются новые частоты, сокращается интервал частот, и, по теории Ландау, появляющиеся новые движения имеют все более мелкие масштабы. Нерегулярное поведение, типичное для турбулентности, — результат бесконечного *каскада бифуркаций*. Говорят, что система из «царства необходимости» переходит в «царство свободы». Но и в «царстве свободы» периодически возникают области, где движение вновь приобретает порядок — «острова необходимости» (рис.41).

Существенно усложняется структура течения и одновременно увеличивается его **внутренняя упорядоченность**. Это уже не тот беспорядок, что был в равновесном состоянии. Существенно меняется характер броуновского движения частиц, турбулентность сказывается на поглощении и рассеянии электромагнитных и звуковых волн. Например, фотографии распределения световой волны, прошедшей через турбулентную жидкость, фиксируют пятна типа интерференционной картины, соответствующей фокусам и каустикам, которые возникают в световом пучке.

Проблема турбулентности важна не только в связи с инженерными приложениями. Большая часть среды Вселенной находится в турбулентном движении, и с неустойчивостями сталкиваются в физике атмосферы и астрофизике, в океанологии и физике планет. Вообще отношение к хаосу было разнообразным. У древних греков хаос считался первичным состоянием материи, но, как отметил Б.Пастернак, «напрасно в годы хаоса искать конца благого».

Хаотические эффекты, нарушавшие стройную картину классической физики с первых дней становления теории, в XVII в. воспринимались как досадные недоразумения. Кеплер отмечал нерегулярности в движении Луны вокруг Земли. Ньютон, по словам своего издателя Р.Котеса,

принадлежал к тем исследователям, которые силы природы и простейшие законы их действия «выводят аналитически из каких-либо избранных явлений и затем синтетически получают законы остальных явлений». Но закон — однозначное и точное соответствие между рассматриваемыми явлениями, он должен исключать неопределенность и хаотичность. Отсутствие однозначности в науке времени рассматривалось как свидетельство слабости и ненаучного подхода к явлениям. Постепенно из науки изгонялось все, что нельзя формализовать, чему нельзя придать однозначный характер. Так пришли к механической картине мира и «лапласовскому детерминизму».

Необратимость процессов нарушила универсальный характер механических законов. Поскольку проследить за движением каждой молекулы газа невозможно, пришлось признать ограниченность своих возможностей и согласиться, что закономерности, наблюдаемые в поведении массы газа как целого, есть результат хаотического движения составляющих его молекул. И тогда Клаузиус ввел «принцип элементарного беспорядка». Беспорядок понимался как независимость координат и скоростей отдельных частиц друг от друга при равновесии. Больцман и положил эту идею в основу своей *молекулярно-кинетической теории*. Максвелл указал на принципиальное отличие механики отдельной частицы от механики большой совокупности частиц, подчеркнув, что большие системы характеризуются параметрами (давление, температура и др.), не применимыми к отдельной частице. Так родилась новая наука — *статистическая механика*. Идея элементарного беспорядка, или хаоса, устранила противоречие между механикой и термодинамикой. На основе статистического подхода удалось совместить обратимость отдельных механических явлений (движений отдельных молекул) и необратимый характер движения их совокупности (рост энтропии в замкнутой системе).

Но идеи хаоса оказались более фундаментальны. При изучении теплового излучения возникли противоречия: электромагнитная теория Фарадея–Максвелла описывала обратимые процессы, но процессы обмена световой энергией между телами, находящимися при разных температурах, ведут к выравниванию температур, т.е. должны рассматриваться как необратимые. Планк ввел гипотезу «естественного излучения», соответствующую гипотезе молекулярного беспорядка. Ее смысл такой: отдельные электромагнитные волны, составляющие тепловое излучение, ведут себя независимо и «являются полностью некогерентными». Эта гипотеза привела к представлению о квантовом характере излучения, которое обосновывалось с помощью теории вероятностей. Хаотичность излучения оказалась связанной с его дискретностью. Квантовый подход позволил Планку и Эйнштейну объяснить ряд законов и явлений (закон Стефана–Больцмана, закон смещения Вина, законы фотоэффекта и др.), которые не находили объяснения в классической электродинамике.

Отступления Луны от траекторий, рассчитанных по законам классической механики, американский астроном Дж.Хилл в конце XIX в. объяснил притяжением Солнца. Французский математик А.Пуанкаре предположил, что вблизи каждого тела есть малозаметные факторы и явле-

ния, вызывающие *нерегулярности*. Поведение даже простой системы существенно зависит от начальных условий, так что не все можно предсказать. Решая задачу трех тел, Пуанкаре обнаружил существование *фазовых траекторий*, которые вели себя запутанно и сложно, образуя «нечто, вроде решетки, ткани, сети с бесконечно тесными петлями; ни одна из кривых никогда не должна пересечь самое себя, но она должна навиваться на самое себя очень сложным образом, чтобы пересечь много, бесконечно много раз петли сети». В начале XX в. на эту работу особого внимания не обратили.

Примерно в это же время Планк начал изучать другую хаотичность классической науки и нашел выход во введении кванта, который должен был примирить прежние и новые представления, но на самом деле сокрушил классическую физику. В строении атомов долгое время видели аналогию со строением Солнечной системы. Интерес к *невозможности однозначных предсказаний* возник в связи с появлением принципиально иных статистических законов движения микрообъектов. Соотношение неопределенности Гейзенберга показывает, что может реализовываться лишь некоторая конечная область состояний Δp и Δq , внутри которой лежат начальные координаты q_0 и импульсы p_0 . При этом внутри выделенной области значения координат и импульсов распределены по вероятностному закону, и по мере эволюции системы увеличивается и область ее состояний Δp и Δq . На небольших временных интервалах неопределенность состояния будет нарастать медленно, и движение системы будет *устойчивым*. Для таких систем классическая механика плодотворна.

Возможность случайных явлений, от которых *нельзя избавиться уточнением начальных условий* и исчерпывающим описанием воздействий на систему, и в *простых динамических системах*, которые считались со времен Ньютона и Лапласа подчиняющимися определенным и однозначным законам механики, была установлена в 60-е годы XX в. Такие движения возникают в механических и электрических *нелинейных колебательных системах*. Пример такого неустойчивого движения — шарик в двух ямах, разделенных барьером (рис.42). При неподвижной подставке шарик имеет два положения равновесия. При колебаниях подставки он может начать перепрыгивать из одной ямы в другую после совершения колебаний в одной из ям. После нескольких затухающих колебаний шарик займет положение в одной из ямок, это положение *равновесия устойчиво*. Периодические колебания с определенной частотой вызывают колебания с широким спектром частот. Положение же на границе между ямами будет *неустойчивым равновесием*. Физический смысл этих понятий применим к равновесию любых систем. Режим функционирования динамической системы устойчив, если малые возмущения затухают со временем, стремясь к нулю. Если же они нарастают, режим неустойчивый.

21.2. ПОРЯДОК И ХАОС В БОЛЬШИХ СИСТЕМАХ. ПОНЯТИЕ ФРАКТАЛА

Сложные системы состоят не только из большого числа элементов, но и большого числа разнообразных связей между ними. Для такой системы все труднее, а то и невозможно, вывести механизмы функционирования — у нее

Кроме того, на систему могут действовать и некоторые случайные силы, которые даже при самой малой величине за длительное время действия приведут к непредсказуемым результатам. Такие системы чувствительны не только к начальным значениям параметров, но и к изменениям положений и скоростей в разных точках траектории. Получается парадокс: система подчиняется однозначным динамическим законам и совершает непредсказуемые движения. Решения динамической задачи реализуются, если они устойчивы. Например, нельзя видеть сколь угодно долго стоящий на острие карандаш или монету, стоящую на ребре. Но тогда задача из динамических переходит в статистическую, т.е. следует задать начальные условия статистическим распределением и следить за его эволюцией. Эти случайные явления получили название *хаоса*.

Новый механизм потери устойчивости, наблюдаемый в процессе конвекции при моделировании процессов возникновения турбулентности описал в 1963 г. метеоролог Э.Лоренц. Он обнаружил в фазовом пространстве трех измерений (координаты — скорость и амплитуды двух температурных мод) область, которая как бы притягивала к себе траектории из окрестных областей. Попадая в область, названную им «*странным аттрактором*» (лат. *attractio* «притяжение»), близкие траектории расходились и образовывали сложную и запутанную структуру. Переход системы на такой режим означает, что в ней наблюдаются сложные *непериодические колебания*, очень чувствительные даже к малому изменению начальных условий. Эта чувствительность к малому воздействию получила красочное название — «эффект бабочки». Значит, небольшие флуктуации, подобные взмаху крыльев бабочки, могут вызвать хаотические режимы. Так как две близкие траектории разбегаются в фазовом пространстве, то предсказание движения по начальным данным не может быть хорошим. С этим связаны трудности предсказания погоды. До Лоренца советские математики Д.В.Аносов и Я.Г.Синай установили существование таких областей и исследовали устойчивость явлений в них.

Возникновением динамического хаоса считается переход к турбулентности, поскольку течение жидкости описывается *детерминистическими уравнениями*. Но детерминированность подразумевает однозначную связь причины и следствия, предсказуемость и воспроизводимость, а когда говорят о хаосе, понимают нечто прямо противоположное. Но это понятие не столь простое. Обратимся для примера к броуновской частице. Под действием случайных толчков со стороны соседних молекул частица будет совершать непредсказуемые блуждания, и ее траектория будет выглядеть запутанной (что и наблюдается под микроскопом). Но при многократном наблюдении можно заметить, что эта запутанная траектория не повторяется, и даже при одинаковых начальных условиях, что соответствует интуитивным представлениям о хаосе.

появляются свойства, которых не было у ее частей или элементов. Эволюцию динамических систем во времени удобно анализировать с помощью *фазового пространства* — абстрактного пространства с числом измерений,

равным числу переменных, характеризующих состояние системы. Примером может служить пространство, имеющее в качестве своих координат координаты и скорости всех частиц системы. Для осциллятора размерность фазового пространства равна 2 (координата и скорость частицы). Такое фазовое пространство есть плоскость, эволюция системы соответствует непрерывному изменению координаты и скорости, и точка, изображающая состояние системы, движется по фазовой траектории. Фазовые траектории такого маятника (линейного гармонического осциллятора), который колеблется без затухания, представляют собой эллипсы: $(mv^2/2) + (m\omega_0^2/2)x^2 = const$.

В случае затухания фазовые траектории при любых начальных значениях оканчиваются в одной точке, соответствующей покою в положении равновесия. Эта точка, или *аттрактор*, как бы притягивает к себе со временем все фазовые траектории (англ. *to attract* «притягивать») и является *обобщением понятия равновесия*, состояние, притягивающее системы. Маятник из-за трения сначала замедляет колебания, а затем останавливается. На его фазовой диаграмме по одной оси откладывают угол отклонения маятника от вертикали, а по другой — скорость изменения этого угла. Получается *фазовый портрет* в виде точки, движущейся вокруг начала отсчета. Начало отсчета и есть аттрактор, поскольку как бы притягивает точку, представляющую движение маятника по фазовой диаграмме. В таком простом аттракторе нет ничего странного.

В более сложных движениях, например, маятника часов с грузом на цепочке, груз играет роль механизма, подкачивающего энергию к маятнику, и маятник не замедляет колебаний. Если запустить часы энергичным толчком маятника, он замедлится до темпа, который обусловлен весом груза, после чего характер его движения останется неизменным. Если толчок будет слабым, маятник, замедляясь, вскоре остановится. Ситуации с сильным начальным толчком на фазовой диаграмме соответствует спираль, обвивающаяся все более плотно вокруг круговой орбиты, аттрактор будет в данном случае окружностью, т.е. объектом не более странным, чем точка. Разным маятникам соответствуют аттракторы, которые называют *предельными циклами*.

Все фазовые траектории, соответствующие разным начальным условиям, выходят на периодическую траекторию, которая отвечает установившемуся движению: если начальные отклонения были малыми, они возрастут, а если амплитуды были большими, то уменьшатся. Биение сердца тоже изображается предельным циклом — установившимся режимом. Если движение состоит из наложения двух колебаний разных частот, то фазовая траектория навивается на тор в фазовом пространстве трех измерений. Это движение устойчиво, а две фазовые траектории, начинающиеся рядом, будут навиваться на тор, не уходя друг от друга. Ситуация соответствует устойчивому установившемуся движению, к которому сама стремится.

При хаотическом движении фазовые траектории с близкими начальными параметрами быстро расходятся, а потом хаотически перемешиваются, так как они могут удаляться только до какого-то предела из-за ограниченности области изменений координат и импульсов. Они могут

оказаться достаточно близко друг к другу, создавая *складки* внутри фазового пространства. (Это возможно только при размерностях $n > 3$ — лишь в 3-м измерении начинают складываться плоские траектории.) Возникает область фазового пространства, заполненная хаотическими траекториями, — *странный аттрактор*. Система (изображаемая точкой) совершает быстрые нерегулярные колебания в одной области фазового пространства, а затем случайно перескакивает в другую область, через некоторое время — обратно. Так динамический хаос «обращается» с фазовым пространством, от этих «хаотичностей» нельзя избавиться, они внутренне присущи системам со странными аттракторами. Хаотические движения в фазовом пространстве порождают случайность, связанную с появлением сложных траекторий в результате растяжения и складывания в фазовом пространстве.

Фрактальность — важнейшее свойство странных аттракторов. *Фракталы* — это объекты, проявляющие по мере увеличения все большее число деталей. Их начали активно исследовать с появлением мощных ЭВМ. Объекты элементарной геометрии — прямые и окружности — природе не свойственны, структура вещества чаще принимает замысловато ветвящиеся формы, напоминающие обтрепанные края ткани. Примеров подобных структур много: это и коллоиды, и отложения металла при электролизе, и клеточные популяции, и форма облаков. И даже удивительно, что они долгое время были в стороне от магистральной линии развития науки. Описывая мир на «языке математики», как выразился Галилей, наука использовала идеальные модели прямой, окружности и т.д., все более отдалялась от реальной природы, от «морфологии аморфного». Подобие объектов природы может выявляться по разным признакам, и математическое понятие фрактала выделяет объекты со структурами разных масштабов. Тем самым в этом понятии отражен иерархический принцип организации мира, и в некотором смысле другая идеализация его.

Фракталы имеют дробную размерность (англ. *fractal* «дробный»). *Геометрию объектов, содержащих элемент случайности*, описывают в рамках своеобразной *дробной размерности*. Термин «фрактал» был введен Б.Мандельбротом в 1977 г. в книге «Форма, случайность и размерность». Он считал, что введение фрактальных множеств позволяет объяснить и предсказать многие явления в самых различных областях. Пример — медленное впрыскивание подкрашенной краской воды в тонкий прозрачный слой вязкой жидкости между двумя близко расположенными пластмассовыми пластинками. Вода распространяется от места впрыскивания, образуя ветвящиеся радиальные узоры. Измеренная площадь прожилок растет по степенному закону как функция радиуса с показателем 1,7. (Расчетная модель дает — 1,68.) При пробое диэлектрика тоже возникают разветвленные структуры разряда, связанные с фрактальными размерностями. Были воспроизведены и наиболее известные фрактальные формы, самовоспроизводящиеся структуры снежинок — их шестиугольные формы возникают из-за диффузии на треугольных решетках. Такие решетки были выбраны для удобства проведения численного эксперимента. К процессу роста

добавляется «шум» — на каждом шаге точка роста определялась случайным образом из многих равновероятных вариантов. Манипулируя в математической модели вероятностями, можно управлять качеством шума, после чего проявляется анизотропия, делающая некоторые направления роста решетки предпочтительнее. Реальная диффузия молекул воды наблюдается в пространстве, окружающем снежинку.

Хаос порождает фракталы, а фазовая траектория фракталов обладает *самоподобием*, т.е. при выделении двух близких точек на фазовой траектории фрактала и последующем увеличении масштаба траектория между этими точками окажется столь же хаотичной, как и вся в целом. В программе ЭВМ это увеличение масштаба достигается уменьшением временного шага при решении динамических

уравнений. Траектория броуновской частицы тоже обладает фрактальными свойствами. Множество Мандельброта воплощает достаточно общий принцип перехода от порядка к хаосу. Идея его состояла в том, чтобы вместо действительных чисел рассмотреть комплексные и наблюдать развитие процесса не на прямой, а на плоскости, т.е. увеличить и размерность от 1 до 2. Оказалось, что при переходе к хаосу важны границы между областями, и каждая точка стремится или к своему центру области (аттрактору), или остается на границе и не может принимать определенные значения. С изменением параметров меняются области аттракторов и их границы. Если же граница превращается в пыль, взрываются и множества Мандельброта.

21.3. ПОРОГОВЫЙ ХАРАКТЕР САМООРГАНИЗАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Пороговый характер самоорганизующихся процессов термодинамика связала с *неустойчивостью*: новая структура есть результат неустойчивости и возникает из *флуктуаций*. В «допороговом» состоянии флуктуации затухают и макроскопически не проявляются (например, в конвекционном потоке при малых T они рассасываются за счет сил вязкого трения). Выше порога флуктуации уже не рассасываются, а усиливаются, достигают макроскопических значений и выводят систему на *новый устойчивый режим*, создают *новую структуру*, возникающую после неустойчивости. Математически это связано с *нелинейностью уравнений*, описывающих систему вдали от равновесия. Если линейное уравнение имеет одно стационарное решение, то нелинейное — несколько. Система может принимать любое из этих состояний, и переход из одного в другое стационарное состояние соответствует преодолению порога.

Катастрофой называют скачкообразное изменение, которое может возникнуть в ответ на плавное изменение внешних условий. Для систем это означает потерю устойчивости. Область математики, занимающаяся катастрофами, названа *теорией катастроф*. Она является в некотором роде обобщением исследования функций на экстремум на случай многих переменных и опирается на теорию особенностей гладких отображений. Отображение поверхности на плоскость есть сопоставление каждой точке поверхности точки плоскости.

Исследования особенностей таких отображений начал в 1955 г. Г. Уитни, ознакомившись с работами Пуанкаре и Ляпунова, а также советских ученых — Андронова, развившего теорию бифуркаций, и Понтрягина, который ввел понятие *грубости* — структурной устойчивости системы. Важность исследований в направлении, названном К. Зиманом *теорией катастроф*, оценил французский математик Р. Тома. Он сформировал эту теорию и ее приложения. Сразу появились работы по применению теории катастроф к разным объектам (исследования биения сердца, физическая и геометрическая оптика, лингвистика, геология, эмбриология, гидродинамика, моделирование деятельности мозга и психических расстройств, восстаний в тюрьмах, поведения биржевых игроков, политики цензуры, теории элементарных частиц, исследования устойчи-

вости конструкций и т.д.). Первые публикации по теории катастроф появились в 1970 г. Как говорит о них видный советский математик академик В.И. Арнольд, «в журналах типа “Ньюс уик” сообщалось о перевороте в математике, сравнимом разве что с изобретением Ньютоном дифференциального и интегрального исчисления. Утверждалось, что новая наука — теория катастроф — для человечества гораздо ценнее, чем математический анализ: в то время как ньютоновская теория позволяет исследовать лишь плавные, непрерывные процессы, теория катастроф дает универсальный метод исследования всех скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений».

Большинство окружающих нас тел ограничено гладкими поверхностями, но видимые контуры тел — это проекции ограничивающих поверхностей на сетчатку глаза. При этом могут возникать некоторые особенности: при проецировании сферы на плоскость в точках экватора образуется складка. На горизонтальной плоскости-проекции выделяется окружность, разделяющая сферу на внутреннюю и внешнюю, при этом точки внутренней сферы имеют по два прообраза (от двух точек сферы), а точки внешней — ни одного, точки окружности — один прообраз. При подходе с внутренней стороны к окружности два прообраза сливаются в один — это и есть особенность складки (рис.43). Кроме того, Уитни нашел и другую особенность — *сборку*. Представление о ней можно получить, рассматривая устойчивость бутылки из-под молока. Уитни показал, что сборка и складка — *устойчивы*. Покачив бутылку из-под молока, можете сами убедиться в этом.

Точке экстремума соответствует равенство нулю производной при второй, отличной от нуля. В многомерном случае производные от функции U будут брать частные, и они должны быть равны нулю, а смешанные, т.е. вторые производные, отличны от нуля и $\det U_{ij} \neq 0$; если потенциальная функция представлена в квадратичной форме, и в случае, например двух переменных, $U = \sum \lambda_{ij}(c) x^2$ функция будет напоминать рельефную карту: вершины гор и седла связаны хребтами, имеются озерные впадины и седлообразные долины. При диагонализации функции выделяются направления главных осей линий максимального градиента. Если представить рельеф заполненным водой, то она соберется в озера, расположенные в низких частях

долин. Минимум, притягивающий воду, получил название аттрактора, причем аттракторы разделяются хребтами, седлами, вершинами на различные бассейны притяжения.

Такая качественная рельефная картина изменится при наличии вырожденных точек, для которых одно или несколько значений $\det U_{ij} = 0$. Это условие получается при некоторых значениях управляющих параметров c_a . Если при изменении c_a система проходит через вырожденную точку, меняется вся топология, поэтому и говорят о катастрофе. При приближении к этой точке — границе перехода — критические точки рельефа начинают сближаться, а потом и вовсе сливаются. Множество точек c_a , отвечающих функции с $\det U_{ij} = 0$, разбивают пространство управляющих параметров на области с разными рельефами.

При пересечении границы областей, являющихся геометрическим местом особенностей, происходят катастрофы состояний системы. Поэтому математики искали эти области и исследовали системы на устойчивость в их окрестностях. Арнольд провел классификацию таких особенностей катастроф и получил удивительное совпадение с классификацией точечных групп, описывающих симметрию молекул, а также с правильными многогранниками в евклидовом пространстве (которыми представлял мир

Платон) и простыми группами Ли. Пока причины этих взаимосвязей до конца не выяснены.

Модели с функцией сборки встречаются в механике конструкций, при описании многих колебательных режимов, в динамике квантовых систем. Теория катастроф позволяет свести огромное многообразие сложных ситуаций к небольшому числу точно изученных схем. Математические образы теории катастроф реализуются в волновых полях. Известны геометрические места точек, в которых происходит фокусировка волнового поля, называемые в оптике *каустиками*. При пересечении каустик происходит скачкообразное изменение состояния — меняется число лучей, приходящих в данную точку пространства. Для 1–2 переменных и не более 5 управляющих параметров существует *семь типов элементарных катастроф*. Все семь канонических катастроф имеют в каустиках свои образы. Теория катастроф, широко используемая в метеорологии, аэро- и гидродинамике, оптике, теории кооперативных явлений, квантовой динамике и др., подводит стандартную и эффективную базу под описание качественных изменений в нелинейных уравнениях, описывающих далекие от равновесия системы.

21.4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ. ПОНЯТИЕ БИФУРКАЦИИ

Если теория катастроф описывает области устойчивости структур, то развитие этой статической картины во времени дается *теорией бифуркаций*. Нелинейная система имеет целый спектр решений, и нужно определить, какие из них «ответвляются» от известного решения при изменении параметра. Изменения *управляющих параметров* способны вызывать катастрофические (большие) скачки переменных состояний, и эти переходы осуществляются почти мгновенно (скачком). Состояние системы, описываемой потенциалом $U(x, c_a)$, задается точкой x_j , в которой потенциал имеет минимум. При изменении внешних условий меняются управляющие параметры c , которые, в свою очередь влияют на изменения $U(x, c)$. Глобальный минимум может стать метастабильным или исчезнуть, а система перейдет из одного локального минимума в другой.

Момент перехода определяется свойствами системы и уровнем флуктуаций в ней. Выделяют два принципа: принцип *максимального промедления*, определяемый существованием устойчивого уровня, и *принцип Максвелла*, определяющий состояние системы глобальным минимумом. Каждому из принципов соответствует множество точек в пространстве управляющих параметров, в котором происходит переход из одного локального минимума в другой. Последовательность бифуркаций, возникающая с ростом неравновесности в системе, меняется, и процесс пойдет по разным сценариям. Выше описано развитие турбулентности при движении жидкости по трубе в зависимости от числа Re (пропорционального скорости потока). Движение становится неустойчивым и при больших Re характеризуется набором N колебаний с несоизмеримыми частотами w_1, w_2, \dots, w_n . Это квазипериодическое движение называют *динамическим хаосом*.

Приведем здесь данную физиком-теоретиком Л.П.Кадановым наглядную иллюстрацию перехода к хаосу, кото-

рую используют при рассмотрении биологических проблем. Пусть на изолированном острове выводятся летом насекомые численностью x_j и откладывают яйца. Потомство их появится на следующее лето численностью x_{j+1} . Рост популяции насекомых описывается первым членом в правой части уравнения $x_{j+1} = c x_j(1 - x_j)$, а убыль — вторым. Параметр роста c (аналог числа Re в уравнениях гидродинамики), результаты расчета — на рис.44, где линии отражают численность популяции при больших значениях j . При $c < 1$ популяция с ростом j вымирает и исчезает, в области $1 < c < 3$ — приближается к значению $x = 1 - (1/c)$, которое получается при подстановке в уравнение вместо x_{j+1} и x_j их предельных значений; эта *область стационарного состояния*. В диапазоне $3 < c < 3,4$ — две ветви решения, и численность колеблется между ними. Она растет резко от малого значения, откладывает много яиц. Перенаселенность, возникающая на следующий год, вновь резко снижает численность в следующем году, так что период колебаний численности — 2 года. Далее, при $3,4 < c < 3,54$ имеем уже 4 ветви, и возникает четырехстадийный цикл колебаний. Так период начинает удваиваться, и далее появляются 8, 16, 32, 64... ветвей.

Итак, существует диапазон значений параметра c , когда поведение системы упорядоченно и периодически; происходит последовательное *удвоение периода*. Такие решения имеют место для широкого класса систем — химических, электрических, гидродинамических, механических и т.д. В 1978 г. М.Фейгенбаум нашел универсальные законы перехода к хаотическому состоянию при удвоении периода. Движение становится аperiodическим при больших значениях n , $(c_y - c)$ порядка d^{-n} , где $n = 4,66$ для всех систем. Если выбрать соседние значения x_j в 2^n цикле, то разность между ними убывает с ростом n как a^{-n} , где $a = 2,5$ и тоже является универсальным. *Законы Фейгенбаума* подтверж-

дены на опытах в совершенно различных по своей природе системах. Иногда их называют (из-за удвоения) *законами каскадов Фейгенбаума* (рис.45). При $c = 3,57$ период уже стремится к бесконечности, движение становится аперiodическим, поведение системы — хаотическим, происходит перекрытие различных решений. Все расчеты на ЭВМ делаются некорректными, зависящими от случайных процессов в самой вычислительной машине, решения для близких начальных условий оказываются далекими.

Сценарии перехода к хаосу могут быть и другими. Исследование сценариев связано с анализом свойств странных аттракторов, к которым притягиваются точки (состояния системы) в многомерном фазовом пространстве. Введение понятия аттрактора — несомненная заслуга теории катастроф, как и пропаганда знаний об их бифуркациях. Сейчас к этим терминам привыкли и фонемы речи, к примеру, называют аттракторами звукообразующей динамической системы.

Если популяция растет так, что отношение прироста численности к общей численности остается постоянным, то говорят, что закон роста линейный, а рост — экспоненциальный. По приросте в 5% популяция увеличивает свою численность вдвое за 14 лет. Но для роста есть пределы, на что обратил внимание П.Ферхюльст еще в середине XIX в. Он заключил, что прирост должен быть *нелинейным*. Уравнение Ферхюльста используют и для описания свойств турбулентного потока при приростах около 200%. В этой области происходят колебания, и становится невозможно достижение оптимальной численности. Когда он превысит 245%, происходит такое усложнение поведения систем, что возникает хаос. Это и обнаружил Э.Лоренц для явлений в атмосфере.

Свойства аттракторов задаются набором траекторий в пространстве и переменных состояния, зависящих от времени, как от параметра. В обычном аттракторе эти траектории простые, среди них есть замкнутые, называемые *предельными циклами*. В странном — *запутанные*, не похожи ни на точки, ни на кривые, ни на поверхности; их представляют многослойными поверхностями.

21.5. СИНЕРГЕТИКА — НОВЫЙ НАУЧНЫЙ МЕТОД

Аналогию с фазовыми переходами отметили несколько ученых, работавших в квантовой электронике: немецкие ученые Грэхем и Хакен и итальянские — де Джиржио и Скулли в 1970 г. Если рассматривать излучение лазера и лампы накачки, то можно сказать, что оно претерпело фазовый переход и изменило свои свойства — свет стал *когерентным, более узким в спектральном отношении и усиленным по направлению испускания*. Сначала такая аналогия казалась поверхностной, но с каждым параметром фазового перехода в парамагнетике удалось сопоставить соответствующий параметр квантовой генерации. Возражение, касающееся искусственности создания самого прибора, творящего эти превращения со светом, были сняты, когда открыли мазеры в космическом пространстве, где генерация происходила естественным путем.

Коллективные процессы Хакен выделил во всех самоорганизующихся системах: коллективно организуются — молекулы в узлах кристаллической решетки,

Странность состоит в том, что, попав в область странного аттрактора, точка (выбранное наугад решение) будет «блуждать» там, и только через большой промежуток времени приблизится к какой-то его точке. И поведение системы, отвечающее такой точке, будет сильно зависеть от начальных условий. Итак, при медленном изменении параметра наблюдается качественно новое явление *затягивания потери устойчивости*, описанное в 1973 г. Шишковой (рис.46). В 1985 г. было показано, что это свойство имеет место во всех системах с *медленно меняющимся параметром*.

После прохождения параметра через бифуркационное значение, соответствующее рождению цикла, или мягкому возникновению автоколебаний, система остается в окрестности неустойчивого состояния некоторое время, за которое параметр меняется на конечную величину. После этого система скачком переходит в момент бифуркации в автоколебательный режим (уже ставший жестким). Существование аттракторов с экспоненциально расходящимися фазовыми кривыми на них и устойчивость явлений установлены в начале 60-х годов в работах С.Смейла, Д.А.Аносова, Я.Г.Синая. Независимо от этих работ Лоренц в 1963 г. описал наблюдавшийся им в численных экспериментах по моделированию конвекции в атмосфере аттрактор с разбегающимися фазовыми кривыми и указал на связь его с турбулентностью. Перепутывание частот при таком режиме оказывается принципиальным, получается, что частоты определены законами динамики и, следовательно, детерминированы. Поэтому и хаос назван детерминированным.

Итак, в точке бифуркации поведение системы «разветвляется», становится неоднозначным. При достижении третьей бифуркации наступает состояние динамического хаоса, который скрывает внутреннюю упорядоченность. *Проблема выяснения условий возникновения порядка из хаоса стала на повестку дня в грядущем столетии*. По словам известного физика — теоретика Уилера, это — *задача номер один современной науки*.

элементарные магнитные моменты (спины) в ферромагнетике, вихри внутри жидкости, порождая видимую на макроскопическом уровне структуру. Возбуждаясь в рабочем веществе лазера, атомы самосогласованно и коллективно испускают когерентное излучение. Итак, *кооперативность* — общая черта процессов самоорганизации. Кроме того, инверсная населенность, как и неравновесное состояние в жидкостях, должна поддерживаться внешней средой, только в этом случае возникающие структуры будут устойчивы. Система должна быть открытой. Устойчивые структуры возникают при *обмене с внешней средой* энергией (или веществом — для биологических систем), которые могут поддержать отклонение от равновесия. Этот внешний поток не только гасит рост энтропии, но может привести к ее понижению. И еще: для самоорганизующихся систем непременными атрибутами являются сложное движение, описываемое *нелинейными уравнениями, и пороговый характер возникновения*.

Эти самоорганизующиеся системы и процесс самоорганизации математически оформили следующим образом: сначала просто записали связь эффекта с его причиной в зависимости от времени, а потом исключили внешнее воздействие, предоставив систему самой себе. Хакен расширил систему так, чтобы включенные в уравнения внешние силы стали силами внутренними, и описал *механизм нарастания внутренних флуктуаций* с помощью введения *стохастического* члена. Так самоорганизация определяется характером взаимодействия *случайных* и *необходимых* факторов системы и ее среды. В дальнейшем он разработал теорию *лазерной генерации* как фазового перехода, а потом *теорию гидродинамических неустойчивостей* как фазовых переходов. Для них удалось получить не только теоретическое подтверждение факта существования ячеек Бенара, но и описание положения шестиугольных цилиндров и их диаметров. И каждый раз в этой аналогии открывались более глубокие черты. Развиваемый метод дал интересные результаты при рассмотрении фазового перехода — разрушения упругой конструкции (моста, например). Так стал работать новый метод — *синергетический, основанный на идее синтеза*.

Самоорганизация происходит при генерации в атомной системе. В кристалле *твердотельного лазера* имеются активные, возбужденные накачкой от внешнего источника атомы, которые работают как антенна и испускают пучок волн. При малой мощности накачки световые пучки испускаются независимо друг от друга, и лазер работает, как обычная лампа, испуская некогерентный свет. Начиная с некоторого значения мощности накачки (*порогового*), все антенны начинают работать согласованно, атомы испускают свет в одной фазе, возникает гигантский пучок *когерентного лазерного излучения, интенсивность излучения резко возрастает* (на торцах кристалла — зеркала, отражающие пучки). *Переход лазера в режим генерации* соответствует *образованию ячеек Бенара*. В сверхкритической области устанавливается стабильный режим лазера, тогда как у простой лампы — неустойчивый. Очевидно, что лазер является системой, находящейся вдали от равновесия. Имеет место кооперативное поведение атомов и излучения.

Основные свойства самоорганизующихся систем: открытость, нелинейность, диссипативность. Система должна находиться в состоянии, далеком от равновесия.

Открытость системы обеспечивается непрерывным потоком вещества, энергии или информации, получаемым из внешней среды на поддержание определенного состояния. В таких системах флуктуации играют определяющую роль, могут привести к необратимому макроскопическому изменению состояния системы, разрушить созданный в ней порядок.

На *нелинейные* системы *не распространяется принцип суперпозиции*, т.е. возможно, чтобы совместные действия двух причин привели к результату, совершенно отличному от того, который был бы, если эти причины действовали по отдельности. Процессы в нелинейных системах носят *пороговый характер* — в состояниях, далеких от равновесия, слабые возмущения могут усиливаться и радикально перестроить систему. Нелинейные системы, открытые и неравновесные, сами создают в среде неоднородности. Между средой и системой может установиться положительная обратная связь (так, в реакции может вырабатываться фермент, присутствие которого стимулирует выработку его же самого). Важно найти эту петлю положительной обратной связи, и в системе начнется режим самоорганизации. В химии — это автокатализ, в молекулярной биологии — основа жизни. Системы неравновесные необычно и «чутко» реагируют на внешнее воздействие и «учитывают» их в своем функционировании. Поэтому некоторые слабые воздействия могут оказать на эволюцию системы большее влияние, чем сильные, но не адекватные собственным тенденциям системы.

Диссипативность — качественно своеобразное макроскопическое проявление процессов, происходящих на микроуровне. Она проявляется в разных формах — способности «забывать» детали некоторых внешних воздействий; в «естественном отборе» среди многих микропроцессов для обеспечения основной тенденции развития; в когерентности микропроцессов, устанавливающей темп развития и пр. С ней связано понятие «параметра порядка», выделяющего только ведущие степени свободы из всех возможных для системы. Уравнения для параметров порядка намного проще, и основная задача — найти параметры порядка системы при моделировании поведения системы.

Итак, переход от хаоса к порядку поддается математическому моделированию, причем универсальных моделей такого перехода оказалось не так много. Они пригодны в разных областях естествознания, в истории, экономике, экологии и пр. История развития природы — история образования все более сложных форм. И они обеспечивают эволюцию природы на всех уровнях организации — вплоть до самых высших. Ферми и фон Нейман в 50-е годы увлеклись решением на ЭВМ задачи о возникновении *теплого хаоса* в цепочке грузов с нелинейными пружинками. Ферми, Паста и Улам (ФПУ) получили неожиданный результат: такая система описывается уравнением КдФ. Так солитоны обрели второе рождение. Они ведут себя как частицы, и были найдены в разных средах. Ярким приложением солитонной теории стало явление *самоиндуцированной прозрачности*, которое привело к идее «оптического телеграфа» — передачи светового солитона по стекловолокну.

21.6. ЭВОЛЮЦИОННАЯ ХИМИЯ.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ УПОРЯДОЧЕННОСТИ В ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ

Эволюционный этап развития химии, начавшийся с 60-х годов, связан с синтезом новых сложных, высокоорганизованных соединений без участия человека. Необходимость решать эволюционные задачи у химиков возникла в связи со следующими причинами. Во-первых, это

мечта овладеть опытом «лаборатории живого организма». Во-вторых, ввести в химию идею истории, чтобы объяснить самопроизвольное восхождение от низших химических материальных систем к высшим. В-третьих, появились работы, указывающие на установленные опытным путем

факты прогрессивной эволюции химических объектов через естественный отбор.

Эволюционный катализ, приведший к понятию эволюционной химии, связан с теорией А.П.Руденко. *Самосовершенствование катализаторов* в реакциях было открыто в работах А.Гуотми и Р.Каннингема в 1958–1960 гг. Обычно катализаторы в ходе реакции стареют, и их деятельность ослабевает, а здесь они перестраивались в сторону повышения активности и селективности. В 1964–1969 гг. А.П.Руденко, развивая идеи своего учителя А.А.Баландина о перестройке поверхности гетерогенных катализаторов под влиянием основной реакции, обобщил опыт действия катализаторов в различных реакциях и сформулировал теорию *саморазвития каталитических систем*. Процессы саморазвития химических систем, подводящие к *биогенезу*, тогда представлялись в русле идей А.И.Опарина. Саморазвитие систем происходит за счет постоянного поглощения катализаторами потока энергии, выделяющейся в ходе реакции. Таким образом система является открытой, в ходе реакции происходит отбор каталитических центров с наибольшей активностью.

Освоение опыта живой природы — давняя мечта химиков. Еще Берцеллиус называл биокатализ основой основ лаборатории живого организма. Ориентацию на опыт живой природы проводили Либих, Пастер, Бертолле, Н.Н.Семенов и другие. Лауреат Нобелевской премии Н.Н.Семенов открыл *разветвленные цепные реакции*, что послужило сближению химии и физики, подтолкнуло к изучению неравновесных систем. Но биокатализаторы очень быстро портятся и теряют свою активность. Встала проблема стабилизации ферментов и создания *иммобилизованных ферментов* — выделенных из живого организма и прикрепленных к твердой поверхности путем адсорбции. Они устойчивы, их можно использовать многократно. Эти работы были начаты И.В.Березиным.

Реакция Белоусова–Жаботинского — один из наиболее впечатляющих примеров возникновения самоорганизации в химических реакциях. В 1951 г. Б.П.Белоусов установил, что в растворе серной и малоновой кислот, сульфата церия и бромиде калия при добавлении в качестве индикатора ферроина можно следить за ходом окислительно-восстановительных реакций по изменению цвета или по спектральному поглощению. Как только все эти вещества сливают в пробирку, раствор начинает менять цвет с красного, означающего избыток Ce^{3+} , на голубой, соответствующий избытку Ce^{4+} . В зависимости от концентрации раствора цвет менялся периодически, и этот период четко сохранялся, поэтому такие реакции стали называть *«химическими часами»*. Кривая изменения поглощения света показывала, что колебания отличаются от синусоидальных, а начиная с некоторого числа колебаний, определяемого концентрацией, спонтанно возникают неоднородности концентрации и образуются устойчивые красные и синие слои, поддерживающиеся в течение получаса. Поскольку реакция идет в замкнутой системе, она приходит в конце концов к состоянию равновесия.

Как выразился А.И.Осипов (МГУ), «можно сказать, что химический организм умирает, задушенный избытком энтропии, которую нет возможности выбрасывать в окру-

жающую среду». Белоусов писал (1957 г.): «В реакционной смеси возникает ряд скрытых, упорядоченных в определенной последовательности окислительно-восстановительных процессов, один из которых периодически выявляется отчетливым временным изменением цвета взятой реакционной смеси». В начале 50-х годов это казалось невозможным. Понимание механизма происходящей реакции связано с работами А.М.Жаботинского, который с 1964 г. исследовал много сходных химических реакций. Сейчас реакция Белоусова–Жаботинского изучается, вошла в учебники и явилась толчком к развитию новой области науки, меняющей мировоззрение эпохи.

Образование структуры в жидкостях в этих химических реакциях заинтересовало И.Р.Пригожина с сотрудниками в начале 70-х годов. В ряде опытов картина изменения цвета как бы замирала, а затем возникали окрашенные слои или устойчивые пространственные структуры типа тех, которые получались в теоретической модели Тьюринга. Английский математик А.Тьюринг сформулировал задачу о возможности образования в реакторе в условиях химической реакции *устойчивых конфигураций промежуточных продуктов* и построил теорию их образования (1952 г.). Фигуры сохранялись, пока не иссякал запас начальных веществ-реагентов. Это свойство роднило их с диссипативными структурами, которые должны непрерывно «подпитываться» энергией и веществом от внешней среды. В обеих ситуациях структуры возникали в открытой системе, находящейся в неравновесном состоянии, и при наличии внешней подпитки, а эффект достигался после преодоления некоего порогового значения меняющегося параметра. Группа Пригожина, переформулировав модель Тьюринга, создала свою, названную *брюсселятором* в честь города, где работали.

Они рассмотрели протекание реакции между двумя сортами непрерывно поступающих в реактор продуктов, причем количество этих веществ поддерживалось постоянным. После реакции продукты реакции выпадают в осадок, но все время в объеме присутствуют два промежуточных вещества. В реакции Белоусова промежуточные вещества периодически мерцали, создавая эффект изменения цвета раствора. Расчет дает *колебательный режим* при определенном соотношении реагентов, изменение соотношений между реагентами меняет характеристики колебаний концентраций промежуточных продуктов реакции. Уравнения, описывающие этот процесс, совпали с уравнениями *автоколебательных систем* (электрических или механических).

Автоколебательные химические реакции нескольких типов были открыты в 70–80-е годы. Выход таких реакций меняется с течением времени, такие реакции были обнаружены и в живой природе. Изучение автоколебательных реакций составляет часть нестационарной кинетики. *Автоволновые процессы* — аналоги автоколебаний для распределенных систем исследовались советскими учеными. Сам термин «автоволны» был введен одним из создателей нелинейной оптики, ставшим потом ректором МГУ, академиком Р.В.Хохловым. Советская школа подошла к изучению явлений самоорганизации со стороны развитой теории колебаний и волн. В конце 50-х годов в научной

школе, созданной академиком Л.И.Мандельштамом, сложилось направление по *теории автоколебаний*. Эти работы продолжил академик А.А.Андронов, сформировавший Горьковскую научную школу. После того как работы Андропова получили известность, автоколебания стали обнаруживать всюду — в механике, радиотехнике, теории автоматического регулирования, химии, биологии, экологии. В это время в МГУ теорию волн развивали Хохлов и С.А.Ахманов, создавший к 70-м годам свою школу нелинейной оптики.

Автоволны — это самоподдерживающиеся волны, которые распространяются в активных средах или средах, поддерживаемых энергетически. За счет внутренних источников среды автоволны способны поддерживать свои характеристики, поэтому автоволны были открыты при химических реакциях, реакциях горения, при передаче возбуждения по нервным волокнам, мышцам, сетчатке глаза, при анализе численности популяций и т.д. Волна возбуждения движется по возбудимой среде без затухания, потери на диссипацию полностью поддерживаются подводом энергии извне.

Пример распространения автоволны — *распространение фронта горения*. В 1938 г. Зельдович и Франк-Каменецкий установили, что в однородной среде фронт горения движется с постоянной скоростью, определяемой параметрами среды и не зависящей от начальных условий, кроме того, остается неизменной и форма профиля этой волны. Для полной аналогии с биологической задачей нужно было наделить среду способностью к восстановлению. Оно имеет место при сгорании травы в степи — после сгорания (третьей стадии) трава вновь отрастает, так что степь может гореть вновь. Сегодня процессы типа *горения с восстановлением* лежат в основе исследования почти *всех возбудимых сред*. В реакции Белоусова–Жаботинского осуществляется процесс окисления с последующим подавлением его за счет выделения ингибитора. При горении вместе с повышением тепла тоже может выделяться какое-то вещество, подавляющее горение. Если выделение ингибитора произойдет быстро, то он может прервать процесс горения, и для продолжения процесса нужно будет запускать новую волну и продолжать это до тех пор, пока не будет израсходовано все горючее. Длительность рефрактерного состояния определяется временем, которое необходимо для рассасывания ингибитора (например, дыма).

При хорошем перемешивании продуктов в объеме модель сильно усложняется (ее называют точечной), но устойчивые во времени и пространстве *структуры промежуточных продуктов сохраняются*. Эти структуры спонтанно возникают под действием термодинамических сил в далекой от равновесия системе, когда ее параметры превышают критические значения, т.е. происходит пере-

стройка в системе, называемая *самоорганизацией*. Группа Пригожина создала модель для изучения волновых явлений реакции Белоусова–Жаботинского, названную ими реакцией в системе БМФ (аббревиатура от слов: бромид — броммалоновая кислота — ферроин). В ней могут быть самовозбуждающиеся волны, или говорят об образовании *волнообразных пространственно-временных диссипативных структур*. Волна концентрации возникает в начале реакции, отражаясь от стенок реактора, ее источник — мелкие неоднородности среды или небольшие повышения концентрации кислоты, т.е. случайные неоднородности или флуктуации, которые до некоторых пор гасятся силами внутренней инерции. Помещая мелкие неоднородности в раствор, можно управлять этими волнами, делать их сферическими или спиральными.

Открытие Белоусовым колебательной реакции И.Пригожин назвал «одним из важнейших экспериментов нашего века». Колебательная реакция имеет в своей основе два типа молекул, способных превращаться друг в друга. При хаотических столкновениях молекул был бы получен усредненный цвет, что и есть вблизи равновесия. Вдали от него происходит иное — раствор меняет синхронно окраску. Получается, что будто молекулы как бы устанавливают связь между собой на больших расстояниях через большие промежутки времени, т.е. есть сигнал, на который молекулы действуют разом, система реагирует как *целое*. Раньше такое поведение считали присущим только живому. Пригожин рисует картину поведения систем с большим числом взаимодействующих субъединиц как вблизи равновесия, так и в удалении от него. При удалении от равновесия система «теряет иммунитет к возмущениям», становится неустойчивой, и если эти возмущения (автокатализ) достаточно сильные, система достигает *точки бифуркации*, в которой ее отклик на внешнее воздействие становится неоднозначным, возврат к начальным состояниям не обязательным. Происходит *необратимый переход* в новое, *когерентное*, состояние: система приобретает новую *диссипативную структуру* (образованную за счет рассеяния — диссипации — энергии). Суть когерентности — в «коллективной стратегии поведения» субъединиц системы. Затем система может пройти и следующие точки бифуркации, так она приобретает черты *историзма*. Так начался новый уровень познания природы — *эволюционный*.

Подходы к проблеме химической эволюции у И.Пригожина и А.П.Руденко основаны на неравновесной термодинамике, но отличаются по самоорганизующимся объектам. Пригожин исследует макросистемы с целью доказательства возможности самоорганизации. Поэтому он не описывает химическую эволюцию с естественным отбором. Руденко исследует самоорганизацию макросистем с целью воссоздания хода химической эволюции через отбор для выяснения биогенеза.

21.7. ПРОЯВЛЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ В МОРФОГЕНЕЗЕ

Разрывный характер образования видов следует из анализа уравнений популяционной генетики, и этот процесс подобен *фазовому переходу* (М.В.Волькенштейн, Б.Н.Белинцев). Время существования вида гораздо более продолжительно, чем время его образования. На каждом скачке

возникают новые признаки, часть из которых становится объектами отбора на той или другой стадии адаптации. Нуклеиновые кислоты и белки меняются постепенно, путем точечных замещений. В процессе образования видов и макроэволюции меняется качество белка, место и время

его работы в организме. Поэтому и важна регуляция работы генов, о которой пока мало известно, поскольку регуляторные вещества функционируют в очень малых количествах.

Существует связь между историческим развитием (филогенезом) и индивидуальным развитием организма (онтогенезом). Образование структур в онтогенезе означает изменения в пространственном использовании основных клеточных механизмов, но не самих механизмов. Так, главные типы клеток позвоночных почти не изменились за 500 млн лет, менялись условия существования клеток от вида к виду. При этом важна *позиционная информация* (ПИ) — этот термин введен Л.Вольпертом (1969 г.). Каждая клетка воспринимает информацию в соответствии со своей генетической программой, и различия в строении организмов определяются уже не самими клетками, а их относительным расположением. Позиционная информация предполагает наличие некоторого физического свойства, которое диктует выбор режима функционирования и пространственной ориентации. После чего начинается стадия трансляции ПИ. Такой подход позволяет разобраться в механизмах становления пространственной упорядоченности клеток, отвлекшись от деталей процессов внутри них.

Морфогены — *специальные белковые молекулы* — сообщают ПИ. Они могут подавлять или активизировать работу регуляторных генов. Морфогены образуют и *морфополя* — совокупности физико-химических процессов, протекающих в далеких от равновесия открытых системах. Математические модели таких процессов дают решение, которое показывает, что в первоначально однородной системе *неоднородности* (пространственные и временные) порождают *упорядоченность*. При этом неоднородности являются продуктом диффузии и автокаталитических реакций, происходящих с разными скоростями для разных веществ.

Механизм формирования пространственной упорядоченности в онтогенезе многоклеточных организмов принципиально по-новому объяснял почти 50 лет назад английский математик А.Тьюринг, т.е. когда почти ничего не знали о молекулярных процессах в клетке. Тьюринг показал, что однородное распределение химических реагентов по объему химического реактора при определенных условиях становится неустойчивым, и у системы появляются новые, *коллективные черты поведения* — в ответ на сколь угодно малые возмущения она покидает исходное состояние и эволюционирует в новое. Тьюринг выделил условия возникновения *самоорганизации*. Клетки могут свободно перемещаться и взаимодействовать друг с другом. При гидролитическом расщеплении АТФ выделяется энергия, которая служит источником работы. Так малые изменения в поле морфогенов, изменения времени и места действия регуляторных генов приводят к существенным изменениям строения целого организма. Пример тому — человек и шимпанзе, их белки и клетки почти одинаковы, отличия в последовательности аминокислот в 44 белках не более 1%. Итак, регуляция синтеза белков определяет вид, а не сами белки. Поэтому и направленная эволюция требует меньшего времени, чем потребовалось бы при простом переборе изменений в геномах.

Гены не постоянны, они могут изменяться не только замещениями нуклеотидов в геномах из-за мутаций, но и из-за переноса генов внутри хромосом, от одной хромосомы к другой, от одного организма к другому. Это «непостоянство генома» — также называется и монография советского биохимика Р.Б.Хесина-Лурье, изданная в 1984 г., — ускоряет эволюцию и говорит о *единстве всего живого*. Генетические элементы могут перемещаться «по горизонтали», и это используется в генной инженерии. Например, кишечную палочку «научили» синтезировать инсулин и интерферон. Все функции клетки и организма определяются белками, т.е. цепями из 20 типов аминокислотных остатков. Эти цепи могут сворачиваться в глобулы, достаточно плотные образования, похожие на несимметричные кристаллы. Для синтеза белков необходимы РНК и ДНК, служащие матрицами для сборки цепей. Нуклеиновые кислоты состоят из четырех сортов нуклеотидов. *Структурный ген* — участок цепи ДНК, ответственный за синтез одной белковой цепи. Нуклеиновые кислоты представляют законодательную власть клетки, тогда как белки — исполнительную. В процессе эволюции меняются гены и соответствующие белки.

Эволюцию на молекулярном уровне позволяет проследить сопоставление однотипных белков разных видов организмов, можно построить и *эволюционное древо* на основе состава белка. Различие может быть связано с естественным отбором, но отбор определяется биологическими функциями белков, фенотипами. Однако не всегда однозначна связь «текста» первичной структуры цепи и пространственного строения белковой глобулы с биологической функцией белка. Не все мутации белков ведут к изменению их функций, часть их оказывается нейтральной. По теории *нейтралистской молекулярной эволюции* японского генетика М.Кимуры (1968 г.) скорость эволюции белка не зависит от размера популяции, причем активная часть цепи эволюционировала медленнее, чем ее «каркас». *Скорость эволюции белка* за год он выражал отношением числа замещенных аминокислотных остатков к одному остатку. Она оказалась *постоянной* для разных линий эволюции при сохранении функций и пространственной структуры молекулы. Величины скоростей замещений были меньше 10^{-9} . Значит, время существования Вселенной недостаточно для построения макромолекул, если бы положение каждого звена фиксировалось отбором.

Выводы Кимуры об эволюции белков и нуклеиновых кислот не следует распространять на естественный отбор, относящийся к организмам. *Нейтральность мутаций в «каркасе»* белка во многом предопределена его строением и кодированием. Эволюция макромолекул отличается от эволюционного поведения организмов. Гомеостаз ведет к тому, что многие вредные мутации ведут себя как нейтральные. Например, какая-то мутация ухудшила свойства белка-фермента, и он стал перерабатывать субстрат медленней. Тогда организм исправит ситуацию каким-то способом, может быть, увеличит количество этого ослабленного фермента.

Математические модели могут изменить представление биологов об *истоках упорядоченности* в эволюции. Ведь все живые организмы являются строго упорядо-

ченными системами. Они обладают сложными структурами, которые поддерживали и воспроизводили себя благодаря слабо выраженному взаимодействию хими-

ческих и поведенческих процессов. Со времен Дарвина биологи рассматривали естественную эволюцию как основной источник порядка.

21.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ТРОФИЧЕСКИМИ УРОВНЯМИ В БИОЦЕНОЗАХ

Между видами существует связь, основанная на конкуренции за места обитания, за пищу и на «сожительстве» (например, лишайники как симбиоз грибов и водорослей). Широко распространена связь «паразит — хозяин», а также передача наследственных признаков через вирусы и бактериофаги (у бактерий).

В современной биологии одно из центральных мест занимают проблемы кооперативных эффектов и самоорганизации, соотношения «случая» и «необходимости». С появлением понятий биоценоза и биогеоценоза в биологических исследованиях стали применяться методы математического моделирования, а использование ЭВМ для анализа процессов в сложных системах существенно продвинуло вперед науку о биосфере и экологию.

По распределению и численности видов имеется огромная информация, но ее нужно перевести на математический язык. Вводят «макроскопические характеристики», описывающие популяцию. Это число особей, соответствующее параметру порядка сложной системы. Оно «управляет» судьбой особей «в среднем». Если n — число особей (их плотность), то изменение его от скорости (числа) рождений g и числа смертей d можно записать как: $dn/dt = g - d$. В простейшем случае $g = \gamma n$, $d = \delta n$, где коэффициенты не зависят от общей численности, а определяются доступностью пищи, климатом, температурой и т.п. Если эти внешние условия поддерживаются постоянными, то уравнение $dn/dt = \alpha n = (\gamma - \delta) n$ описывает растущую или убывающую по экспоненте популяцию. Значит, стационарного решения нет, и рост не зависит от плотности, поэтому они должны зависеть от плотности. Наиболее важным из всех факторов, которые мы проигнорировали, вероятно, является истощение источников питания, который можно учесть введением в уравнения члена: $-\beta n^2$. Тогда получается уравнение Ферхюльста: $dn/dt = \alpha_0 n - \beta n^2$. Здесь предполагается, что пища поступает с постоянной скоростью.

При этом могут встретиться ситуации: конкуренция-сосуществование; хищник-жертва; симбиоз. При сосуществовании различные виды не питаются одной и той же пищей, не поедают друг друга, размножаются в разных местах. Тогда уравнения для численности записываются как: $dn/dt = \alpha_1 n - \beta_1 n^2$, $dm/dt = \alpha_2 m - \beta_2 m^2$. Ситуация усложняется, если виды живут или пытаются жить за счет одного и того же источника пищи или зависят от одних и тех же жизненных условий. Пример: растения, извлекающие фосфор из почвы. При этом одни закрывают листьями другие, лишая их солнечного света, или птицы, которые строят гнезда в одних и тех же дуплах и т.п. Математически это соответствует установлению генерации в лазере или автокаталитической реакции между двумя группами молекул. Решение показывает, что выживет только один тип, наиболее приспособленный. Это выживание может быть достигнуто улучшением индивидуальных констант и адаптацией. Если переключаются источники пищи N, M :

$$\begin{aligned} dN/dt &= \gamma_1(N_0 - N) - \mu_{11}n - \mu_{12}m, \\ dM/dt &= \gamma_2(M_0 - M) - \mu_{21}n - \mu_{22}m, \end{aligned}$$

где $\gamma_1 N_0$ и $\gamma_2 M_0$ — скорости поступления пищи, а $(-\gamma_1 N)$, $(-\gamma_2 M)$ — убыль пищи за счет внутренних причин типа гниения.

Рассматривая правые части уравнений («силы») в плоскости n, m , можно найти условия, при которых возможно сосуществование. Обобщение на случай многих видов и источников пищи производится аналогично. Поэтому понятно, какую важную роль играют экологические ниши для выживания видов и почему виды так приспособлены к ним. Примером такого сосуществования служит распределение растительности по высоте, что изучается специально в биогеографии. Эта модель проста, но позволяет сделать оценки относительно динамики популяций при введении еще одного параметра, отвечающего за появление новых видов.

Гены могут претерпевать мутации, образуя аллели. Мутации происходят случайно, но частота их может меняться под воздействием внешних факторов (повышение температуры, добавление химических агентов, ультрафиолетовое облучение и т.п.), поэтому можно считать, что мутации оказывают «мутационное давление», благодаря которому возникают особи новых типов. Новые свойства сначала будут рецессивными и только через несколько поколений станут доминантными.

Пусть число особей новых типов, возникших из-за случайной мутации, равно n . Их показатели рождения и гибели иные, и новая популяция возникнет только при наличии флуктуаций, которые будем описывать некой флуктуирующей силой и введем ее в уравнения роста популяций:

$$dn_j/dt = \gamma_j n_j - \delta_j n_j + F_j(t).$$

Пусть $F(t)$ зависит от прежней популяции и факторов окружающей среды. Такие уравнения можно записать для разных типов, возникающих в системе. Так, система «подвидов» подвергается «давлению отбора», и это можно учесть, используя вышеприведенные уравнения, если считать, что условия окружающей среды (пища) остались прежними. Тогда для любого из подвидов, пользующихся тем же источником пищи, получим уравнение:

$$dn_j/dt = \alpha_j (g_0 - \sum g_l n_l) n_j - \chi_j n_j + F_j(t).$$

Если скорость мутаций у определенных видов мутантов мала, то выживут только наиболее приспособленные. Как отмечал Хакен, размножение видов можно заменить циклом А-В-С-..., который постулировался при описании эволюции макромолекул. Итак, возникновение новых видов благодаря мутациям (флуктуирующей силе) и отбору (вынуждающей силе) можно рассматривать как аналог неравновесного фазового перехода второго рода, т.е. аналогично процессам в лазере.

Модель Вольтерра-Лотки была одной из первых экологических моделей. В любом биоценозе происходит

взаимодействие между всеми его элементами: особи одного вида взаимодействуют с особями и своего вида, и других видов. Эти взаимодействия могут быть мирными, а могут иметь связь типа «хищник — жертва». Было замечено, что численность хищных рыб колеблется в обратной пропорции относительно колебаний численности мелких рыбешек, которые служат им пищей. Анализ этих колебаний позволил математику Вито Вольтерра вывести уравнения (1926 г.). Если бы в биоценозе было только два вида (очень большое упрощение), то даже и в этом случае динамика численности каждого из видов сильно отличалась бы от картины их независимого существования.

Примером анализа таких структур может служить эволюция численности зайцев и волков, которая характеризуется колебаниями во времени. Изменение численности животных установлено по числу заготовленных шкур. Абстрагируясь от различных обстоятельств, так или иначе влияющих на число зверей, можно проанализировать важнейшую зависимость: зайцы едят траву, а волки — зайцев. Если бы жили одни зайцы, и корма было достаточно, то их численность росла бы по экспоненциальному закону, а если бы жили только волки, то они вымирали бы. При их совместном существовании скорость изменения численности зайцев и волков связана с частотой их столкновений, т.е. пропорциональна количеству тех и других с некоторым коэффициентом. Уже эти соображения приведут к системе уравнений, и при определенных условиях система «хищник — жертва» придет в равновесие.

В случае неожиданной флуктуации (смерть волка или зайца, отстрел во время охоты и т.д.) равновесие нарушается, и система приходит в движение. Она ведет себя как *колебательная система*, численности «хищников» и «жертв» начинают колебаться синфазно, с отставанием. Объяснение простое: рост численности зайцев приводит к увеличению питания для волков, но уменьшает количество травы, так что вскоре численность волков вырастает, а зайцев — уменьшается. Количество травы увеличивается, но запасы пищи для волков уменьшаются, и их численность падает. Тогда поголовье зайцев снова растет, и процесс повторяется. Режим колебаний с определенным периодом оказывается *устойчивым*. Уравнения, описывающие такую систему:

$$dn/dt = \alpha_1 n - \alpha n m, \quad dm/dt = \beta m n - 2\chi_2 m,$$

где первое уравнение описывает число жертв n , второе — число хищников m .

Эти уравнения имеют *периодическое решение*. Стационарное решение соответствует полному вымиранию, и оно единственное устойчивое. В природе такое может случиться, но биологи указывают на возможность животных-жертв найти убежище, не доступное хищникам, так что некоторая часть их выживет. Модель может усложняться введением нескольких типов жертв, которыми может питаться один хищник, и другими вариантами.

Ситуация «симбиоз» тоже моделируется, как и ситуации «хищник-жертва» и «конкуренция-сосуществование». Симбиоз отражает кооперацию отдельных видов в борьбе за существование, когда один вид помогает или покровительствует другому (как, например, кооперация пчел или деревьев). Поскольку скорость размножения одного вида

зависит от наличия другого, то, пренебрегая внутривидовым подавлением $-\beta_1 n^2$ и $-\beta_2 m^2$, имеем:

$$dn/dt = (\alpha_1 + \alpha_1' m) n - \delta_1 n, \quad dm/dt = (\alpha_2 + \alpha_2' n) m - \delta_2 m.$$

Здесь стационарный случай соответствует $n = m = 0$. В этих простых схемах не хватает очень многих факторов — смены климата и погоды, связи возраста особи и смертности, колебаний запасов пищи в разное время года и на разных территориях и т.д. Но использование даже простых моделей при разных, эмпирически учтенных тех или других параметрах дает интересные результаты.

Строя математические модели и проводя полевые испытания, ученые пытаются понять, каким образом паразиты и их хозяева *коэволюционировали* в тесные сообщества. Компьютерные модели этих процессов соответствуют «гонке вооружений» в ходе эволюции. Паразиты должны все время приспосабливаться, чтобы получить от хозяина больше ресурсов для роста своей популяции, а хозяин всячески старается этого не допустить. Биологи-эволюционисты считают, что *существование полов* с эволюционной точки зрения неудачно, и половые различия должны бы постепенно исчезнуть, но этого не происходит. Вероятно, потому, что пол является неким «секретным оружием», сохраняющим большую устойчивость хозяина: ведь паразит приспосабливается обычно к определенному его типу. Как только хозяева становятся жертвами, численность менее распространенных типов хозяев увеличивается, и наоборот. Исследования 90-х годов показали, что бесполое рыбы чаще поражаются паразитами, чем разнополые. Те же результаты получены и на птицах — наличие паразитов наносит ущерб яркому оперению, и самки не выбирают таких самцов.

Созидательный характер симбиоза показала Л. Маргулис, исследуя роль *естественного отбора в эволюции*. Она предположила, что эукариотические клетки, имеющие внутренние органеллы, произошли от симбиоза более простых безъядерных клеток. Митохондрии и хлоропласты содержат иные гены, чем ядра клеток эукариот, но похожи на гены некоторых бактерий. Возможно, им не нужно было изобретать дыхание и фотосинтез методом «проб и ошибок». Большинство травоядных животных зависит от микроорганизмов, живущих в их кишечнике и переваривающих потребляемую животными клетчатку. Эволюционную схему, показывающую, как травоядные животные могли развиваться от симбиоза их предков и микроскопических паразитов растений, очертил П. Прайс. Паразит приобрел способность производить ферменты для переваривания веществ, составляющих организм его хозяина-растения. Животное, вступив в симбиоз с паразитом, смогло использовать для себя продукты ферментации растительной массы. Успех в освоении новых пищевых ресурсов обеспечил преимущества в естественном отборе таких животных.

Жизнь даже небольшого озера невероятно сложна и многообразна, так что описать и «*проверить алгеброй*» эту достаточно простую систему почти невозможно, хотя такие попытки имеют место. Во многих странах разработаны системы моделирования гидробиоценозов — *акватроны*, соединенные напрямую с ЭВМ, которые сами ведут наблюдения и подсчитывают объекты, т.е. система сама кор-

ректирует модель. Например, для учета химико-биологических превращений нужно знать интенсивность роста водорослей, фотосинтеза, смертность каждого вида, скорость разложения органического вещества. Конечно, такие разработки очень дороги, но в конечном счете обещают значительный экономический результат.

Химическое равновесие в биосфере опирается на биотический круговорот. Хотя отдельные циклы изучены недостаточно, ясно, что система находится на грани порядка и хаоса и может быть выведена из этого состояния неустойчивого равновесия даже малым воздействием. Ряд ученых (Л.Маршалл, М.И.Будыко, Л.Беркнер и др.) считают, что резкое уменьшение углекислоты в атмосфере с появлением фотосинтеза приводило к похолоданию и оледенению Земли и, естественно, к *нарушению существовавших циклов*. Собственно, это сейчас и делает индуст-

риально вооруженный человек. Биосфера сформировалась по своему плану, без участия человека, и биогеоценозы пока еще находят резервы, чтобы справиться с вмешательством человека, но неизвестно, насколько их хватит.

Качественно новый этап развития биосферы начался с появлением человека в конце третичного периода, хотя сначала его деятельность мало отличалась от деятельности других существ. Беря у биосферы все необходимое, человек отдавал ей то, что могли использовать другие, т.е. включился в биотический круговорот. Добывание огня выделило человека из ряда других животных. При этом человек не только сумел расселиться в районы холодного климата, пережить оледенения и защититься от хищников, но и научился уничтожать органические остатки, заменив в чем-то микроорганизмы. Так с малых шагов началось ускоряющееся изменение равновесия в биосфере.

21.9. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТИ

Системы, состоящие из многих взаимодействующих элементов, постоянно самоорганизуются, и могут достичь некоторого критического состояния, в котором даже малое событие вызывает цепную реакцию, могущую привести к катастрофе. Когда происходит что-то непредвиденное или катастрофа, то всегда ищут какую-нибудь причину. Например, когда узнали о гибели динозавров по отпечаткам на окаменелостях, одни палеонтологи приписали это исчезновение падению крупного метеорита, другие — извержению вулкана. Землетрясение геологи связывают с неустойчивостью вдоль разлома земной коры. Когда рушится рынок акций, находят где-то неконтролируемую продажу товара.

При исследовании сложных систем пользуются часто теми же методами, что и при исследовании простых систем, так как они разработаны хорошо и проверены. Большую систему делят на малые подсистемы, изучают каждую из них по отдельности и считают, что реакция или отклик в каждой из них пропорционален внешнему возмущению. И описывают динамику больших систем в терминах равновесного состояния, которое изредка нарушается внешним воздействием. Но оказалось, что многие хаотические системы не поддаются такому анализу. П.Баком, К.Визенфельдом и Ч.Тангом из университета в Санта-Барбаре (США) был разработан *метод самоорганизованной критичности*.

Согласно этой теории, многие составные части системы эволюционируют естественным образом к критическому состоянию, в котором малое возмущение может вызвать цепную реакцию, способную повлиять на любое число элементов системы. И хотя в составных частях происходит больше незначительных событий, чем катастроф, цепные реакции разных масштабов вошли в динамику системы. То есть малые события вызывает тот же механизм, что и крупные. Кроме того, составные части системы никогда не достигают равновесия, а эволюционируют от одного метастабильного состояния к другому. Считается, что глобальные характеристики не зависят от микроскопических механизмов, поэтому их нельзя понять, разбивая большую систему на подсистемы, и анализируя части отдельно. Эта модель исследовалась и улучшила понимание

процессов в эволюции земной коры, на рынке акций, в экосистемах и других больших системах, которые ранее анализировали по частям.

Идея теории самоорганизованной критичности началась с наблюдений и опытов с кучей песка. Параллельно в Исследовательском центре IBM Г.Хелд проводил эксперименты по компьютерному моделированию. Он разработал устройство, которое медленно и равномерно — по одной песчинке — насыпало песок на круглую подложку. Песчинки сначала остаются в месте падения, потом громоздятся в кучу, а когда склон становится очень крутым, достигается критическое состояние и одна песчинка вызывает катастрофу — песчинки образуют лавину. Лавина является разновидностью цепной реакции или ветвящегося процесса. Песчинка падает сначала спокойно, но, достигнув неустойчивых песчинок, вызывает лавину. Как только «активные» песчинки скатятся с кучи, процесс прекратится. Куча сохраняет свою крутизну и высоту, потому что вероятности прекращения активности и ее ветвления в среднем равны. Если крутизна будет меньше критической, то лавины будут слабее, а при большей — значительно возрастут.

Эксперименты с мокрым песком показали, что сначала лавины будут меньшего размера, чем в сухой куче, и крутизна превзойдет критическую, но затем резко произойдут обвалы и падения. Такая система неустойчива по многим параметрам, а ее критическое состояние весьма устойчиво («суб- и суперкритические» крутизны стремятся стать «критическими», сбрасывая лишние песчинки). Хотя песок сыплется с постоянной скоростью, его количество меняется со временем, и график этой величины — хаотический сигнал разных длительностей.

Сигнал называют *фликкер-шумом* или *шумом мерцания* типа $(1/f)$, если прошлые события в памяти сохраняются. «Белый», или «случайный», шум означает отсутствие корректировки динамики с прошлыми событиями. Шум мерцания широко распространен в природе: в активности Солнца и излучении галактик, в протекающем через резистор токе, в потоке воды в реке. Шум мерцания содержит наборы всех длительностей и всех амплитуд сигналов, возникающих, когда система, находящаяся в критическом

состоянии, порождает цепные реакции всех амплитуд и длительностей.

Построенная в то же время математическая модель помогла понять *динамику землетрясений, экосистем и турбулентности в жидкости*. Еще в 1956 г. геологи Бено Гутенберг и Чарлз Рихтер (введший шкалу Рихтера) установили закон связи числа сильных и слабых землетрясений, который носит их имена. Согласно этому закону, число землетрясений, высвобождающих за год определенное количество энергии E , пропорционально E^{-b} , где $b \cong 1,5$ и не зависит от географического района. Следовательно, сильные землетрясения происходят реже слабых, и все они связаны с одним и тем же процессом. В качестве последнего обычно называют *механизм проскальзывания*: блоки коры слипаются, а затем скользят относительно других блоков, образуя разломы. При скольжении блоков возникшее напряжение снимается и распространяется на соседние районы.

Этот механизм был проверен на опытах, поставленных в Институте твердого тела в Черноголовке (под Москвой) В.Бобровым и М.Лебежкиным, наблюдавшими «землетрясения», амплитуда и частота которых были связаны *степенным законом*. Они провели опыты с алюминиевым и с ниобиевым стержнями и получили близкие результаты, хотя механизмы процессов в земной коре и модели отличались. Потом была создана компьютерная модель земной коры, состоящая из двух плит — упругой и жесткой, взаимодействующих посредством трения. На этой модели результаты проверялись еще и еще раз, при этом записывались распределения сил до и после взаимодействия, а не детали динамики. Сначала регистрировались слабые «землетрясения», потом система эволюционировала к критическому состоянию, в котором регистрируются как слабые, так и сильные «землетрясения». Равномерное увеличение силы в целом уравнивалось высвобождением ее на границе. Энергия, выделяемая во время землетрясения, связана в модели с числом событий проскальзывания, происходящих после возникновения одиночной неустойчивости в каком-то «эпицентре». Если посчитать число землетрясений каждой величины за длительный период, то получается закон Гутенберга–Рихтера (рис.47). Катастрофические землетрясения представлены частью графика, относящейся к более высоким значениям энергии, а слабые — к низким. С.Обухов из Института теоретической физики им.Ландау показал, что в четырех и более измерениях отдельные ветвящиеся процессы независимы и $b = 1,5$. Это подтверждает предположение о том, что земная кора находится в критическом состоянии. Эта модель проверялась по данным разных стран разными учеными — в Японии, во Франции, в России, США.

Эта модель не только объясняет *эволюцию землетрясений*, но и описывает *распределение их эпицентров*. Степенные законы и ранее применяли для анализа распределений таких объектов, как горы, облака, галактики, вихри в турбулентных потоках. Показатель степени числа r вычисляется по числу объектов внутри сферы радиуса r . Такое распределение называют *фракталом*, и число фрак-

талов в природе велико. Авторы описываемой теории считают фракталы мгновенными «срезами» самоорганизующихся критических процессов. *Фрактальные структуры и шум мерцания — пространственные и временные «отпечатки» самоорганизованной критичности*.

Задача прогнозирования землетрясений осложнена зависимостью от начальных условий; кроме того, иногда сказывается влияние событий, далеких от эпицентра. Численные эксперименты показали, что неопределенность начальных условий растет со временем по степенному, а не по экспоненциальному закону, как в системах с развитым хаосом, т.е. соответствует эволюции на грани хаоса или состоянию «слабого хаоса». В этом проявляется самоорганизованная критичность, и поэтому некоторые прогнозы возможны. Например, если погода есть явление хаотическое, и 100 обсерваторий собирают достаточно информации на двухдневный прогноз, то 1000 обсерваторий могли бы обеспечить прогноз на 4 дня. Если погода — явление слабохаотическое, то 1000 обсерваторий обеспечили бы прогноз на 20 дней вперед. Вместо погоды можно говорить о куче песка или землетрясениях. Например, если известно, что распределение автомобилей на дорогах описывается шумом мерцания, то движения с переменными остановками и троганием с места можно рассматривать как критические лавины, которые распространяются по потоку автомобилей.

В рассмотренных выше случаях теория самоорганизованной критичности применялась к системам с сохраняющимся числом частиц. Анализируя игру Конуэя «Жизнь», имитирующую возрастание сложности в биосистеме, авторы данной теории установили, что распределение живых ячеек является фракталом, который можно описать степенным законом с показателем степени 1,7. Таким образом, число живых ячеек колебалось со временем так же, как размеры лавин в куче песка, и система самоорганизовалась в критическое состояние.

Флуктуации в экономике, как заключили Ф.Андерсон и Б.Арттур, также могут быть вызваны лавинами в самоорганизованном критическом состоянии системы. Б.Мандельброт из корпорации IBM проанализировал такие показатели, как *индекс Доу-Джонса*, и обнаружил *флуктуации*, соответствующие *шуму мерцания*. Различные метастабильные состояния экономики могут быть рассмотрены как метастабильные состояния кучи песка или земной коры. В других экономических моделях состояния более устойчивы, и большие агрегатные флуктуации могут возникать только от внешних ударов, влияющих на разные секции одинаково. Но причины их отыскать трудно, пример тому — депрессия 30-х годов. В модели самоорганизованной критичности причины могут быть и при отсутствии таких «толчков». Большие флуктуации являются внутренним и неизбежным свойством *динамики этой модели экономики*. Такая проверка была проделана, и оказалось, что при изменении спроса на продукт нескольких компаний случайным образом на малую величину может возникнуть «лавина» в продаже и производстве.

Глава 22. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА БИОСФЕРНОМ УРОВНЕ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ

22.1. БИОСФЕРНЫЙ УРОВЕНЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНИ. ОСНОВЫ УЧЕНИЯ ВЕРНАДСКОГО О БИОСФЕРЕ

Биосферный уровень — высшая форма организации жизни на Земле. На этом уровне происходит объединение всех круговоротов веществ и превращения энергии в единый круговорот. Живое организовано по типу иерархических систем: переход с одного уровня на другой связан с сохранением функциональных механизмов, действовавших на предыдущем уровне, и с появлением новых структур и функций, новых качеств. Уровень представлен биосферой — областью активной жизни. Она охватывает *азросферу* (нижнюю часть атмосферы), *гидробиосферу* (гидросферу), *террабиосферу* (поверхность суши) и *литобиосферу* (верхнюю часть литосферы). Биосфера — достаточно тонкий слой: микробная жизнь распространена до высот в 22 км над поверхностью, а в глубинах океанов наличие жизни обнаружено до 10–11 км ниже уровня моря. В земную кору жизнь проникает меньше, микроорганизмы найдены при бурении до глубин 2–3 км. Случайно живая материя попадает и в слои, лежащие рядом «над» и «под», их называют *пара-* и *метабиосферой*, соответственно. Но «пленка жизни» покрывает всю Землю, даже в пустынях и льдах обнаружены следы живого. Распределение жизни крайне неравномерно. В почве (верхние слои литосферы), гидросфере и нижних слоях атмосферы — самое большое количество живого вещества.

Разработка учения о биосфере имеет свою историю. Одним из первых естествоиспытателей, смотревших на Землю, как на целое, был М.В. Ломоносов. Он писал в работе «О слоях земных», что «чернозем не первообразная и не первозданная материя, но произошел от согнития животных и растущих тел со временем», что бурый уголь, каменный уголь и чернозем — результаты *влияния организмов на грунт*. Ломоносов дал общий очерк геологии Земли, доказывал ее древность как планеты. В то время даже окаменелости — ископаемые остатки организмов — далеко не всеми воспринимались как следы некогда бывшей жизни. В 1802 г. Ламарк в «Гидрогеологии» указывал на роль живых организмов в геологических процессах. В книге А.Гумбольдта «Космос», начавшей выходить с 1845 г., собрано много материала о влиянии живого на геологические структуры.

Зарождение отечественной *агрохимии* связано с Д.И. Менделеевым. Он исследовал проблемы питания растений и повышения урожайности сельскохозяйственных структур. Эффективностью минеральных и органических удобрений занимался А.Н. Энгельгардт, а также Д.Н. Прянишников. Возникшая в начале XX в. геохимия исходила из принципов эволюции. *Почвенным лесообразованием* занимался В.А. Обручев, положив начало *мерзлотоведению*, он изучал тектонику и геологию. В.В. Докучаев своей работой «Русский чернозем» открыл *почвоведение* как научную дисциплину, стоящую на стыке геологии, биологии и химии. У него почва — как особое природное тело, имеющее огромное значение для сельского хозяйства. Он дал первую в мире классификацию почв, изложил учение о *ланд-*

шафтно-географических зонах, разработал планы борьбы с засухой, предусмотрев в них ряд агрономических и лесомелиоративных мер. Вместе с ним работали М.М. Сибирцев и П.А. Костычев. Сибирцев участвовал во многих экспедициях в южные степи России, написал первый учебник «Почвоведение» (1889 г.). Костычев показал связь свойств почв с жизнедеятельностью растений и микроорганизмов, роль человека в изменении этих связей. Он установил (1886 г.) решающую роль низших организмов в образовании *перегноя* (гумуса). Немецкий ученый Г. Гельригер показал опытным путем симбиоз бобовых культур с клубеньковыми бактериями (1888 г.), что оказалось важным в *агрономии*.

Русский ученый В.Р. Вильямс доказал роль биологических факторов (природных сообществ высших зеленых растений и микроорганизмов) в формировании плодородия почв. Он впервые подчеркнул значение биологического круговорота элементов в формировании не только органической, но и минеральной части почв, разработал научные основы травопольной системы земледелия (1914 г.). Докучаев, преподававший минералогию, определил жизненные интересы В.И. Вернадского еще в студенческие годы. Вернадский стал известен благодаря своим минералогическим работам, он исследовал эволюцию минералов земной коры (1908 г.), создал геохимическую классификацию химических элементов, разработал учение о миграции атомов в земной коре. Он заложил основы генетического направления в минералогии, и именно общие проблемы минералогии и геологии привели его к *концепции биогеохимии* (1917 г.). Вернадский нарисовал целостную картину механизма формирования земной коры с учетом определяющего влияния жизни.

Учение о биосфере как об активной оболочке Земли, в которой совокупная деятельность живых организмов — *геохимический фактор* планетарного масштаба и значения, создал В.И. Вернадский. Термин «биосфера», введенный (1875) Э. Зюссом, относился к совокупности организмов, обитающих на поверхности Земли. В понятие живых организмов Вернадский включил и человека. Он выделял в биосфере *косное* (солнечная энергия, горные породы, минералы и т.д.) и *биокосное* (почвы, поверхностные воды и органическое) вещества. Хотя живое вещество по весу и объему составляет незначительную часть биосферы, оно играет основную роль в геологических процессах, связанных с изменением нашей планеты. Ему принадлежат современные понятия *биосфера* и *ноосфера* — области действия жизни на Земле и разума человека.

По Вернадскому, биосфера — это *живое вещество планеты и преобразованное им косное вещество*. Живой организм — неотъемлемая часть земной коры, могущая изменять ее. Живое вещество — совокупность организмов, участвующих в геохимических процессах. Организмы берут из окружающей среды химические элементы, строят из них тела, возвращают их в ту же среду и в процессе жизни и после своей смерти. Потому живое вещество связывает

биосферу воедино, является *системообразующим* фактором. Изменения в живом веществе происходят существенно быстрее, чем в косном, поэтому в нем пользуются понятием исторического времени, а в косном — геологического. В ходе геологических времен растет мощь живого вещества и его воздействие на косное вещество, и только в живом веществе за эти времена происходят качественные изменения. И живое вещество, возможно, имеет свой процесс эволюции, вне зависимости от изменения среды.

Понятие «биосфера» — фундаментальное понятие биогеохимии, а не биологическое и не геологическое. Биосфера организует процессы на Земле и около Земли, в ней происходят биоэнергетические процессы и обмен веществ вследствие жизнедеятельности.

Вернадский сделал из принципа Реди — *все живое от живого* — такой вывод. Если «жизненный цикл» отдельного организма конечен, и его существование не беспредельно, то *живое как целое* можно считать геологически бессмертным. *Геологически жизнь вечна*, поэтому, если отдельный индивидуум со временем теряет возможность совершать работу и прекращает свое существование, то сам процесс жизни отличается непрерывным ростом возможности совершать внешнюю работу. Эту идею он выразил в двух принципах, которые назвал биогеохимическими:

1. *Свободная (биогеохимическая) энергия стремится в биосфере к максимальному проявлению.*

2. *При эволюции видов выживают те организмы, которые своей жизнью увеличивают свободную энергию.*

Эти принципы выражают *закон только живой природы* и не противоречат термодинамике. Вернадский показал, что весь поток живого вещества от самых простейших до самых развитых форм, включая разум человека и общественный труд, — та форма движения материи, где действует *закон убывания энтропии*, тогда как она растет для неорганической материи, объясняя космическую эволюцию Земли. Рождение биосферы он рассматривал как планетарно-космическую «*особую точку*» — качественный скачок, до которого на Земле преобладали процессы неживой природы, а после которого стали преобладать процессы в живой. Под действием лучистой энергии *возникает и необратимо развивается органическая жизнь*. И эти два вида материи связаны в *единое целое*.

Вернадский считал, что жизнь на Земле *возникла одновременно* с формированием планеты: «Твари Земли являются созданием космического процесса, необходимой и закономерной частью стройного космического механизма». Среди множества закономерностей, имеющих место в биологии, геологии, биохимии и геохимии, Вернадский выделил основные эмпирические принципы:

1. *Принцип целостности* биосферы обеспечивается самосогласованностью всех процессов в биосфере. Жизнь ограничена узкими пределами — физическими константами, уровнями радиации и пр. *Гравитационная постоянная* определяет размеры звезд, температуру и давление в них. Если она станет меньше, звезды будут иметь меньшие массы, их температура станет недостаточной для протекания ядерных реакций; а — чуть больше, звезды перейдут свою «критическую массу», выйдут из общего круговорота и превратятся в черные дыры. *Постоянная электромаг-*

нитного взаимодействия определяет химические превращения, отвечает за электронную оболочку атомов и прочность связей в молекулах. *Константа слабого взаимодействия*, отвечающего за превращения элементарных частиц, при своем изменении «подорвет» весь наш мир. *Константа сильного взаимодействия*, отвечающего за стабильность ядер атомов, тоже не должна меняться. Иначе — в звездах реакции пойдут по-другому, они могут не дойти до образования углерода и азота. Да и непонятно, возможна ли будет вообще жизнь нашего типа.

2. *Принцип гармонии биосферы и ее организованности* связан с предыдущим. Законы преобразования энергии на Земле, законы движения атомов есть отражение гармонии Космоса, ритмичности движения небесных тел. Основа существования биосферы — положение Земли в Космосе, наклон земной оси к эклиптике, определяющий климат и жизненные циклы всех организмов. Солнце — основной источник энергии биосферы и регулятор биологических процессов. Как отметил еще Ю.Р.Майер, «*жизнь есть создание солнечного луча*».

3. *Космическая роль биосферы в трансформации энергии* — «Можно рассматривать всю эту часть живой природы как дальнейшее развитие одного и того же процесса превращения солнечной световой энергии в действительную энергию Земли». Биосфера является одним и тем же космическим аппаратом с самых древнейших геологических времен. Жизнь оставалась постоянной, менялась ее форма. Само живое вещество — не случайное создание. Источники энергии геологических явлений: космическая, преимущественно солнечная; планетная, связанная с строением и космической историей Земли; внутренняя энергия материи — радиоактивность. Живое вещество трансформирует солнечную энергию в химическое молекулярное движение и в сложность биологических структур.

4. *Растекание жизни* — проявление ее геохимической энергии, аналог закона инерции неживой материи. Мелкие организмы размножаются быстрее, чем крупные. Скорость передачи жизни зависит от плотности живого вещества.

5. *Автотрофные организмы* все нужное для жизни берут из окружающей их косной материи и не требуют для построения своего тела готовых соединений другого организма. Поле существования зеленых автотрофных организмов определяется областью проникновения солнечных лучей.

6. *Космическая энергия* вызывает давление жизни, которое достигается размножением. Размножение организмов уменьшается по мере роста их количества.

7. *Формы нахождения химических элементов*: горные породы и минералы, магмы, рассеянные элементы, живое вещество. Земная кора — сложный механизм, где постоянно движутся атомы и молекулы, происходят разнообразные геохимические круговороты, определяемые в значительной мере деятельностью живого. Закон бережливости в использовании химических тел: раз вошедший элемент проходит ряд состояний, и организм использует только необходимое количество элементов.

8. Жизнь на Земле полностью определяется полем *устойчивости зеленой растительности*. Пределы жизни определяются физико-химическими свойствами соеди-

нений, строящих организм, их неразрушимостью в определенных условиях среды. Максимальное поле жизни определяется крайними пределами выживания организмов. Верхний предел жизни обусловлен лучистой энергией, присутствие которой исключает жизнь и от которой предохраняет озоновый слой. Нижний предел связан с достижением высокой температуры. Интервал в 433°C (от -252°C до $+180^{\circ}\text{C}$) является предельным тепловым щитом.

9. *Принцип постоянства количества живого вещества* в биосфере. Количество O_2 в атмосфере того же порядка, что и количество живого вещества ($1,5 \cdot 10^{18}$ кг и 10^{17} – 10^{18} кг). Скорость передачи жизни не может перейти пределы, нарушающие свойства газов. Идет борьба за нужный газ.

10. *Всякая система достигает положения устойчивого равновесия*, когда ее свободная энергия равняется нулю или приближается к нему, т.е. когда вся возможная в условиях системы работа произведена. Понятие устойчивого равновесия исключительно важно.

Антропный принцип, выдвинутый Г.М.Иддисом (1958 г.), связан с первым из перечисленных здесь принципов Вернадского, он состоит в точном соответствии значений мировых констант с возможностями существования жизни. Удивительная согласованность ряда величин произ-

водит впечатление, что может существовать скрытый принцип, упорядочивающий всю Вселенную. К этому факту обращались очень многие, после 1961 г. особенно. Сейчас его формулируют в двух вариантах — *слабом и сильном*. Как выразился известный американский физик Дж.Дайсон: «Если мы приглядимся ко Вселенной и увидим, как много случайностей послужили нам во благо, то кажется почти, что Вселенная знала, что мы появимся». Это — одна из формулировок слабого принципа, в английской литературе — WAP. Но он не отвечает на многие вопросы типа — почему Вселенная такова, что допустила зарождение жизни. А, может, не нужно создавать теорий, которые не допускают существование наблюдателя? Сильный принцип — возникновение жизни закономерно во Вселенной, но, может, появление наблюдателя и есть цель эволюции Вселенной?

Геологическую роль живого Вернадский классифицировал по пяти категориям: энергетическая, концентрационная, деструктивная, средообразующая, транспортная. Живые организмы творят миграцию химических элементов в биосфере посредством своего дыхания, питания, обмена веществ, непрерывной сменой поколений. Биогеохимическая энергия живого является источников энергии преобразования геосфер.

22.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ЗЕМЛЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ. БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ

Лишь небольшая часть солнечной энергии, поступающей на Землю, улавливается *биосферой*. Ультрафиолетовая часть солнечного спектра, составляющая около 30% всей солнечной энергии, доходящей до Земли, почти полностью задерживается атмосферой. Половина поступающей энергии превращается в тепло и затем излучается в космическое пространство, 20% расходуется на испарение воды и образование облаков и только около 0,02% используется биосферой. В процессе фотосинтеза зеленые растения и водоросли усваивают эту энергию и запасают в форме сахаров. От этого процесса зависит все существование биосферы.

Солнечная энергия преобразуется в процессах брожения и дыхания в специальных структурах клеток растений в энергию химических связей. Эта энергия высвобождается и используется живыми организмами. В центре этих превращений в клетке находится АТФ, которая синтезируется из АДФ и H_3PO_4 за счет световой энергии или энергии, выделяемой при *брожении* или *дыхании*. При гидролизе АТФ выделяется энергия, необходимая для совершения всей работы живого организма — от создания градиентов концентрации ионов и сокращения мышц до синтеза белка.

Биотический круговорот состоит из разных круговоротов. Каждый биоценоз — модель биосферы в миниатюре. Иногда выделяют *биоценотический уровень* организации жизни, представленный биоценозами (экосистемами). Они представляют собой системы, состоящие из взаимозависимых сообществ организмов и абиотических факторов среды, которые сложились в ходе исторического развития. Экосистемам присуще динамическое равновесие между организмами и абиотическими факторами. Важны и исторические факторы формирования биоценоза, и

климат, и ландшафт, и многое другое. Известный американский эколог Е.Одум предложил *систему структурирования экосистем*. Например, экосистема леса включает биоценозы различных типов лесов — хвойные, лиственные, тропические, каждый из которых характеризуется своим круговоротом веществ. Английский ученый Ч.Элтон в 1960 г. обратил внимание на разную насыщенность жизнью различных биоценозов, разница может отличаться в 50 раз.

Переработка пищи в организмах сопровождается выделением энергии, частично запасаемой в форме химической энергии и используемой для совершения работы. Животные, поедая растения, а хищники — травоядных животных, освобождают ее для себя, сжигая сахара и другие питательные вещества при помощи кислорода. Устанавливаются *трофические уровни*. В отличие от простейших существ, у которых сжигание веществ может происходить в любой части организма, высшие животные обладают специальной системой, распределяющей по организму кислород и энергоносители. В легких кровь поглощает кислород и выделяет углекислый газ, в кишечнике она получает питательные вещества. Процессы переваривания пищи обеспечивают разложение сложных компонентов пищи на более простые, которые усваиваются кишечником и поступают в кровь, при этом *высвобождается энергия*. Конечные продукты обмена веществ (избыток солей, воды, чужеродные и токсичные соединения) поступают через почки в мочу и выводятся из организма.

В организме постоянно совершается работа: перекачивается кровь, поглощаются питательные вещества, происходят процессы возбуждения молекул, в которых запасается энергия, выводятся отходы жизнедеятельности и вредные вещества и т.д. Для создания *упорядоченных систем* (высокого уровня генетической или нервной

организации) тоже необходима энергия. Эффективное функционирование систем обеспечивается также информацией о внешнем и внутреннем окружении. Работа состоит в выработке сигналов, регулирующих энергетические процессы, организующих биоструктуры, контролирующих расход энергии и т.п. Животные не получают нужную энергию непосредственно от Солнца. Для добывания пищи им нужна *сенсорная система* ее обнаружения (глаза, уши, нос или сонар — ультразвуковой локатор, иные органы) и *мышечная система*, приводящая в движение органы (руки, ноги, плавники, крылья и т.д.). Кроме того, у животных имеются *регулирующие системы* — железы, выделяющие гормоны, и нервная система.

Удовлетворение энергетических потребностей организмов происходит в рамках *равновесия*, которое устанавливается между различными организмами данной среды обитания (экосистемы). Среди обитателей выделяют два типа организмов: одни способны непосредственно использовать солнечную энергию и перерабатывать в пищу вещества из неживой окружающей среды (*автотрофы*), другие зависят от остальных производителей энергии, т.е. сами не производят необходимую им пищу (*гетеротрофы*). Все элементы, из которых построены организмы, многократно используются в биосфере, тем более что масса всего живого, когда-либо заселявшего Землю, много больше массы самой Земли. *Обмен энергии* в биосфере отличается от *круговорота веществ* в ней. Частично энергия рассеивается при переходе от продуцентов (зеленых растений) к травоядным, а затем и к плотоядным животным (редуцентам), поэтому необходима постоянная подпитка биосферы солнечной энергией.

Биотический круговорот органических веществ — основа биосферы. В закономерностях этого круговорота решена проблема развития и длительного существования жизни. Мы не говорим «бесконечного», потому что все на земле имеет конец: сама Земля представляет собой ограниченное тело, конечен запас минеральных элементов и т.д. «Единственный способ придать ограниченному количеству свойство бесконечного, — писал В.Р.Вильямс в книге «Агрономия», — это заставить его вращаться по замкнутой кривой. Зеленые растения создают органическое вещество, не зеленые разрушают его. Из минеральных соединений, полученных из распада органического вещества, новые зеленые растения строят новое органическое вещество и так без конца» (рис.48).

Жизнь на Земле идет именно таким путем. *Каждый вид* — это только звено в биотическом круговороте. Непрерывность жизни обеспечивается процессами синтеза и распада, каждый организм отдает или выделяет то, что используют другие организмы. Особенно велика в этом круговороте роль *микроорганизмов*, которые превращают останки животных и растений в минеральные соли и простейшие органические соединения, вновь используемые зелеными растениями для синтеза новых органических веществ. При разрушении сложных органических соединений высвобождается энергия, теряется информация,

свойственная сложно организованным существам. Любая форма жизни участвует в биотическом круговороте, и на нем основана саморегуляция биосферы. Микроорганизмы при этом играют двоякую роль: они быстро приспосабливаются к разным условиям жизни и могут использовать различные субстраты в качестве источника углерода и энергии. Высшие организмы не обладают такими способностями и потому располагаются выше одноклеточных в экологической пирамиде, опираясь на них, как на фундамент.

Суммарную годовую продукцию фотосинтеза Земли в $46 \cdot 10^{12}$ кг органического углерода оценил в 1967 г. советский физиолог А.А.Ничипорович. Для производства такого количества углерода нужно связывать $170 \cdot 10^{12}$ кг углекислоты и $68 \cdot 10^{12}$ кг воды, в результате чего образуются $115 \cdot 10^{12}$ кг сухого органического вещества и $123 \cdot 10^{12}$ кг кислорода. При этом усваиваются $440 \cdot 10^{15}$ ккал солнечной радиации. Но в процессе фотосинтеза участвуют не только вода и углекислота. Ежегодно используются около $6 \cdot 10^{12}$ кг азота, $2 \cdot 10^{12}$ кг фосфора и других элементов (калий, кальций, сера, железо, медь, кобальт, молибден и пр.). Большое количество воды тратится на испарение. Эта оценка приближительна. Более точные расчеты дают в 2 раза больший прирост продукции, причем фитомасса океана, составляющая 0,01% от суммарной, дает 25,8% всей первичной продукции Земли. Объясняется это тем, что на суше первичная продукция создается достаточно медленно растущими цветковыми растениями, а в океане — быстро размножающимся планктоном. Из сопоставления всей биомассы растений ($2400 \cdot 10^{12}$ кг) с величиной ежегодной продукции ($235,5 \cdot 10^{12}$ кг) можно сделать вывод, что ежегодно возобновляется менее 0,1 биомассы.

Часть этого вещества ($232,2 \cdot 10^{12}$ кг) должна потребляться животными и микроорганизмами, суммарная масса которых $23 \cdot 10^{12}$ кг. Растения ежегодно продуцируют органическое вещество, составляющее примерно 0,1 их биомассы, а деструкторы должны перерабатывать эту массу органики, которая превышает в 10 раз их вес. Так что компоненты биотического круговорота должны быть тщательно подогнаны. В круговороте неорганики тоже наблюдаются определенные соотношения. По данным Е.Рабиновича (1951 г.), весь кислород в атмосфере оборачивается через организмы примерно за 2000 лет, углекислота — за 300 лет, вода — за 2 млн лет.

Так что за время существования жизни на Земле не только углекислота и кислород, но и вода успела пройти через живое вещество не одну тысячу раз. Распределение производства органики по поверхности Земли весьма неравномерно. В среднем на 1 га приходится 160,9 т растительной массы при годовой продукции в 11,5 т (в тропиках — около 440 т, а в пустынях — около 7 т). Интенсивность круговорота характеризуется скоростью накопления и разложения мертвого органического вещества, которое образуется при опадании листьев и отмирании организмов. Этот круговорот — основа организации жизни в планетарном масштабе, о чем говорил Вернадский.

22.3. СВЯЗИ МЕЖДУ ОРГАНИЗМАМИ В ЭКОСИСТЕМЕ

Биосфера — совокупность всех живых организмов вместе со средой обитания. Эту среду составляют вода, нижняя часть атмосферы и верхняя часть земной коры, населенная микроорганизмами. Живые организмы и среды непрерывно взаимодействуют и находятся в тесном единстве, образуя целостную систему. Как самая глобальная система на Земле, биосфера состоит из ряда подсистем. Вернадский впервые в своих лекциях в Сорбонне (1923–1924 гг.) указал на геологические функции живого вещества, разработал представление о совокупности всего органического мира как единого целого. Эти лекции вдохновили двух молодых людей — Тейяра де Шардена и Ле Руа — на раздумья о месте и назначении человека в природе. Фактором, объединяющим все уровни организации живого в единое целое — биосферу, — является *биотический обмен веществ*.

Биосфера — единство живого и минеральных элементов, вовлеченных в сферу жизни. Она — иерархически построенное единство, включающее разные уровни жизни: *особь, популяция, биоценоз*. В процессе исторического развития и естественного отбора на Земле под влиянием конкретных природных факторов сложились различные группы организмов — сообщества, взаимодействующие со своей средой обитания. Крупнейшие наземные сообщества, тесно связанные с определенными природными зонами и поясами, называются *биомами*. Растения и животные существуют в тесной зависимости от окружающей неживой природы и от других организмов, испытывают на себе их воздействие и приспосабливаются к ним. *Биоценоз или сообщество* — это совокупность растений или животных, населяющих участок среды обитания. *Биогеоценоз или экосистема* — это совокупность сообщества и среды его обитания. Биоценоз — живая часть биогеоценоза — состоит из популяций организмов разных видов, в них сосуществуют популяции видов с разной историей (как и наблюдаемые звезды, каждая из которых имеет свой возраст и свою историю).

Жизнь распределена по земной поверхности крайне неравномерно и в различных природных условиях принимает вид относительно независимых комплексов — *биогеоценозов (или экосистем)*. Каждый из уровней относительно независим от других, давая возможность эволюционировать всей макросистеме. Биогеоценозы могут включать в разных биомах представителей от многих сотен до многих тысяч видов живых организмов.

Экология — особый раздел биологии, который занимается изучением взаимоотношений совместно живущих организмов и их зависимости от внешней среды. Этот термин предложил немецкий биолог-эволюционист Э.Геккель (1866 г.). В буквальном смысле этот термин означает науку о «доме», «месте обитания». Но эта наука стала активно развиваться только через столетие. В зависимости от уровня организации живого различают *аутоэкологию*, которая изучает взаимодействие отдельных видов со средой, и *синэкологию*, изучающую *сообщества*.

Принцип устойчивости — один из главных в экологии. Многокомпонентные системы не всегда отличаются от малокомпонентных по степени устойчивости, вероятно,

устойчивость экосистемы определяется не числом видов, а их экологическими особенностями. Для понимания функциональной структуры биосферы важны *экологические ниши*, определяющие положение вида в *цепях питания*. Строится *пирамида питания*, состоящая из нескольких *трофических уровней* (рис.49). Низший — занимают автотрофные организмы, получающие питание из косного вещества. Это — в большинстве своем растения. Выше располагаются гетеротрофные организмы, питающиеся биомассой растений (травоядные). Затем — гетеротрофы более высокого порядка, питающиеся травоядными животными, и т.д. Эта пирамида связана с *круговоротом веществ* в биосфере. Круг замыкают бактерии и грибы, способные разлагать органические вещества. Пирамида более устойчива, если трофических уровней больше. Но, с другой стороны, чем больше трофических уровней, *тем выше потери энергии в системе*. Было установлено, что два вида, занимающие одну нишу, не могут существовать неограниченно долго в одном месте.

Установлено, что чем больше трофических уровней и чем они разнообразнее, тем биосфера устойчивее. Различные виды организмов образуют друг с другом связи, многие из которых жизненно необходимы, а источником энергии для них служит излучение Солнца. Каждый биоценоз является *трансформатором солнечной энергии* в свою собственную. Сложная *структура экосистем* — необходимая предпосылка *поддержания устойчивости*. Вернадский выделил несколько условий существенности взаимосвязей в экосистемах:

а) каждый организм может существовать только при условии постоянной связи с внешней средой (в том числе и с неживой природой, и с другими организмами);

б) жизнь изменила нашу планету, при этом организмы все шире распространились по ней, стимулируя перераспределение энергии и веществ;

в) размеры популяции растут до тех пор, пока среда может поддерживать их дальнейшее увеличение, после чего наступит равновесие; численность популяции всегда почти равновесна, колеблется около равновесного значения.

Принцип равновесия для живых систем играет огромную роль. Общее равновесие в биосфере поддерживает множество равновесий между разными ее компонентами. Равновесие в живой природе динамично, это колебания около точки устойчивости (рис.50). Если они не изменяются, говорят о *гомеостазе*. Гомеостатический механизм поддерживает в живом организме параметры внутренней среды таковыми, чтобы препятствовать воздействиям внешней среды. Пример — температура, кровяное давление, частота пульса поддерживаются такими механизмами. Естественные биоценозы могут долгое время сохраняться, а могут изменяться, например, заболачивается озеро, образуется торфяник, на месте болота вырастает лес. Таким образом развиваются не только организмы и виды, но и экосистемы. Постоянное взаимодействие всех компонентов биогеоценоза может стать причиной его изменения, а толчком к этому — небольшое изменение.

Экологические сукцессии — закономерные изменения биоценоза, связанные с его эволюцией, — *сукцессии* (лат.

successio «преемственность»). В результате ряда процессов биоценоз приобретает новые возможности для увеличения разнообразия. Экологи называют сукцессию переходом биоценоза из стадии развития и стабилизации в состояние *климакса*. Биоценоз развивается по схеме развития своих компонент. Численность разных компонент периодически чередуется.

Пример: песчаная дюна — трава — сухой дубовый лес — влажный лес из дуба — климаксовый лес из бука и клена. Относительная независимость биоценозов, связи между которыми ограничиваются посредниками из неживых компонент биосферы — минеральными солями, газами атмосферы, водой, обеспечивает устойчивость всей биосферы и ее способность к эволюции.

При этом оказалось, что при развитии систем в направлении повышения устойчивости *увеличивается разно-*

образии. Раньше казалось, что менее сложные виды дают дорогу более сложным и становятся ненужными, но это неверно. Снижение разнообразия, имеющее место в современных условиях, стало опасным для устойчивости биосферы.

Распространенность видов в биоценозах закономерна — чем меньше вес организма (и выделяемая им теплота), тем больше численность особей, причем наибольшим распространением отличается сравнительно небольшое число видов. В растительности высокотравной степи Оклахомы Э. Райс отметил, что 84% трав составляли 9 видов, а на долю остальных 20 видов приходилось только 16% (1952 г.). При изменении условий жизни первыми начинают вымирать специализированные к данным условиям виды, а виды с более широким спектром возможностей выживают.

22.4. САМООРГАНИЗАЦИЯ В ФОРМИРОВАНИИ КЛИМАТА

Понятие *климата* возникло еще в Древней Греции (греч. *klima* «наклон»). Термин был введен древнегреческим астрономом Гиппархом. Люди уже тогда понимали, что погодные условия зависят от наклона земной поверхности к солнечным лучам. До XIX в. считалось, что климат определяется высотой солнца над горизонтом. В соответствии с этим выделяли несколько климатических поясов (то 12, то 36), проходивших почти параллельно экватору, но средние погодные условия в этих поясах все равно отличались. А. Гумбольдт (1845 г.) определил, что «климат» — «специфическое свойство атмосферы, которое зависит от непрерывного совместного действия подвижной поверхности моря, изборожденной течениями противоположных температур, излучающей тепло суши, которая определяет громадное разнообразие в отношении своей орографии, окраски и состояния покрова». Считается, что к климату относится то, что не может быть выражено в терминах погоды.

Погода — это совокупность значений метеорологических параметров в любой момент времени в данной точке пространства. Тогда существует предел предсказуемости погоды в 2–3 недели. При больших интервалах времени речь идет уже о прогнозировании климата, при этом за такой интервал берется 30–100 лет. Этот интервал многократно обсуждался и оспаривался.

Под **климатом** понимают усредненные во времени характеристики, сейчас обычно за это время выбирают 100 лет. Оказалось, что *столетние средние* одинаково устойчивы для всей планеты, поэтому сам климат считается *глобальной* характеристикой. Вековые изменения приписывают изменению климата. На протяжении человеческой жизни (в среднем 75 лет) климат почти не меняется, поэтому погода рассматривается как нечто колеблющееся около постоянной синусоиды времен года, и заметить изменчивость климата удалось только науке. *Климатическая система* тогда включает компоненты, находящиеся между собой в сильной взаимной зависимости: *океан, атмосферу, поверхность суши, биосферу*. И для описания климата Земли нужно знать совокупность статистических характеристик всех компонент системы. Период метеонаблюдений порядка 100–150 лет, а спутниковые виды

наблюдений еще более недавние. Проследить за историей климата Земли можно только по очень ограниченному числу показателей или косвенных признаков.

Зависимость от климата существенна для человечества. И хотя в XXI в. возможно преодолеть последствия таких аномалий, зависимость от климата не ослабевает. Да и человеческая деятельность стала оказывать влияние на климат. Так, климат вблизи созданных водоемов уже отличен от окружающих мест, меняется газовый и аэрозольный состав атмосферы, все меньше остается лесов, появляются пустынные или заболоченные территории. Рост населения земли и развитие цивилизации требуют увеличения потребления энергии, сырья, продовольствия, расширения пахотных земель и т.д., что способно существенно повлиять на изменение климата на больших пространствах. Наука — *климатология* — призвана использовать знания о климате и его изменениях при планировании и управлении хозяйственной деятельностью, но пока она не способна однозначно оценить последствия суммарного воздействия на климат факторов естественного и антропогенного происхождения.

В 1967 г. была начата подготовка международной научной Программы исследования глобальных атмосферных процессов при поддержке ООН. Она должна была обеспечить долгосрочные прогнозы погоды на 3–5 дней и на средние сроки (2–3 недели). К началу 80-х годов была принята Всемирная климатическая программа, которая предусматривала три составляющих: сбор данных о климате и использование этих данных на практике, исследование влияния климата на деятельность человека, изучение изменений климата под влиянием природных и антропогенных факторов. Несмотря на важность изучения климата только в середине нашего века наука начала переходить от описания климата к объяснению его.

Для климата важна величина солнечной энергии, приходящаяся на единицу поверхности Земли за сутки. Световая мощность, попадающая на единичную площадку, или *освещенность*, пропорциональна косинусу угла между направлением на источник света и нормалью к площадке и обратно пропорциональна квадрату расстояния: $E = s (a/r)^2 \cos \varphi$. Здесь $s = 1360 \text{ Вт/м}^3$ — солнечная постоянная.

Расстояние до Солнца в течение года меняется в пределах 3,3%, т.е. разница в освещенности Земли примерно 7%. *Угол наклона* площадки к Солнцу меняется каждый час, день, год и зависит от широты местности. Из-за большой теплоемкости земной поверхности, особенно покрытых водой участков, остывание за ночь не очень велико, и *солнечная энергия, поступающая за сутки*, — важнейшая характеристика климата данной широты. Тепловые характеристики — важные параметры климатической системы. Отражательные свойства поверхности фиксируются таким параметром, как *альbedo поверхности*; важны *тепловые свойства* поверхности, теплообмен атмосферы с подстилающей поверхностью суши и океана, *уровень океана, положение ледников* и т.д. Математические модели общей циркуляции атмосферы позволяют восстановить режим климатической системы с учетом этих факторов в различные времена года. Использование численных экспериментов с разными типами моделей циркуляции атмосферы позволяет *усовершенствовать модели климата* и уточнить картину изменений климата.

Знание эволюции климата важно для понимания процессов его изменения. Основную информацию дают *геологические и палеонтологические* данные, дополняемые данными археологии и истории, относящимися к последнему периоду истории Земли. Для *эпохи голоцена* используют сведения из архивов и летописей. По данным палеонтологии восстановили поверхность суши, ее ландшафт, растительность, орографию, температуру поверхности океана. Сейчас используются для количественных характеристик климата прошлого методы *геохимии. Изотопный анализ* позволил выделить в истории Земли несколько крупных ледниковых эпох; последний был около 650 млн лет назад. Были периодические похолодания и потепления, менялся состав атмосферы. Более надежные данные о климате есть лишь за последние 2 млн лет, когда формировалась биосфера (четвертичный период). Тогда температура Земли была порядка 15°С и колебалась при переходе от ледниковых эпох к межледниковым в пределах 5–10°С. За этот период были и длительные оледенения (≈ по 70–120 тыс. лет), и более короткие межледниковые периоды (≈ по 15–20 тыс. лет). Данные термины вовсе не означают, что Земля была в этот период полностью покрыта льдом или свободна от него.

Методами спектрального анализа различных косвенных климатических показателей были выделены *три периодичности колебаний* климата. Период в 100 тыс. лет связан с таким же периодом колебания эксцентриситета орбиты Земли, период в 40–43 тыс. лет — с периодическими изменениями наклона экватора к плоскости орбиты, а период в 19–23 тыс. лет — с прецессией орбиты. Таким образом, отмеченная периодичность связана с изменениями приходящей на Землю солнечной энергии, вызванными колебаниями орбиты нашей планеты. История цивилизации приходится на последний межледниковый период, начавшийся около 10–15 тыс. лет назад, — *голоцен*. За этот период климат неоднократно менялся. Около 7–8 тыс. лет назад, когда наступило потепление после ледникового периода, климат был существенно теплее, а в некоторых местах и более влажным. Растаял сначала скандинавский ледяной

покров, затем — льды в Северной Америке, а 4,5 тыс. лет назад — лабрадорские льды. Отступила на север граница зоны вечной мерзлоты. Озеро Чад имело размеры Каспийского моря, уровень воды в нем превышал Каспийский на 40 м. Около 4 тыс. лет назад стало холоднее и суше, и многие субтропические зоны стали превращаться в пустыни (в Сахаре, Аравии, в долине Инда). Ряд цивилизаций переместились на возвышенности и долины рек Тигра, Евфрата и др. Потепление отмечалось в VIII–XII вв., потом в XIV–XIX вв. — похолодание, а сейчас — потепление. Деятельность человека вносит все большие коррективы в ход этих процессов.

Излучение Солнца во время образования было на 30% слабее нынешнего, и потом светимость Солнца стала возрастать пропорционально времени. Этот так называемый *парадокс молодого Солнца* должен сказаться на климате планет: если атмосфера 4 млрд лет назад была такой, как сейчас, то она находилась бы в замороженном состоянии еще 2 млрд лет назад. Но данные по изучению осадочных пород этого не подтверждают. По крайней мере, 3,8 млрд лет назад на Земле уже были океаны, поэтому должна измениться и земная атмосфера. Планеты земной группы, вероятно, когда-то были похожи друг на друга. Они состояли почти из одинаковых пород, имели сходные по составу атмосферы и были достаточно большими, чтобы удержать воду на поверхности. Разница в климате возникла из-за *разного круговорота углекислого газа* при обмене им между корой и атмосферой. Как и водяной пар, углекислый газ — газ *парниковый*, так как он, пропуская солнечный свет, поглощает тепло планеты и переизлучает часть его к поверхности. Расчеты, проведенные на ЭВМ, показывают, что умеренный климат Земли обязан своим происхождением особенностям механизма газового обмена: при остывании планеты количество углекислого газа в атмосфере увеличивается, и наоборот. Марс потерял способность возвращать газ в атмосферу, потому он «заморожен», Венера, наоборот, не имеет механизма выведения углекислого газа из атмосферы, а Меркурий вообще не способен удержать атмосферу, и Солнце определяет температуру его поверхности.

Климат менялся вместе с эволюцией планет. Предполагают, что в отдаленном прошлом был значительный *парниковый эффект*, и аммиак (эффективный поглотитель инфракрасного излучения) мог бы создать более теплый климат на Земле, если бы составлял 10⁻⁴ воздуха. Но под действием света аммиак разлагается на азот и водород (газы, не создающие парникового эффекта) и он должен бы все время выделяться из недр планеты для сохранения тепла. Углекислый газ не так быстро разрушается светом, его достаточно много на Земле (хотя в атмосфере его давление всего 0,0003 бар, но наличие его в карбонатных породах достаточно для создания давления и в 60 бар). Если бы в первоначальной атмосфере Земли его было даже несколько десятых долей бара, то создаваемого им парникового эффекта было бы достаточно для того, чтобы вода не замерзала. По оценкам М.Харттра, происходит снижение содержания CO₂ в атмосфере со скоростью, компенсирующей возрастание светимости Солнца. Сравнивая аналогичные расчеты для разных расстояний от

Солнца, он получил, что при расстоянии от Солнца меньше 1 а.е. на 5% атмосфера нагрелась бы настолько, что океаны испарились бы в результате разгоняющегося парникового эффекта, а на расстояниях, больших на 1%, возникло бы разгоняющееся оледенение. *То есть только в узкой полоске расстояний между 0,95 и 1,01 а.е. Земля смогла избежать этой катастрофы климата.*

Этот режим *саморегуляции*, или *отрицательной обратной связи*, обеспечил нашей планете устойчивость климата. Нелепо предполагать, что это случайность — появление жизни на Земле в таком узком кольце солнечной системы. Скорее всего, содержание CO_2 менялось в соответствии с изменением температуры поверхности Земли. Эта *обратная связь* могла обеспечиваться карбонатно-силикатным геохимическим циклом, который способен отвечать за 80% обмена CO_2 между планетой и ее атмосферой на временных интервалах более 0,5 млн лет.

Началом цикла карбонатного метаболизма можно считать растворение атмосферного углекислого газа в водяных каплях и образовании угольной кислоты. Дождевые осадки разрушали горные породы, состоявшие из соединений кальция, кремния и кислорода. Угольная кислота вступает в реакцию с породами на поверхности, высвобождая ионы кальция и бикарбоната, которые поступают в грунтовые воды, а затем в океан, где оседают в скелетах и раковинах планктона и других организмах, состоящих из карбоната кальция (CaCO_3). Останки этих организмов откладываются на океанском дне, формируя *осадочные породы*. Дно моря расширяется, через много тысяч лет эти породы приблизятся к краям континентов. Дно подтягивает их под берег, они попадают в земные недра, где на них действуют давление и температура. Карбонат кальция соединяется с кремнием, образуя *силикатные породы* и выделяя углекислый газ. Газ попадает вновь в атмосферу через извержения вулканов и срединно-океанические хребты. Цикл завершается.

Изменения температуры земной поверхности влияют на количество CO_2 в атмосфере и величину парникового эффекта. Пусть по какой-то причине на Земле стало прохладнее. Тогда меньше воды испарится из океана, меньше выпадет дождей, и уменьшится эрозия почвы, вызванная осадками. Для CO_2 уменьшится скорость покидания атмосферы, а скорость регенерации в процессе карбонатного метаболизма и поступления в атмосферу останется на прежней. Будет накапливаться CO_2 , усилится парниковый эффект и восстановится более теплый климат. Если по какой-то причине на Земле произойдет потепление, обратная связь сработает в другую сторону, и равновесие установится. Предположим, что все океаны вымерзли, дожди прекратились, содержание CO_2 в атмосфере возросло. При современной скорости выделения его давление в 1 бар создается за 20 млн лет, такого количества углекислого газа хватит на поднятие средней температуры до $+50^\circ\text{C}$. Значит, льды растают и восстановится нормальный для жизни климат.

В круговороте углекислого газа большую роль играют организмы, определяющие изменения климата. Около 20% CO_2 , не участвующего в карбонатно-силикатном обмене, выводится из атмосферы фотосинтезирующими растени-

ями. При гниении растений и окислении в почве накапливается CO_2 , и его оказывается в почве больше, чем было 400 млн лет назад, до появления растений. Поэтому превращение силикатных материалов в осадочные карбонатные породы происходит быстрее. По расчетам, исчезновение растений повысило бы температуру на 10° за счет отрицательной обратной связи силикатно-карбонатного цикла.

Во многих геохимических процессах, в том числе в *круговороте азота, углерода и серы* ключевую роль играют бактерии. Если бы эти процессы прекратились, то почва, атмосфера и вода стали бы непригодны ни для каких форм жизни, поэтому эти примитивные одноклеточные организмы можно назвать организаторами жизни на Земле. Увеличение температуры и возросший парниковый эффект создали бы на Земле климат, который был в середине мелового периода 100 тыс. лет назад: теплый и подходящий для некоторых форм жизни (включая и динозавров). По расчетам, только водяной пар, дающий сейчас наибольший вклад в парниковый эффект, не мог бы обеспечить стабильные тепловые условия на планете при меняющейся светимости Солнца.

Если бы на Марсе подобные процессы существовали, они не смогли бы удержать климат в достаточно узких пределах. В атмосфере Марса углекислый газ создает давление только в 0,006 бар, что позволяет обеспечить парниковый эффект на уровне 6°C . Фотографии, полученные станциями «Маринер» и «Викинг», подтвердили, что поверхность Марса покрыта каналами, которые могли образоваться при выходе на поверхность глубоководных вод, когда на Марсе было теплее. Геологи не определили, насколько когда-то температура Марса была выше. Может быть, тогда было больше (раз в 100) углекислого газа, обеспечивающего парниковый эффект. Но Марс меньше Земли по массе почти в 10 раз, и круговорот CO_2 должен быть слабее. Оценки возраста кратеров по количеству покрывающих их метеоритных кратеров показывают, что он больше 3,8 млрд лет. Замедление процесса круговорота CO_2 произошло из-за механизма возврата газа в атмосферу, поскольку на Марсе, вероятно, не была столь выражена тектоника плит. Вулканическая лава покрывала карбонатные остатки, они погружались на глубины, где под действием давления высвобождался газообразный CO_2 , и по оценкам, так могло продолжаться примерно 1 млрд лет. Видимо, Марс из-за меньших размеров охлаждался быстрее, чем Земля: у него было меньше внутреннего тепла, которое он из-за большего отношения площади поверхности к объему скорее терял, его недра охлаждались, теряя способность высвобождать углекислый газ из пород. Углекислый газ из атмосферы постепенно накапливался в грунте, планета становилась все тоньше, меняя климат, и сейчас Марс имеет воду только в замороженном виде.

На Венере вообще почти нет воды. Одни ученые считают, что ее там не было больше, чем нужно для образования гидратированных минералов, так как Венера образовалась из слишком горячей части туманности. Другие — что воды было почти столько, сколько и у Земли, но она, попав в верхние слои атмосферы, распалась под действием солнечного света, а водород улетучился в космическое пространство.

Концепцию разгоняющегося парникового эффекта предложил Хойл (1955 г.), она впоследствии была переработана. Сейчас считается более подходящей теория *влажного парника*, так как при давлении 1 бар и водяного пара, и углекислого газа водяной пар занял бы 50% объема, и большинство его покинуло бы атмосферу. Воздух в такой атмосфере охлаждался бы медленно, на высотах около 100 км образовалась бы холодная ловушка (слой, где низкая температура и высокое давление создают минимум точки насыщения). В ней и происходит фотодиссоциация воды, а из-за расположения ее на большой высоте водород ускользает в космос. Для сравнения: у Земли такая ловушка расположена между 9 и 16 км (вблизи границы тропосферы и стратосферы), поэтому наш водяной пар успевает сконденсироваться, стратосфера оказывается сухой, не позволяя улетучиться водороду. Так к своему сухому и горячему состоянию пришла атмосфера Венеры. Если там и были океаны, они постепенно бы испарились, прекратилось образование карбонатов, CO₂ стал накапливаться в атмосфере. Газообразные соединения серы хорошо растворяются в воде. Сначала их было мало, но затем они стали

накапливаться и образовывать облака из серной кислоты, какие сейчас отличают атмосферу Венеры. К ней приходит солнечного света почти вдвое больше, чем к Земле, но ее кислотные облака отражают до 80% света, и она получает тепла и света от Солнца меньше, чем Земля. При отсутствии парникового эффекта Венера была бы не намного теплее Марса и холоднее Земли.

Светимость Солнца растет примерно на 1% в 100 млн лет, т.е. через 1 млрд лет на Земле могут возникнуть условия, угрожающие существованию жизни и сохранению воды на ней. Многие из механизмов отрицательной обратной связи, которые способствовали стабилизации климата на ней в течение 4,5 млрд лет, могли бы действовать и на другой планете, расположенной дальше от Солнца в расширенном современными расчетами коридоре до 1,5 а.е. или на Марсе, будь он побольше сам и будь побольше его атмосфера. Итак, уже найдена полоса условий существования жизни для обнаруженных у какой-то звезды планет. Поверхность Земли пока представляется нам «космической чашкой Петри», где жизнь может зародиться и эволюционировать к достаточно сложным формам.

22.5. КОНЦЕПЦИИ ЭВОЛЮЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО И ЖИВОТНОГО МИРОВ В ПРОТЕРОЗОЙСКУЮ, ПАЛЕОЗОЙСКУЮ И МЕЗОЗОЙСКУЮ ЭРЫ

Первые клетки, начало биологической эволюции, появились еще в *архейскую эру* (рис.51). Следы жизни были незначительны, обнаружены остатки анаэробных автотрофных предшественников сине-зеленых водорослей. Переход к фотосинтезу, длительный, завершился около 1,8 млрд лет назад, изменив нашу планету. Атмосфера стала кислородной, возник озоновый слой, затрудняющий путь ультрафиолетовому излучению к поверхности. Кислотность морской воды, наоборот, уменьшилась. Произошел переход от *прокариотов к эукариотам*. У них ДНК уже сконцентрирована в хромосомы, сосредоточенные в ядре клетки. Эта клетка воспроизводится почти без изменений, и в неизменной среде эти новые, «дочерние» клетки имеют преимущества при отборе.

В *протерозое*, длившемся 2 млрд лет, мир был населен еще одноклеточными, и началось разделение клеток на растительные и животные. *Растительные клетки* покрывались более жесткой оболочкой, которая защищала их, но и мешала перемещению при добывании пищи. И эти клетки совершенствовались для накопления питательных веществ в использовании фотосинтеза — образовывались клетки как с автотрофным, так и гетеротрофным питанием. Обе эти группы участвовали в биотическом круговороте веществ и взаимно дополняли друг друга. *Животные клетки* были покрыты более эластичной оболочкой, не мешающей им передвигаться в поисках пищи, которой им служили другие клетки — растительные или животные. Эти качества совершенствовались, животные клетки поглощали все более крупные частицы, пропуская их через свою оболочку; естественный отбор ускорял эти усовершенствования.

Следующий этап развития жизни и усложнения ее форм — появление *полового размножения* (≈ 900 млн лет назад). Его достоинство — в повышении разнообразия и ускорении эволюции. Первые многоклеточные представлены губками, кишечнополостными, членистоногими. Их

эволюция шла в направлении совершенствования способов передвижения и дыхания, лучшей координации деятельности клеток и пр. И за 100 млн лет *усложнилась организация* многоклеточных организмов с дифференцированным телом, органами и тканями, имеющими различные функции.

В *протерозое и начале палеозоя* растения живут в морской воде: бурые и зеленые водоросли прикреплены ко дну, а в толще воды — красные и золотистые. Из-за повышения солености морей животные, усваивая минеральные соли, смогли образовывать *жесткий скелет*.

В *кембрии*, длившемся 100 млн лет, произошел гигантский «взрыв» жизни. Появились в море почти все виды животных, которые впоследствии развивались и совершенствовались: ракообразные, кораллы, моллюски, трилобиты, плеченогие, иглокожие. Среди окаменелостей Кембрия немало животных, похожих на современные по планам строения, но которых не нашли в докембрийских пластах. Этот скачок и определил границу между эрами на шкале геологического времени Земли. Но лишь немногие из видов животных, населяющих кембрийские моря, стали предками существующих ныне форм. Большинство остальных видов сейчас вымерли, их считают «ошибками» природы.

Появление огромного *разнообразия видов* изменило и отношения между животными. Все шире распространялись организмы, питающиеся животной пищей, появились *хищники*, стали складываться современные типы животных сообществ, связанных *пищевыми цепями*. Обнаружены окаменелости хищников, поверженных ими жертв и у отдельных животных приспособления для борьбы с хищниками. В ряде новых типов впервые возникли *раковина и экзоскелет*. У некоторых *трилобитов* развились длинные шипы, затруднявшие нападение хищников, которые стали важным элементом среды обитания. Как объяснить такой «взрыв» разнообразия форм 570 млн лет назад? Сильно

изменились концентрация фосфатов, изотопов серы и стронция в морской воде, и, вероятно, еще в протерозое на поверхности суши в результате взаимодействия минералов, климатических условий и бактерий стала образовываться почва. Это подготовило выход на сушу растений, а затем и животных. К началу кембрия при обилии питания в морских водах раскололся суперконтинент, и возникли протяженные береговые линии с тропическим климатом. Считают, что тогда *геном* (набор генов организма) был существенно проще, и меньше мутаций оказывались летальными. Эта генетическая пластичность при обилии незанятых экологических ниш и привели к взрыву разнообразия.

В *ордовике* (500 млн лет назад) в море появились плотоядные, до 10 м в длину, и небольших размеров первые позвоночные — животные, имеющие скелеты. Вероятно, это были бесчелюстные рыбообразные, покрытые чешуей, которая помогала им спастись от хищников. Господствовали иглокожие, трилобиты. В конце ордовика начался переход на сушу: первые споровые растения заселили берега пресных водоемов. В морях распространились полухордовые (типа ланцетника). Поверхность Земли была красноватой из-за коррозии минералов железа в кислородной атмосфере.

В *период силура*, наступившего еще через 100 млн лет, появились *позвоночные* — панцирные рыбы — и продолжило заселение суши растениями. Переход на сушу сопровождался изменениями приспособлений к новой среде. Так, сильно возрос вес тела (на величину выталкивающей силы). В воздухе нет питательных веществ, выше содержание O_2 , и он пропускает свет и звук иначе, чем вода. Переселявшиеся на сушу растения получали эволюционные преимущества — при обилии солнечного света фотосинтез становился более совершенным. Чтобы ограничить испарение влаги, стала формироваться водонепроницаемая оболочка, для обеспечения питанием в новой среде развивалась корневая система, для укрепления и поддержания в условиях суши формировалась и древесина. Происходила дифференциация тела на корень, стебель и лист. Изменилась и репродуктивная система — на суше оказались непригодными для размножения свободно плавающие половые клетки, стали формироваться семена и споры. *Спорофитная ветвь* оказалась более приспособленной к жизни, ее представляют высшие растения. *Гаметофитное* направление представлено мохообразными. К концу силура поверхность Земли вблизи водоемов приобрела зеленый цвет, появились из древних голосеменных и прогимноспривов и животные: паукообразные (типа современных скорпионов).

В *девоне* появились *двоякдышащие*, т.е. помимо дыхания в воде они могли дышать и легкими, а также *хрящевые* рыбы — акулы и скаты. У акул — сложная система поведения, прекрасные обоняние и электромагнитная система ориентации, почти не изменившиеся за прошедшие 400 млн лет. В этот период появились и *костистые* рыбы; двоякдышащие пресноводные рыбы, вероятно, дали жизнь первичным земноводным, а затем и сухопутным позвоночным. Постепенно вырабатываются разные способы укрепления каркаса тела. Помимо внутреннего каркаса у позвоночных, складывается и наружный — у насекомых. Появившиеся

насекомые обладают достаточно сложной системой отражения, врожденные рефлексы преобладают над приобретенными, по всему телу распределены нервные центры, тогда как у позвоночных развивается в основном мозг, и преобладают условные рефлексы над безусловными. Эти различия возрастали и стали проявляться после перехода к жизни на суше. В девоне возникли *грибы*, сушу освоили пауки и клещи.

В *карбоне* климат был теплый и влажный, Земля покрывалась морями и большими заболоченными территориями, широко распространились кораллы и моллюски. В условиях постоянного лета разрослись густые тропические леса папоротникового типа. Началось активное заселение суши животными. Первые из позвоночных, приспособившиеся к новым условиям среды, стали *рептилии*. Яйца рептилий покрыты скорлупой, предохранены от высыхания и снабжены питанием для эмбриона. Некоторые уходили в воду (*мезозавры*), а другие, наоборот, дальше от воды. Растения карбона тоже уже приспособились удерживать воду и защищать семена от высыхания, мощные споровые растения достигали высоты в 40 м. К концу периода распространяются *голосеменные*, у которых происходит переход от одинарного набора хромосом к двойному. Так растут генетические возможности организмов. Дальнейшая эволюция шла по совершенствованию семян. Переход к семенному размножению обладал рядом эволюционных преимуществ, и семенные растения разрастались. Появились первые хвойные. К концу периода карбона (285 млн лет назад) климат стал более засушливым, земноводные, которые преобладали эти 60 млн лет каменноугольного периода, стали вытесняться пресмыкающимися, способными удаляться на большие расстояния от водоемов.

В *конце палеозойской эры*, в *перми*, осваивает воздух огромное количество насекомых. Появились и покрытосеменные растения. Такие семена могли переносить животные, и растения формировали средства, привлекающие животных. *Цветковые* — чрезвычайно разнообразны по цвету, форме и запаху. И сейчас покрытосеменных в тропических лесах — почти 80% растений. Земноводные (амфибии) могли ненадолго удаляться от воды, хотя жили на суше; у них усовершенствовалось легочное дыхание, развились пятипалые конечности с плечевым и бедренным суставами. Но размножались они с помощью икры, которую метали в воду, поэтому они не могли удаляться далеко от водоемов. Господство земноводных на Земле было непродолжительным.

Мезозойская эра продолжалась 170 млн лет и закончилась 70 млн лет назад. Она разделена на три периода: *триасовый*, *юрский* и *меловой*. Ее называют эрой *пресмыкающихся*, распространившихся по всей планете и достигших огромного разнообразия. Некоторые рептилии стали хищными, а другие — травоядными. В триасе размеры динозавров достигли 6 м и возросли по мере овладения планетой. Появились черепахи, крокодилы и первые млекопитающие. В юрский период (длиной в 60 млн лет) возникли *птицы*, но первые (археоптерикс) напоминали не только птиц, но и рептилий. Развивались морские рептилии — ихтиозавры и плезиозавры, появляются летающие ящеры — птеродактили. К меловому периоду появились гигантские

растительоядные динозавры — брахиозавры (до 30 м в длину, весом до 50 т). В конце мезозоя климат стал более холодным, сократились области с богатой растительностью, это привело к гибели сначала растительоядных, а затем и плотоядных динозавров. Преимущество при похолодании получили теплокровные животные — птицы и млекопитающие.

Кайнозойская эра, которая началась 67 млн лет назад, разделена на три периода: *палеоген*, *неоген* и *четвертичный*. Преобладают цветковые растения, насекомые, птицы и млекопитающие; прогрессируют покрытосеменные растения, формируя новые систематические группы. В начале палеогена (палеоцене) после вымирания динозавров почти все экологические ниши на суше, воде и воздухе заняли млекопитающие, среди них появились и первые хищные. Млекопитающие имели большое преимущество перед господствовавшими ранее пресмыкающимися, так как меньше зависели от перемен окружающей среды. Они имели более развитый мозг, вынашивали детенышей в теле матери и питали их через плаценту, поддерживали постоянную температуру тела. От первых хищников произошли копытные, от некоторых видов насекомоядных — приматы.

В неогене появились многочисленные виды обезьян, а в конце периода (плиоцене, 8–3 млн лет назад), сформировались почти все современные семейства млекопитающих (тогда их было 140 семейств, сейчас — до 95). Часть млекопитающих уходит в море: китообразные и ластоногие.

Палеоген и неоген иногда называют *третичным периодом*, а четвертичный период — *антропогеном*. Этот последний период, начавшийся 3 млн лет назад, характеризуется заметным похолоданием. Северное полушарие четырежды подвергается оледенению. Вымирают многие крупные животные: мамонты, саблезубые тигры и др. Природа принимает почти современный вид, формируются в обществе животных тенденции стадного образа жизни. При этом у млекопитающих переход к стадному образу жизни не вел к потере индивидуальности, как у насекомых, а, наоборот, подчеркивал ее. Эти тенденции вели к возникновению человека. Эволюционное отделение ветви, которая привела к современному человеку, произошло примерно 13–7 млн лет назад. В эмбриональном развитии человека есть черты, похожие на всех из типа хордовых, класса млекопитающих, подкласса плацентарных и отряда приматов.

Глава 23. КОНЦЕПЦИЯ КОЭВОЛЮЦИИ

23.1. ЧЕЛОВЕК КАК КАЧЕСТВЕННО НОВАЯ СТУПЕНЬ РАЗВИТИЯ БИОСФЕРЫ

Современные представления о человеке связаны с феноменом его появления как итога эволюции органического мира. Некоторые ученые считают началом выделения человека — появление *прямохождения*. Останки такого рода найдены в Эфиопии, им около 4 млн лет. По ним можно оценить, что не было тогда ни огня, ни орудий труда. Прямохождение освободило руки, развивалась рука для иных целей — на ней выделился большой палец. Появление огня датировано 1,4–1,9 млн лет. Выделяет человека из животного мира не только использование огня, но и *захоронение трупов*. Возраст находки, относящейся к *человеку умелому*, 1,8 млн лет, найдена она в Кении. Считается, что заселение Европы и Азии шло с Ближнего Востока. В районе Горно-Алтайска академик А.П.Окладников обнаружил следы гоминизации на отметке в 1,5 млн лет.

Появление человека — качественно новый этап развития биосферы. *Разум человека* обеспечил этот *качественный скачок*. Благодаря разуму человечество стало самоорганизующейся системой. Еще в прошлом веке И.М.Сеченов говорил, что *понять человека можно только в единстве* — плоти, духа и природы, частью которой он является (1861 г.): «Организм без внешней среды, поддерживающей его существование, невозможен, поэтому в научное определение организма должна входить и среда, влияющая на него». Сходство человека с животным определяется не только элементарным составом и строением тела (те же белки и нуклеиновые кислоты, те же структуры и органы), но и поведением. Кроме того, человеческий зародыш проходит во внутриутробном развитии все стадии эволюции вида. Дополнительные доказательства: рудиментальные органы, атавизм, многие черты поведения. У животных, как и у

человека, развита система общения с помощью тех или иных сигналов.

Изучив огромный материал по зародышевому развитию губок, иглокожих, кишечнопостных и других беспозвоночных, наши естествоиспытатели И.И.Мечников и А.О.Ковалевский обосновали идею *единства происхождения всего органического мира*. Развивая эти исследования и обнаружив внутриклеточное пищеварение в подвижных клетках соединительной ткани беспозвоночных, Мечников разработал теорию фагоцителлы — теорию происхождения многоклеточных организмов (1880 г.). Фагоцитоз — это способность особых, блуждающих клеток активно захватывать и уничтожать различные инородные тела (в том числе и микробы). Если побеждают фагоциты, больной выздоравливает, иначе — умирает. У высших животных, например, типичными фагоцитами (пожирателями) являются белые кровяные тельца — лейкоциты. Процесс проникания лейкоцитов через стенки сосудов к месту воспаления — одно из наиболее интереснейших явлений природы. Мечников был удостоен Нобелевской премии (1908 г.) за исследование флоры кишок. На многих опытах с холерными микробами (в том числе и на самом себе) он доказал, что фагоцитоз играл наибольшую роль в формировании невосприимчивости организма к инфекциям.

В притягательную для любого человека область явлений психики впервые проник И.М.Сеченов. Он первым высказал положение о наличии связи жизненной деятельности клетки с внешней средой. Сеченов доказал, что психическая жизнь человека и, в частности, его сознание, является результатом деятельности мозговых клеток (1863 г.). Он утверждал, что все акты сознательной и бессознательной жизни человека по способу прохождения только

рефлексы, причем источником рефлексов могут быть как внутренние, так и внешние раздражители. У человека в качестве таких источников могут быть нравственные регуляторы. Демонстрируя в опытах на себе скорость прохождения рефлекса, он силой воли задерживал скорость некоторых из них. Отсюда — особая роль столкновения человека с жизнью, воспитания в широком смысле слова в нравственной регуляции поступков, а значит, и в скорости тех или иных реакций организма. Эти исследования дали основания И.П.Павлову утверждать, что «приближается важный этап человеческой мысли, когда физиологическое и психологическое, объективное и субъективное действительно сольются и... отпадет естественным путем противопоставление моего сознания моему телу». Павлов перешел от изучения связей организма с окружающей средой, осуществляемых нервной системой, к исследованиям функций больших полушарий головного мозга. Он разделил рефлексы на безусловные и условные, которые и открыл. За эти исследования Павлов был удостоен Нобелевской премии по физиологии (1904 г.). В 1925 г. он открыл при своей лаборатории две клиники — нервную и психиатрическую, в которых применял для лечения результаты, полученные в исследовании высшей нервной деятельности. Таким образом, он показал, что ряд нарушений душевной деятельности (например, шизофрения) связан с подчеркнутым проявлением так называемого охранительного торможения.

Отличия человека от всего остального мира существенны. Исследуя качественные различия высшей нервной деятельности человека и животных, Павлов разработал учение о двух сигнальных системах: первой (общей для обоих) и второй, свойственной только человеку. Высшие животные способны понимать слова и эмоции, но они не способны к *формированию отвлеченных понятий*. Мышление животных всегда конкретно, тогда как человек формирует обобщения, понятия. При помощи второй сигнальной системы осуществляется высшее человеческое отвлеченное мышление. *Способность к понятийному мышлению отражает интеллект человека*. Человек имеет *план* своей работы, он способен *сознавать и понимать* происходящее в мире. Развитая речь позволила расширить общение с помощью слов, к этому не способны животные. Недаром — «*в начале было Слово*». Оно способствовало организации людей в общество. Человек не только способен к труду, но и целенаправленно изготавливает орудия труда.

Мир живого — самоорганизующийся. Подобно тому, как биосфера — самоорганизующая целостность, таковы и все ее уровни. Для животного мира формой организации является стадо. *Социальное поведение животных* — это *эволюционный механизм, определяемый преимуществами общественной жизни*. Постепенно потребность в другом становилась высшей потребностью, сформировала соответствующие инстинкты. Сначала была анонимная стая, потом появилась безличная, затем личная семья. *Этология* (от греч. «этос» — «поведение, характер, нрав») — наука о поведении животных — показывает, что в животном мире есть общественная жизнь с эмоциями и чувствами. Нобелевские лауреаты за создание и развитие этой научной

дисциплины (1973 г.) — К.Фриш экспериментировал с пчелами, а К.Лоренц и Н.Тинберген изучали более сложное поведение многих видов птиц, рыб, млекопитающих и насекомых.

Проблема соотношения социального и биологического интересов ученых и философов во второй половине XX в., как и уже много веков. Любовь — сдерживающий агрессии фактор, эволюционно выгодный, поскольку обеспечивает репродукцию. У большого числа видов существует *иерархическая* форма организации, в том числе и у высших животных. Управляет такой организацией чаще всего одна особь, но встречается и *коллективное* управление. Пчелы, муравьи и термиты живут колониями, организованными по кастовому признаку. Приматы имеют более гибкую систему, в которой возможно перераспределение ролей. Есть некоторые группы, которые ведут непримиримую борьбу за первенство, таким является общество крыс — спутников человека. По Лоренцу, «крыса пользуется теми же методами, что и человек: традиционной передачей опыта и его распространением внутри тесно сплоченного сообщества... Там, где отбор производится соперничеством сородичей самим по себе, — там существует огромная опасность, что сородичи в слепой конкуренции загонят друг друга в самые темные тупики эволюции». К 80-м годам позиция Лоренца сместилась в сторону большей гуманизации человека и общества. Биологизация человека ведет не только к пассивности в воспитании, она может служить и идейным основанием различных форм расизма. *Но к началу XXI в. был расшифрован геном человека, и стало известно, что расовые отличия в нем отсутствуют.*

Человек — биосоциальное существо. Он прошел этот путь, сформировалось общество, и человек — его *социальный продукт*. Разрушение в человеке его социальной сущности — возврат к животному миру. Эти проблемы обсуждались еще в античности: киники видели природу человека в его естественном образе жизни, Эпикур — в его чувствах (одинаковых у человека и животных), стоики — в разуме. Сейчас этим занимается наука — *социобиология*. Поэтому человек *обречен на развитие, на самоусовершенствование через индивидуальность и через общество*. Индивидуальность оттачивает миропонимание, общество ставит рамки, в которых индивидуальное миропонимание положительную роль играет в обществе. *Появление противоречий* между индивидуальным и общественным отражает инерцию в развитии; она спасает от крайних флуктуаций в развитии индивидуальности и действий индивида в отношении общества. Но слишком большая инерционность общества может и «задавить» личность, если индивидуальность не будет ее учитывать. То есть система «личность — общество» развивается в самосогласованном режиме: личность созревает в обществе, а общество создается под влиянием личности. Единство биологического и социального — основа феноменологизма человека. Примеров нарушения этого баланса в человеческой истории предостаточно, и все они поучительны. Многократно общество расправлялось с индивидуальностью, чем наносило ущерб своему развитию. Часто и гениальная личность ввергала общество в различные авантюры.

Общество прошло определенную эволюцию. Существует *культурно-историческая концепция*, идущая из Древней Греции. Геродот противопоставлял Европу — мир эллинских полисов и Азию — персидскую монархию. Деление на пролетариат и буржуазию того же плана. Согласно другой концепции, история общества — единый процесс развития всей планеты. Сначала она опиралась на четыре империи — Ассирийскую, Персидскую, Македонскую и Римскую. А Дж.Тойнби в качестве единицы всемирной истории выбрал национальное государство, пытаясь совместить эти оба подхода. Потом заменил новой единицей — *локальной цивилизацией*. Он выделил среди «неевропейских» 21 цивилизацию в 16 регионах планеты. Среди цивилизаций — «примитивные» и «цивилизованные». Развитие общества идет через мимесис (подражание). В примитивных цивилизациях это — подражание предкам,

т.е. общества статичны. Цивилизованные общества динамичны: подражают личностям, которые «бросают вызов» трудностям и преодолевают их через усилия. Этими вызовами могут быть природные катаклизмы, нападение чужеземцев или распад предыдущих цивилизаций. Объединительные тенденции развития обществ Тойнби связал с мировыми религиями, среди которых — *зороастризм, иудаизм, буддизм, христианство, ислам*. При этом он постепенно пришел к идее «экуменического» видения истории, считая, что главное последнее единение может быть достигнуто на базе объединенной религии.

Универсальный эволюционизм исходит из представления, что возникновение духовного мира человека, его планеты и Вселенной — результат самоорганизации, саморазвития человека как биологического вида и общества как структур человечества.

23.2. КОНЦЕПЦИИ КОЭВОЛЮЦИИ И НООСФЕРЫ

Химическую эволюцию можно трактовать как результат взаимодействия химических элементов, биологическую — организмов, *концепция коэволюции* объясняет эволюцию в схеме «хищник — жертва», когда оба объекта должны постоянно совершенствоваться. Концепция коэволюции объясняет существование альтруизма у животных — заботу о потомстве, повиновение вожакам, взаимопомощь в трудных условиях и т.д.

Гипотеза о Гее-Земле возникла на основе концепции коэволюции, учения о биосфере и экологии. Ее сформулировали химик Дж.Лаклок и микробиолог Л.Маргулис, выделив *неравновесность* атмосферы Земли. Это обычно считается признаком жизни, ведь присутствие жизни обнаруживается через изменение химического состава атмосферы. Применив к Земле системный подход, Лавлок ввел понятие *геофизиологии*. Они посчитали, что сохранение в течение длительного времени химической неравновесности атмосферы определено совокупностью жизненных процессов. На ранней Земле существовал механизм *автоматического регулирования тепловых процессов*, осуществляемый двуокисью азота. Так возникало препятствие для потепления при росте яркости солнечного света — механизм обратной связи. Изменение яркости солнечного света увеличивает разнообразие, возрастает способность регулировать температуру поверхности Земли, т.е. увеличивается биомасса.

Но Земля — саморегулирующая система. Это связано с наличием биоты и окружающей среды, которая способна менять химический состав атмосферы и поддерживать столь важное для жизни постоянство климата. Когда эта система находится в состоянии, близком к границам саморегуляции (стресс), то даже малое изменение какого-то параметра способно вызвать переход в новое стационарное состояние («эффект бабочки»). *Жизнь на Земле* — сеть связей, обеспечивающих саморегуляцию системы. Маргулис предположила, что эукариотические клетки произошли от симбиоза прокариотических (типа бактерий), митохондрии — от аэробных бактерий, а хлоропласты были тогда фотосинтезирующими бактериями. Поэтому *симбиоз* — один из наиболее созидательных факторов эволюции. Совместная жизнь является источником разнообразия,

приводит к появлению новых видов и признаков. Эта симбиотическая эволюция хорошо согласуется с идеями синергетики. Образование колонии можно описать так. Начальной флуктуацией служит несколько большая концентрация комочков земли, возникшая в какой-то точке пребывания колонии термитов. Каждый такой комочек привлекателен для других, поскольку пропитан гормонами. Флуктуация разрастается до размеров, ограниченных радиусом действия гормона. Так *целесообразность* на уровне организмов становится целесообразностью на уровне сообщества.

Попытку научно обосновать качественные изменения взаимодействия природы и общества под влиянием деятельности человека предпринял Вернадский. Он считал, что Земля и Космос — единая система, в которой жизнь и живое вещество играют важную роль. Вернадский ссылался на минеролога и биолога Д.Д.Дана — современника Ч.Дарвина, который показал, что эволюция живого вещества идет в определенном направлении. Он указал, что в ходе геологического времени (более 2 млрд лет) наблюдается скачкообразный рост и усовершенствование центральной нервной системы (мозга), начиная с ракообразных и моллюсков до человека, этот необратимый однонаправленный процесс Дана назвал *цефализацией*. Исходя из геологической роли человека А.П.Павлов говорил об *антропогенной эре*. В XX в. человек не только закончил карту Земли, вышел в Космос и осмотрел ее со стороны, он благодаря средствам связи стал частью единого человечества. Развитие Человека и Общества в природной среде становятся неразрывными. Но по массе своей человечество составляет ничтожную долю массы планеты, значит, сила в растущем разуме, в цефализации.

Появление человека не только изменило биосферу, но и результаты ее *планетарного влияния*. Начался переход простого приспособления организмов к разумному поведению и целенаправленному изменению окружающей природы разумными существами. Постепенно человек стал решающим фактором преобразования планеты, и последствия появления человека разумного на Земле многофункциональны. Человек вывел много новых растений и животных, увеличив разнообразие природы, но многие виды в

силу разных причин оказались на грани уничтожения или уже исчезли. Живая природа активно реагирует на вмешательство в нее человека. Быстро возросла, например, невосприимчивость грызунов и насекомых к ядам, которые использует человек. Появляются самые разные мутанты. Человек создает *техносферу*, несоставляющую целостную систему с биосферой, не способствует созданию новых запасов энергии. Уничтожение полезных ископаемых и живого, изменение ландшафтов и состава атмосферы ставит биосферу уже на *грань катастрофы*.

Вернадский говорил, что «биосфера перейдет однажды в сферу разума — *ноосферу*. Произойдет великое объединение, в результате которого развитие планеты сделается направленным силой Разума». Сам термин возник на семинаре, где выступал Вернадский со своей концепцией биосферы. Термин использовали широко Э. ле Руа и П.Тейяр де Шарден, но понимали под ноосферой «оболочку мысли» на планете. По мнению Тейяра де Шардена, возникновение мысли — явление, которое знаменует собой «трансформацию, затрагивающую состояние всей планеты».

Ноосфера — это высшая ступень интеграции всех форм существования материи, когда любая преобразующая деятельность человека будет основываться на научном понимании естественных и социальных процессов и органически согласовываться с общими законами развития природы. Это высший этап эволюции системы «природа — общество», который только формируется и должен быть, если человечество хочет жить без глобальных потрясений. Такой тип отношений «природа — общество» соответствует *коэволюции*. В структуре ноосферы можно выделить человечество, совокупность научных знаний, сумму техники и технологий в единстве с биосферой.

Солнечная энергия запустила геохимические циклы круговорота химических элементов, в которые втягиваются все новые массы вещества. Образовавшиеся толщи осадочных пород запасли энергию биомассы (в форме газа, угля, нефти). Эти преобразования планетарного масштаба и произвели человека — носителя Разума. Человек зависит от биосферы, он — ее порождение. Чтобы подчинить своему развитию среду обитания, он должен овладеть биосферными процессами, иначе будет обречен как биологический вид. Но обеспечение коэволюции человека, природы и общества требует введения некоторых ограничений деятельности. Поэтому переход в ноосферу означает обязанность человека взять ответственность за дальнейшую эволюцию биосферы в целом, т.е. и за себя, действуя по принципу — «не навреди». В учении о ноосфере Вернадский впервые осознал и попытался осуществить синтез естественных и общественных наук в исследовании глобальной деятельности человечества. У него живое вещество преобразует верхнюю оболочку Земли, постепенно человек становится силой геологического масштаба. Поэтому и несет ответственность за эволюцию планеты. Сам он использовал это понятие в разных смыслах: а) как состояние планеты, когда человек становится преобразующей геологической силой; б) как область активного проявления научной мысли; в) как основной фактор перестройки и изменения всей биосферы.

Ноосферный этап (этап допустимого развития) состоит в том, что экономические и экологические проблемы взаимоотношений с биосферой определяются не выживанием человечества, а сохранением экосферы в гармонии живой и неживой материи, сохранением гармонии природы с сохранением ресурса животного и растительного миров, сосуществующих в биоценозах и экосистемах.

Отношения в системе «человек — природа» строились по-разному в разных культурных традициях. В классической западноевропейской: природа — пассивный материал для проявления творческих возможностей человека; в восточной — благоговейное почитание природы до полного растворения в ней человеческого начала; в российской сложилась самоценность природы, она — активный материал, соразмерный статусу человека и мироздания. Вернадский наметил для этого наступающего этапа серию мероприятий: решить проблему разумной плотности народонаселения и оптимальной численности жителей Земли; ликвидировать бедность; расширить границы биосферы; выйти в космос; открыть новые источники энергии; оценить допустимость и достаточность экономического развития в рамках сбалансированного самовосстановления биосферы; исключить войны из жизни общества; поднять культуру человека на всех уровнях организации общества.

Сходные предложения были разработаны биофизиком А.И. Чижевским — создателем *гелиобиологии*. Он установил связь между цикличностью процессов на Солнце и явлениями в биосфере (рис.52). Его концепция, основанная на богатом фактическом материале, доказывала существование космических ритмов и их связь с биологической и общественной жизнью. Чижевский ввел представление о компенсаторно-защитной функции биосферы, необходимой для существования живых организмов на Земле. О расселении человечества в будущем в космосе говорили представители течения *русский космизм*. Идеологи космизма — Н.Ф. Федоров, К.Э. Циолковский.

Концепция устойчивого развития основана на биотической регуляции среды. Мир в целом в своем техническом, экономическом и социально-политическом развитии приблизился к точке бифуркации — рубежу, за которым равновероятны выход на качественно новый (более высокий) уровень бытия системы и ее гибель. Поэтому переход на путь устойчивого развития предлагает не только установление необходимого баланса между потреблением и воспроизводством природных ресурсов при минимальном загрязнении среды, но и обеспечение устойчивого роста благосостояния, социальной защищенности и возможностей гармоничного развития каждого. Устойчивое развитие — это альтернатива неустойчивости мира, означающая развитие системы в режиме ее внутреннего динамического равновесия. В начале XXI в. слово «выживать» стало одним из самых употребляемых в национальном и международном лексиконе. И здесь велика роль ценностных установок общества и, значит, субъективного фактора истории — особая ответственность ложится на правящие политические структуры, принимающие решения и организующие изменения в массовом сознании. Они составляют духовную основу устойчивого развития. Как выразился У. Черчилль,

«Пессимист видит препятствия в каждой возможности, а оптимист — возможности в каждом препятствии».

Словосочетание «устойчивое развитие» появилось после конференции по окружающей среде и развитию, которая состоялась в Рио-де-Жанейро в июле 1992 г. Это экономически поступательное движение, или устойчивость темпов экономического роста, при котором уровень давления на окружающую среду компенсировался бы темпами восстановления ее свойств. Преодоление трудностей, стоящих перед современным человечеством, не может быть достигнуто ни средствами магического мышления, ни

23.3. ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА И ОБЩЕСТВЕННАЯ МЫСЛЬ

В Древней Греции науки о природе и обществе были тесно взаимосвязаны. Начало разделению духа и материи положило атомистическое учение. Эпоха Возрождения открыла экспериментальный путь исследования природы и математическую формулировку теорий, следствия из которых проверялись опытным путем. Отделение гуманитарного знания от естественно-научного относится к Новому времени. Исключив из описания мира Бога и человека, наука способствовала бурному росту промышленности. Но, как стало ясно в последнее время, научный рационализм имел для Человека и Природы и отрицательные последствия.

Естественно-научные достижения породили уверенность, что любыми процессами можно управлять так же, как предсказывать траекторию движения небесных тел. Поскольку физика шла по пути рассмотрения простых систем и простых моделей, которые старались применять к системам реальным и которые описывали наиболее существенные черты явлений вблизи положения равновесия, то этому следовали и другие науки. В механистический век Т.Гоббс описывал государство как машину, где шестернями служат граждане. «Невидимая сила» рынка А.Смита действовала как сила всемирного тяготения. Да и квантовая механика строилась по образу классической — уравнение Шредингера линейно, для волновой функции выполняется принцип суперпозиции. Это привело к неопределенности собственных значений, к невозможности единообразно описать процесс измерения. В копенгагенской трактовке квантовой механики пришлось говорить о расщеплении суперпозиции состояний (прибора и квантовой системы) или о коллапсе волнового пакета. Оказалось, что процесс измерения вдали от равновесия необратим, и линейное мышление работает лишь в ограниченных условиях.

Биосоциальные явления имеют сходство с физико-техническими, несомненна их волновая природа. Периодичность общественных событий связывают с цикличностью самой природы и человека, периодической повторяемостью его потребностей. А.Л.Чижевский, медик и историк по образованию, один из основателей *гелиобиологии*, писал: «Если бы мы попытались графически представить картину многообразия этой цикличности, то получили бы ряд синусоид, накладывающихся одна на другую или пересекающихся одна с другой... В этом бесконечном числе разной величины подъемов и спусков сказывается биение общемирового пульса, великая динамика природы, раз-

призывами «вернуться к гармонии с чистой природой». Тут требуется мышление рациональное, которое способно не только предвидеть катастрофы, но и в ряде случаев указать пути их недопущения. «Сложное переплетение вопросов экологии, экономики и политики можно распутать методами математического моделирования, — считают современные ученые Р.Г.Хлебопрос и А.И.Фет в книге «Природа и общество». Итак, единственная возможность выживания человечества при росте потребностей — это использование механизма природной среды как саморегулирующей системы. В этом смысл ноосферных преобразований.

личные части которой созвучно резонируют одна с другой». В экономике, например, известно несколько рынков со своей динамикой, которые подвержены различным циклам. Так, годичный цикл определяет сельскохозяйственный или туристический рынки, отсюда сезонные распродажи овощей, зерна, топлива, путевок. Экономические модели циклов деловой активности строились в 30-е годы (модели Хансена–Самуэльсона или Лундберга–Метцлера) и были линейными, а для объяснения нерегулярностей вводился внешний толчок. Аналогичные циклы были выделены Питиримом Сорокиным в истории открытий и изобретений, прослеженные им с XV века.

Сейчас понятно, что окружающий нас мир представляет из себя сложную систему, скорее иерархию взаимодействующих систем, когда каждая из этих подсистем должна рассматриваться как открытая; физическая картина мира изменилась. Новое мировоззрение основано на идее эволюции и единства мира, на понятиях вероятности и самоорганизации, на нелинейных взаимодействиях. Этот взгляд неминуемо должен проявиться и в гуманитарных знаниях, и не просто по внешней аналогии. Процессы описываются одними математическими уравнениями, на одном языке. Сформировалась *междисциплинарная методология* для объяснения процесса образования макроскопических явлений, возникающих вдали от равновесия в открытых системах при превышении некоторого порогового значения фактора внешнего воздействия из-за возникновения нелинейных взаимодействий на микроуровне. Макроскопическими явлениями могут быть различные виды световых или химических волн, жидкостей, растения, популяции, рынки, ансамбли атомов, молекул, клеток, организмов, животные... Они возникают из-за взаимодействия на микроуровне между разными силами, разными частицами. Процессы описываются одинаково, и хотя в каждой предметной области конкретные выводы могут отличаться, общая эволюционная тенденция остается.

Американский астрофизик член Римского клуба Э.Янч, например, считает, что флуктуационную теорию эволюции нужно развить до политической теории и что именно так поступил К.Маркс на основе естественно-научных знаний своего времени, когда описывались равновесные процессы, и каждая замкнутая система стремилась к состоянию равновесия. Поэтому равновесная и статичная картина мира прошлого века не могла не завершиться теорией бесклассового общества как конечной точки движения всей человеческой истории. С микроскопической точки зрения

общество состоит из индивидов со своими стремлениями, желаниями, убеждениями. Но развитие рынков, наций, культур не отражается простой суперпозицией своих частей. Тот же А.Смит подчеркивал, что намерения индивидов несущественны для рынка, баланс поддерживается «невидимой рукой», т.е. нелинейным взаимодействием потребителей и производителей. Поведение сложных систем в общественных науках должно быть описано нелинейными моделями. Стандартные экономические модели должны быть переформулированы в терминах нелинейностей, и введение нелинейностей привело к понятию странных аттракторов в экономике, когда небольшие отклонения в начальных условиях приводили к существенному изменению траектории (так называемый «эффект бабочки»).

Пока социальные волновые процессы только исследуются, но понятия, сложившиеся в теории колебаний, уже применяются для их анализа. Развитие общества представляют спиралевидным необратимым процессом с элементами повторяемости и цикличности, описываемым диалектическими законами «отрицания отрицания» и «единства и борьбы противоположностей». Социальный или экономический порядок интерпретируется с помощью представлений синергетики — с использованием аттракторов фазовых переходов. Социологические исследования включают теорию «управляемого общественного прогресса», основанную на общей «социологии конфликтов», анализ специфики социальных институтов культуры, политики и экономики, а также концепции самоорганизации и самоуправления общественных систем.

Новое мировоззрение, опирающееся на достижения современных естественных наук, связано с понятиями вероятностей, случайностей, выбора, информации и ее кодирования. Стремительное развитие и вторжение кибернетики и ЭВМ в нашу жизнь по своим последствиям гигантски превышают перемены в обществе после изобретения книгопечатания. Микро- и нанoeлектронные технологии, вызвавшие небывалый количественный рост и снижение стоимости вычислительной техники, сделали доступными массовому потребителю ЭВМ и компьютерные *информационные сети*. Динамику информационных технологий также можно моделировать. Общество переходит от традиционных производств, связанных с товаром, к индустрии знания, работающего на получение информации и экономии информационных средств. Отсюда задача совершенствования отношений между человеком и средствами информации. Изменения коснулись и средств передачи и переработки информации. В образовательных технологиях снижается роль личной беседы, лекции, общения с учителем. На смену им приходит дистанционное образование, использующее современные каналы связи и общемировые информационные ресурсы, например, система «Internet». Человечество переходит от индустриальной эпохи к *постиндустриальной*, или *информационной*. Это означает, что источники информации доступны любому человеку в любой части Земли. И наоборот — генерируемая людьми новая информация мгновенно становится достоянием всего человечества.

Полученный естествознанием вывод, что самоорганизация есть результат собственного, внутренне необходимого изменения системы, распространяют и на общественные процессы. Фактически это переход от стихийной эволюционно-биологической организации к социально-организованному уровню материальных структур. Благодаря дальнейшему развитию общественно-трудовой деятельности, зачатки которой Кропоткин отметил в особенностях группового поведения животных, человечество от животной формы перешло к социальным формам взаимодействия с окружающей природой. Исследование закономерностей прогрессивной эволюции можно построить, выделив три положения: 1) усложнение организации биотической среды (взаимодействие живого с живым) — решающий фактор эволюции; 2) внутренние процессы, определяющие направление развития, есть результат предыдущих этапов развития; 3) антропогенный фактор имеет доминирующее значение в процессе эволюции. Изучение естественной предыстории человечества на основе представлений о самоорганизации систем открывает возможности создания целостной теории эволюции.

Академик Н.Моисеев считал каждый ее этап бифуркационным, и само развитие может в любой момент пойти непредсказуемым путем. Но с развитием интеллекта человек приобрел способность гибкого реагирования на внешнюю информацию, предвидения событий и принятия соответствующих решений. При возникновении новых общественных отношений был отброшен первобытный стадный коллективизм. Росли дифференцированность особей и разнокачественность групп, и эти «морфологические» изменения стали важнейшими для обеспечения эволюционной эффективности форм интеграции. Больше шансов на оставление потомства имели как сильные особи, так и выделяющиеся по своим интеллектуальным и другим (личностным) особенностям индивиды, а также члены стада, выражавшие лучшие качества коллектива. В межстадных коммуникациях проявлялись свойства открытых систем, и межгрупповой отбор определял успех групп, которые были более передовыми в способах групповой организации: обеспечивали надежную природную основу для фиксации, накопления и передачи опыта в процессе социогенеза.

Высокая степень потенциальных возможностей человека и низкая степень их реализованности в случае неэффективной организации современного общества указывают на опасные тенденции развития. Оно может идти как в сторону саморазвития, так и в сторону самораспада. Когда в XVIII в. Мопертюи выдвинул свой экстремальный принцип для величины, названной в механике действием, Эйлер отметил, что реальные траектории из всех возможных выбираются не обязательно по идее минимума действия вдоль них, возможен и максимум. Главное, что первая производная — нулевая, т.е. удовлетворяет условию экстремума. И, развивая аналогичную естествознанию схему, можно сказать, что в живой природе реальным оказывается максимум экстремума действия, а в неживой — минимум. Если обратиться, например, к книге «Поиски вымышленного царства» Л.Н.Гумилева, то в ней название каждой главы как бы отражает определенный уровень организации

общества, *пассионарность* представляется физическим действием, а экстремальные ситуации в жизни общества сопровождаются состоянием крайнего дискомфорта. Перспектива движения к развитию или распаду определяется уровнем самоорганизации общества.

К числу критериев, определяющих высокий уровень самоорганизации, и следовательно, относительную устойчивость общественных систем относят «способность системы противостоять деструктивным тенденциям и воздействиям окружающей среды, поддерживать определенное соотношение равновесных и неравновесных процессов, уровень градиентов и т.д.». В отличие от такой общественной системы малоэффективная организация существует только благодаря временным субъективным факторам или внешним условиям. При этом нарастают ее внутренние противоречия, а вмешательство в естественно-исторический процесс происходит хаотически.

Развитие общества зависит от его самоорганизации, определяемой объективными и субъективными причинами. Среди *вторичных*, или субъективных, причин обычно выделяют содержание сознания, уровень образованности и меру интеллектуализации мышления, состояние духовного опыта и культуры. Процесс самоорганизации обеспечивается, как показывает исторический опыт человечества, самоуправлением при достаточной компетентности в осмыслении и оценке событий, определении путей и средств достижения цели. В этом случае происходит ориентация в сторону интересов развития общества, исключая возможность подтасовки и обмана, рассчитанных на некомпетентность и неосведомленность большинства людей.

Логика самоорганизации общественного процесса отражает единство институтов культуры, политики и экономики, становится ведущей идеей человеческого взаимопонимания и общественного развития. В *теории управления* необходимо хорошо знать свойства объекта, его реакции на управляющие воздействия и умело направлять их на достижение поставленной цели. Понимание и фор-

мальное определение цели — задача не менее сложная, чем само управление. Нахождение компромисса при многих противоречивых тенденциях в таких сложных системах, как «общество — окружающая среда» представляет собой один из примеров решения подобных задач. Существует раздел математики, посвященный анализу конфликтных ситуаций, где под *коопромиссом* понимается коллективное решение, не нарушающее интересы всех сторон (устойчивость систем). История показывает, что неспособность достичь компромисса вызывала войны и другие конфликты, отбрасывавшие человечество назад.

Всякий компромисс достигается определенной последовательностью шагов и действий. Например, для разрешения экологических проблем необходимо учесть все ограничения, нарушение которых означало бы нарушение гомеостатического состояния. Это позволило составить формальную систему запретов, или минимуму условий, необходимых для обеспечения гомеостаза.

Современные проблемы сочетания противоречивых интересов в управлении экономикой, а также теория и практика военного дела вызвали к жизни математический аппарат описания конфликтных ситуаций вообще, т.е. общую стратегию. В 1944 г. в США была опубликована книга математика и физика Джона фон Неймана и экономиста Оскара Моргенштерна «Теория игр и экономическое поведение», в которой рассматривались вопросы математического описания способов принятия решений, типичных для конкурентной экономики. Впоследствии *теория игр* превратилась в общую математическую теорию конфликтов, описывающую экономические, военные и правовые коллизии, столкновения, связанные с биологической борьбой за существование, различные игровые стратегии. В случае игр с противоположными интересами (антагонистическая игра) оптимальной считается стратегия, направленная на достижение максимального выигрыша. Конкуренция здесь является разновидностью конфликта. В центре внимания теории — оптимизированные правила поведения, ведущие к победе одной из сторон.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕСТОВОЙ СИСТЕМЫ

- Наука отличается от идеологии лишь тем, что:*
 - а) научные истины не зависят от интересов определенных слоев общества;
 - б) научные законы определяются требованиями преобразования природы на благо общества;
 - в) значимость научных результатов оценивается в морально-этическом аспекте;
 - г) новые результаты должны быть логически противоречивы предыдущим.
- Научная революция XVI–XVII вв. связана с:*
 - а) открытием электромагнитных волн Герцем;
 - б) отрицательным результатом опытов Майкельсона по определению скорости света;
 - в) теорией происхождения видов путем естественного отбора Ч.Дарвина;
 - г) гелиоцентрической концепцией Н.Коперника.
- Естествознание отличается от натурфилософии:*
 - а) более сложным объяснением явлений, которое проводится логикой рассуждений;
 - б) только более развитым и широким набором дисциплин;
 - в) только тем, что перестали рассматривать природу как целое;
 - г) проверкой теории путем экспериментирования.
- Инерциальные системы отсчета — это такие:*
 - а) в которых скорость свободного падения пропорциональна квадрату времени падения;
 - б) при движении которых выполняется первый закон Ньютона;
 - в) при движении которых не выполняется первый закон Ньютона;
 - г) движение которых можно обнаружить лишь точными измерительными приборами.
- Землю можно считать материальной точкой в задачах:*
 - а) расчета периода обращения Земли вокруг Солнца;
 - б) расчета линейной скорости движения точек поверхности при суточном вращении;
 - в) нельзя считать — в обоих случаях;
 - г) можно считать — в обоих случаях.
- В изолированных системах сохраняются следующие величины:*
 - а) энергия и энтропия;
 - б) импульс, момент импульса и энергия;
 - в) энтропия, заряд и энергия;
 - г) масса, импульс и заряд.
- Единица измерения физической величины, названная в честь автора «Математических начал натуральной философии», это:*
 - а) масса;
 - б) сила;
 - в) энергия;
 - г) намагниченность.
- Свет от Солнца доходит до Земли за:*
 - а) 20 секунд;
 - б) 8 минут и 19 секунд;
 - в) 5 минут и 12 секунд;
 - г) 1 минуту и 45 секунд.
- Какое из приведенных утверждений верно:*
 - а) только газы состоят из молекул;
 - б) только жидкости состоят из молекул;
 - в) только жидкости и газы состоят из молекул;
 - г) все твердые тела имеют кристаллическую решетку.
- Энтропия изолированной системы как функция состояния:*
 - а) всегда убывает со временем;
 - б) сохраняется при условии сохранения энергии системы;
 - в) может только возрастать;
 - г) не бывает.
- Возраст нашей планеты оценивается в:*
 - а) 2,5 млрд лет;
 - б) 14,2 млрд лет;
 - в) 250 млн лет;
 - г) 4,6 млрд лет.
- Возраст нашей звездной системы — Галактики — составляет примерно:*
 - а) 5–8 млрд лет;
 - б) 13–15 млрд лет;
 - в) 1–4 млрд лет;
 - г) 30–35 млрд лет.
- Электромагнитные взаимодействия в сравнении с другими фундаментальными взаимодействиями наиболее существенны:*
 - а) только в пределах размеров атомного ядра, т.е. короткодействующие;
 - б) в областях Вселенной, сравнимых с размерами «от молекул до паровоза»;
 - в) для процессов взаимного превращения элементарных частиц;
 - г) при формировании структуры галактик.
- Закон сохранения и превращения энергии:*
 - а) применим только в области механических и тепловых явлений;
 - б) является всеобщим законом природы;
 - в) ограничивает возможности увеличения коэффициента полезного действия тепловых машин;
 - г) связан с законом всемирного тяготения.
- Корпускулярно-волновые свойства материи:*
 - а) отражены в обнаруженном явлении дифракции электронов;
 - б) вытекают из принципа соответствия, требующего совпадения физических следствий законов квантовой и классической механики в предельных значениях параметров;
 - в) следуют из периодического закона, установленного Д.И.Менделеевым;
 - г) не проявляются в движении макроскопических тел.
- Первым этапом в развитии химии было создание:*
 - а) структурной химии;
 - б) эволюционной химии;
 - в) учения о химических процессах;
 - г) учения о составе веществ.

17. Энергия химической связи определяется:
- энергией взаимодействия нуклонов в ядрах атомов, входящих в молекулу;
 - собственной энергией покоя элементарных частиц;
 - энергией взаимодействия кварков в адронах (протонах и нейтронах);
 - энергией электронных оболочек атомов и ионов.
18. В процессе фотосинтеза растения используют энергию:
- тепловую;
 - химических связей;
 - солнечную;
 - биологическую.
19. Колебания почвы при землетрясениях регистрируются с помощью:
- томографии;
 - сейсмографии;
 - акустики;
 - гравиметрии.
20. Источниками энергии Солнца являются:
- цепные реакции деления урана;
 - тепловая энергия и удары метеоритов;
 - термоядерные реакции протонно-протонного цикла;
 - потенциальная энергия сжатия.
21. Явление расширения Вселенной объясняют проявлением:
- особенностей наблюдений с движущейся вокруг Солнца и вращающейся вокруг своей оси Земли;
 - эффекта Доплера, состоящего в зависимости частоты испускаемого света от скорости взаимного движения наблюдателя и источника, — смещении спектральных линий в красную сторону спектра при удалении;
 - взаимодействия галактик различных форм в межгалактических магнитных полях;
 - закона сохранения импульса в ограниченной и замкнутой стационарной Вселенной.
22. Можно ли сказать, что основным вопросом биологии является вопрос:
- «в чем основное отличие живой материи от неживой и как произошел скачок между ними при зарождении жизни?»;
 - «как выйти из экологического кризиса?»;
 - «как обеспечить человечеству достаточное питание при ограниченных возможностях нашей планеты?»;
 - «как избавить человечество от болезней?».
23. Обмен веществ в живых клетках называют:
- брожением;
 - мутацией;
 - метаболизмом;
 - репродукцией.
24. Молекулярное строение ДНК было установлено:
- Дж.Билдом и Дж.Ледербергом;
 - Менделем;
 - А.И.Опариным;
 - Ф.Криком и Дж.Уотсоном.
25. Основной функцией генов — единиц наследственной информации — является:
- организация запаса химической энергии в клетках;
 - регуляция гормонов;
 - кодирование синтеза белка;
 - организация транспорта ионов.
26. Популяция как элементарная единица эволюции жизни на Земле — это:
- совокупность особей одного вида, обладающих единым генофондом и занимающих определенную территорию;
 - совокупность особей разных видов, занимающих одну территорию;
 - совокупность особей одного вида, обладающих единым генофондом;
 - совокупность особей, существование которых определяется в зависимости от небиологических факторов среды.
27. Последнее оледенение на Земле было около:
- 100 млн лет назад;
 - 56 млн лет назад;
 - 18 тыс. лет назад;
 - 7 тыс. лет назад.
28. Стена времен года на Земле связана с:
- изменением расстояния от Солнца в течение года;
 - наклоном оси суточного вращения Земли к эклиптике;
 - периодическими изменениями солнечной активности;
 - периодическим влиянием притяжения Луны и Солнца.
29. Согласно принципу Реди:
- все живое произошло путем творения волей Творца;
 - невозможно достичь скорости, большей скорости света в вакууме;
 - взаимодействие тел осуществляется посредством полей;
 - все живое произошло от живого.
30. Бит — величина, характеризующая:
- ценность информации;
 - плотность информации;
 - время жизни информации;
 - количество информации.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Номер варианта определяется по последней цифре номера зачетной книжки. Работы должны быть выполнены до сессии, когда предстоит сдавать зачет или экзамен по всему курсу.

Каждая из работ содержит 10 вопросов по разным темам курса. Контрольные работы выполняются в письменном виде. Ответ на каждый из 10 вопросов должен быть ясным, подробным, развернутым и занимать 2–3 страницы тетрадного листа. В каждом из заданий, помимо реферативной работы, введены по два задания, в которых необходимо сделать соответствующую оценку или расчет.

Для правильного ответа на вопрос достаточно изучения содержания основного учебника или данного УМК. Если Вы используете в каком-то ответе иную литературу, то укажите ее при ответе на этот вопрос. Кроме того, может оказаться удобным воспользоваться указаниями, содержащимися в разделе «Содержание дисциплины», где к различным темам приведены определенные номера страниц ряда рекомендуемых учебных пособий и учебников.

КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ (ДЕСЯТЬ ВАРИАНТОВ)

Вариант №1

1. Дайте общую характеристику состава Солнечной системы. Назовите видимые простым глазом планеты. Что такое «астрономическая единица» длины, и чему она равна? Каковы орбиты планет? Могут ли планеты столкнуться при своем движении вокруг Солнца? Оцените, на каком среднем расстоянии от Солнца находится Меркурий, если его период обращения равен 0,24 земного года?

2. Основные законы классической механики материальной точки. Как моделируется система, состоящая из двух и более материальных точек? Приведите примеры задач, в которых можно считать Землю материальной точкой, а в каких – нельзя.

3. Что такое «ядерная энергия» и «ядерная реакция деления»? Как связываются нуклоны в ядре атома? Как определяется энергия их связи, и от чего она зависит? Какие перспективы и проблемы энергетики связаны с реакциями деления ядер?

4. Поясните эволюцию понятий «атом», «молекула», «химический элемент» и «химическое соединение». Поясните понятие химических связей и приведите примеры. Какова роль энергии и энтропии при образовании молекул? Какие химические связи являются определяющими в конденсированных средах?

5. Опишите модель идеального газа и приведите его уравнение состояния. Какая величина является мерой средней кинетической энергии молекул?

6. Поясните суть гипотезы Луи де Бройля. Как она была экспериментально подтверждена, какое значение для естествознания имеет использование корпускулярно-волновых свойств вещества? Что узнали о живой материи с помощью электронного микроскопа? Оценить длину волны электрона с энергией 20 эВ.

7. Процесс фотосинтеза и его значение в истории Земли. Сравните клеточное дыхание и фотосинтез. Как менялась атмосфера Земли в ходе ее эволюции?

8. Раскройте понятие «биосфера», укажите ее функции и характеризуйте ее оболочки. Как это понятие было переосмыслено В.И.Вернадским? Когда у Земли появилась биосфера? Опишите человека как качественно новую ступень развития биосферы.

9. Поясните, что такое Вселенная, каковы ее размеры, какие объекты ее составляют и какие модели развития Вселенной известны.

10. Как формировалось представление о критерии истинности знания? Чем отличается метод Галилея от метода Аристотеля? Чем отличается естественнонаучный подход от философского?

Вариант №2

1. Закон сохранения импульса в классической механике и связь его с законом динамики Ньютона. Пример использования этого закона сохранения. Как он связан со свойствами пространства-времени, и почему этот закон фундаментален?

2. Суть законов Кеплера и их связь с законом всемирного тяготения. Насколько применима модель, принятая Ньютоном? Определите массу Солнца, если известно, что Земля движется вокруг него со скоростью 30 км/с на среднем расстоянии 150 млн км.

3. Роль измерений в получении законов естествознания. Понятие о метрической системе. Где на Земле можно наиболее приблизиться к центру Земли? Как измерили размеры Земли, Луны, Солнца? Каков диапазон расстояний во Вселенной?

4. Какова специфика микромира по сравнению с изучением мега- и макромира. Поясните принципы соответствия и дополнительности.

5. Что изучает термодинамика? Что такое «термодинамическая система», «равновесное состояние»? Определите понятия «теплоемкость» и «удельная теплоемкость». Как по ним можно судить о внутренней структуре вещества?

6. Опишите, как развивались представления о свете, в каких явлениях проявляются его волновые свойства? Какое явление показывает, что свет – поперечная волна? Как и кем было показано, что свет есть электромагнитная волна? Если при отражении от горизонтальной стеклянной пластинки солнечным луч оказался плоскополяризованным, то какова была высота Солнца над горизонтом?

7. Развитие идей эволюции видов. Докажите, что естественный отбор является направляющим фактором эволюции. Сопоставьте понятия «популяция» и «вид».

8. Каковы особенности строения и функции ядра клетки и цитоплазмы? Опишите функции клеточных мембран. Что такое «ионный насос»?

9. Поясните понятие «солнечная активность». Какие процессы на Солнце связаны с явлениями на Земле? Как распределяется на Земле солнечная энергия? Насколько

можно считать Землю тепловой машиной? Дайте понятие о негэнтропии солнечного излучения.

10. Дайте понятие «научной картины мира» и приведите примеры.

Вариант №3

1. Что такое астероиды, где они расположены, каковы их орбиты и размеры? Назовите наиболее крупные из них. Период обращения Плутона равен 250 земных лет, так каково его расстояние от Солнца и какую часть своего «года» он прошел после того, как его открыли?

2. Поясните понятия «момент силы» и «момент импульса». В каких системах сохраняется момент импульса, почему этот закон тоже относят к разряду «великих законов сохранения»? Дайте примеры его использования.

3. Что такое радиоактивность (естественная и искусственная)? Как использование явлений радиоактивности позволило осуществить мечту алхимиков?

4. Определите радиус Луны, если известно, что видимый угловой диаметр Луны 30 угловых минут, расстояние до Луны 384 тыс. км. Как определяют расстояния до звезд? Что такое «параллакс» и «звездная величина»? Как оценили размер Галактики, Вселенной?

5. Поясните принцип неопределенности, понятия детерминизма и индетерминизма. Как изменились представления о случайном и закономерном? Поясните роль измерения и прибора в квантовой механике.

6. Что такое «начала термодинамики», идеальный и реальный цикл, коэффициент полезного действия тепловых машин? В чем состоит суть начал термодинамики и спора о «тепловой смерти Вселенной»?

7. Дайте представление о научной методологии и формировании критерия истины в разное время. Какие методы используют в естествознании и насколько они дают объективные результаты?

8. Как возникают структуры из хаоса в неорганической и живой материях? Каковы условия их образования, приведите примеры из разных областей естествознания. Что такое синергетика и каково ее значение для современной картины мира?

9. Опишите гипотезы происхождения планет Солнечной системы. Чем доказывается единовременное происхождение тел Солнечной системы? Поясните проблемы происхождения и эволюции Земли. Каково строение геосфер? В чем суть гипотез тектоники литосферных плит, дрейфа континентов?

10. В чем смысл концепции ноосферы, и каков ее научный статус? Опишите, в чем состоит глобальный экологический кризис, каковы его причины и перспективы преодоления.

Вариант №4

1. Дайте общую характеристику кометам. Назовите наиболее известные из них. Период обращения Сатурна вокруг Солнца равен 29,46 земного года, а Марса – 1,88 земного года. На каком расстоянии от Солнца находится Сатурн, если Марс удален в среднем на 228 млн км?

2. Какова причина существования лунных фаз и затмений? Расстояния до Луны меняются из-за отличия ее орбиты

от окружности в значительных пределах: в апогее – 405 тыс. км, а в перигее – 363 тыс. км. Какова большая полуось лунной орбиты? Почему нам видна лишь одна сторона Луны? Была ли составлена карта обоих полушарий Луны, кто и как это смог сделать?

3. Дайте представление об описании колебаний, модели гармонического осциллятора и использовании этой модели. Что такое «когерентность», «резонанс», «поляризация»?

4. Каковы модели развития Вселенной? Какие наблюдения подтвердили модель Большого Взрыва? Какие эмпирические подтверждения расширения Вселенной? Что означает «стационарность» и «нестационарность» Вселенной, какова природа реликтового излучения?

5. Модели идеального и реального газа. Какими параметрами описывается состояние газа? Определите температуру идеального газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул равна $7,87 \times 10^{21}$ Дж.

6. Поясните понятия энтропии и термодинамической вероятности. В чем состоит принцип Больцмана, каково значение этого принципа в современном естествознании?

7. Каковы структурные уровни организации материи, чем они характеризуются? Что такое «системный подход» и каковы его основные понятия в современной естественнонаучной картине мира?

8. Как строится термодинамика открытых систем? Поясните понятие диссипативной структуры, по И. Пригожину. Какие этапы можно выделить в развитии самоорганизующихся систем? Чем отличается современная научная картина мира от классической?

9. Что такое «мутация» и какие мутации бывают? Как определить, что приобретенные признаки не наследуются? Какие виды изменчивости известны, в чем их сходства и отличия? Объясните, какая форма изменчивости дает исходный материал для естественного отбора в природе.

10. Поясните особую роль математики и моделирования в естествознании. Что дали человечеству решения на ЭВМ глобальных программ мира?

Вариант №5

1. Закон всемирного тяготения и доказательства его справедливости на Земле. Объясните явление приливов. Оцените изменение своего веса при переезде с экватора на полюс.

2. Понятие о микро-, мега и макромире. Как измеряются расстояния в микромире? Как измеряется время на интервалах, меньших 1с? Какими приборами?

3. Дайте понятие об обратимых и необратимых процессах. Приведите примеры. Определите понятия «динамический хаос», «бифуркации», «диссипативные структуры в окрестности точки бифуркации».

4. Поясните, как изменились представления о пространстве и времени с созданием теории относительности. Какими фактами и явлениями эти представления подтверждены?

5. В каких единицах измеряются энергия, работа и мощность? Как эти величины связаны между собой и что они характеризуют? Сколько времени нужно выполнять

физические упражнения мощностью в 700 Вт, чтобы сбросить свой вес за счет уменьшения жира на 450 г (на расщепление 1 г жира расходуется около 40 кДж, а к.п.д. – 25%)?

6. Какая часть термодинамической системы называется фазой данного вещества? Дайте молекулярную картину процессов испарения и конденсации. Что такое насыщенный пар, и каковы его свойства? Опишите роль этих процессов в земной атмосфере.

7. Основной закон радиоактивного распада и его статистический смысл. Как определяется возраст археологической находки, нашей планеты?

8. Раскройте сущность микро- и макроэволюции, приведите примеры действующих в них процессов. Каковы доказательства эволюции органического мира?

9. Как происходит обмен веществ и энергией в живой клетке? Чем он отличается от обменных процессов в неживой природе?

10. Что понимается под понятием «закон природы»? Чем отличается закон природы от закона, установленного государством?

Вариант №6

1. Приведите доказательства справедливости закона тяготения Ньютона в Солнечной системе. Найдите ускорение свободного падения на Луне и оцените свой вес на Луне, зная, что ее масса в 81 раз меньше, чем у Земли.

2. Поясните, что такое «галактика», каковы их формы и строение. Как называется наша галактика? Где находится Солнечная система в ней? В каких движениях участвует Земля?

3. В чем сущность второго начала термодинамики? Приведите значения к.п.д. для тепловых станций. Если пар поступает на турбину при температуре +177°С, а окружающий воздух имеет температуру +15°С, определите максимально возможный к.п.д. этой паровой турбины.

4. Развитие представлений о строении атомов. Кто и как открыл электрон? В какой степени атом похож на солнечную систему? Дайте понятие об энергетических уровнях и переходах. Как получается спектр излучения атомов? Как установили материальное единство мира?

5. Характеризуйте распространенность химических элементов на Земле и в ее биосфере. В чем принципиальное единство химического состава живых организмов и неживой природы?

6. Понятие равновесия в механике и статистической термодинамике. Как ведут себя макросистемы вдали от равновесия? Поясните принцип локального равновесия.

7. Дайте общую характеристику жидкого состояния. Определите картину процессов при явлениях капиллярности, смачивании, вязкости, поверхностном натяжении. Как объясняют большую теплоемкость воды, большое поверхностное натяжение и свойство капиллярности? Какое значение имеют эти особенности воды в живой природе?

8. В чем смысл гипотезы Планка о дискретном характере испускания света и ее значение? Насколько были решены при этом противоречия в теории теплового излучения?

9. Охарактеризуйте реакции синтеза ядер и условия их осуществления. Где такие условия имеют место в природе? Каковы перспективы использования реакций синтеза ядер в энергетике?

10. Охарактеризуйте биотический круговорот и оцените биосферную роль хозяйственной деятельности человека.

Вариант №7

1. Поясните понятие «энергия». Какие виды энергии Вы знаете? В каких системах она сохраняется и как закон сохранения энергии связан со свойствами пространства-времени?

2. Какие движения легли в основу календаря, какие календари используются? Определите по данным о Луне и законам Кеплера высоту стационарного спутника (висящего над одной территорией).

3. Как определили возрасты Солнца, звезд, Вселенной? Каков диапазон временных интервалов во Вселенной? Как восстанавливают эволюцию звезд?

4. Какими корпускулярными свойствами обладают свет? Поясните смысл понятия «фотон». Какие явления, и каким образом были объяснены с помощью квантовой теории света? Если фотон рассеялся на неподвижном электроны на угол 90°, то чему равно изменение длины волны фотона? Почему свет проявляет свойства и волны, и частицы?

5. Как развивалось учение о химических процессах? Как можно ускорить или замедлить ход реакции и каково промышленное значение этого? Дайте представление о химической кинетике. Как можно сместить химическое равновесие и направление реакции?

6. Поясните особенности представления о причинности в квантовой механике. Почему ограничение воздействия на микроуровне имеет смысл фундаментального закона природы?

7. Какие процессы поддерживают «жизнь» звезд? Дайте представление об эволюции звезд. Почему существенна величина массы звезды? Какова перспектива эволюции Солнца?

8. Дайте представление о фазовых переходах, приведите примеры фазовых переходов разных типов (родов). Что за явления – сверхтекучесть и сверхпроводимость?

8. Дайте понятие о неodarвинизме и синтетической теории эволюции.

9. Что изучает генетика, как она развивалась? Что такое «ген», «кодон», «нуклеотиды», «нуклеиновые кислоты»?

10. Опишите предмет и цели естествознания. Какие этапы прошла естественнонаучная картина мира в своем развитии? Как влияют на развитие науки внешние и внутренние факторы? Оцените роль науки и техники в современном мире и в формировании политических взглядов.

Вариант №8

1. Определите понятия теплоты и температуры. Как связаны эти величины, в каких единицах измеряются? Какие приняты шкалы температур? Как определяют температуру смеси? Какова концентрация молекул в стратосфере на высоте 30 км, если давление на этой высоте 10^4 Па, а температура -20°C ? Каков смысл абсолютного нуля температур?

2. Поясните понятие «инерциальная система отсчета». Приведите примеры. Каковы основные законы движения в таких системах? Чем отличается принцип относительности Галилея от принципа относительности Эйнштейна? Как осуществляется преемственность идей и концепций?

3. В чем состоит эффект Доплера и какова его роль в исследовании звезд, Вселенной. Как установили и измерили скорость вращения Солнца вокруг своей оси?

4. Каковы источники энергии звезд? Дайте представление об эволюции обычных звезд и красных гигантов и поясните процессы, происходящие в их недрах. Какова перспектива эволюции Солнца? Оцените роль фундаментальных констант и взаимодействий в ходе эволюции. В чем суть антропного принципа?

5. Какие единицы измерения расстояний приняты в мегамире? Что означает тот факт, что до ближайшей звезды Центавра расстояние 4,35 св. г.? Принимая поперечник Солнечной системы в 12 млрд. км, оцените, какую долю он составляет от расстояния до ближайшей звезды.

6. Кто и когда построил модель структуры ДНК? Какие разновидности РНК, в чем значение каждой из них? Как происходит деление клеток, ядра и ДНК? Как реализуется система воспроизводства на молекулярном уровне?

7. Поясните процессы в расплавах и растворах. Почему при растворении обычно температура понижается? Каковы особенности растворения в воде? Какую роль играют гидрофильные и гидрофобные процессы в живых организмах?

8. Какие типы связей имеют место в кристаллах? Когда возникает металлическая связь? Дайте представление о теории металлов, полупроводниках, диэлектриках и изоляторах.

9. Поясните понятие «научной революции» и «научно-технической революции». Приведите примеры. Каковы основные достижения и проблемы НТР?

10. Дайте определение «экосистеме» и «трофическому уровню». Поясните, как происходит передача энергии вверх по трофическим уровням экосистем.

Вариант №9

1. Полевая форма материи. Фундаментальные типы взаимодействий в физике. Почему они так называются и в каких диапазонах времени и пространства проявляются наиболее сильно?

2. Характеризуйте дискретность и непрерывность материи. Определите длину волны электромагнитного излучения, энергия кванта которого равна энергии покоя электрона. Масса покоя электрона равна $9,1 \times 10^{-31}$ кг.

3. Опишите спектр электромагнитного излучения. Как были открыты инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи?

4. Какие частицы составляют ядро атома, каковы его размеры? Как это было установлено?

5. Опишите модификации углерода. Почему столь многообразны соединения углерода? Какие особенности строения атома углерода определили его роль в живой природе?

6. Дайте понятие внутренней энергии. Какие виды внутренней энергии вы знаете? Как измеряется внутренняя энергия? В чем сущность первого начала термодинамики? На сколько градусов повысится температура воды при падении с плотины Саяно-Шушенской ГЭС (высота 222 м), если считать, что 30% потенциальной энергии воды расходуется на нагревание?

7. Что такое фазовое равновесие, перегретая жидкость, процессы сублимации и десублимации? Опишите физическую картину процесса кипения. Как зависит точка кипения от внешнего давления? Приведите примеры проявления этих процессов в природе.

8. Охарактеризуйте строение и биологическое значение АТФ, почему АТФ называют основным источником энергии в клетке?

9. Основные выводы учения Вернадского о биосфере. Охарактеризуйте понятия «экосистема», «биогеоценоз», «экологическая ниша», «биоценоз». Чем определяется их устойчивость, какие связи существуют между организмами в экосистеме, и как они моделируются?

10. Каковы отличия науки от других областей культуры? Как соотносится наука с обыденным знанием, с религией?

Вариант №10

1. Охарактеризуйте проблему поиска «первичных объектов» и концепцию атомизма. В чем единство дискретности и непрерывности? Поясните понятие элементарной частицы. Как классифицируются элементарные частицы, и как они исследуются? Что такое «античастицы»? В чем состоит гипотеза кварков?

2. Как изменяются кинетическая, полная и потенциальная энергии планеты при ее движении вокруг Солнца? В какое время года линейная скорость движения Земли по орбите наибольшая и почему?

3. Перечислите волновые свойства света. Эффект Доплера для световых волн. Если в опытах на Земле частота излучения водорода составляет $4,6 \times 10^{14}$ Гц, а в спектре далекой галактики она уменьшилась на $1,9 \times 10^{14}$ Гц, определите, приближается ли к нам эта галактика или удаляется.

4. Характеризуйте концепции близкого действия и дальнего действия. Кто и как создавал теорию электромагнитного поля? Почему в народном хозяйстве используют не постоянный, а переменный ток? Сравните гравитационное и электромагнитное поля.

5. Как описывается состояние микрочастицы в квантовой физике? Как при этом осуществляется синтез волновых и корпускулярных свойств? Каково отличие в описании состояния в классической и квантовой механике?

6. Чем отличается живое от неживого? Оцените значение открытий Пастера. В чем сходства и различия растений и животных? Каковы методы генной инженерии

и чем отличаются ее возможности от возможностей классической селекции?

7. Поясните явление катализа и его использование. Поясните роль каталитических реакций в жизнедеятельности организмов, роль аналогии между катализаторами и ферментами.

8. Докажите, что популяция является единицей эволюции. Почему разные популяции одного вида отличаются по частоте генов? Поясните, как происходит эволюция видов с точки зрения генетики. Какова роль мутаций и

окружающей среды в эволюции живого? Продолжается ли в настоящее время эволюция человека как вида?

9. Дайте понятия о простых, сложных, устойчивых, неустойчивых, изолированных и открытых системах, об обратимых и необратимых процессах.

10. Опишите основные этапы развития биосферы. Как представляет наука начало жизни на Земле? Чем отличается земная атмосфера от атмосфер других планет и почему? Почему жизнь пока обнаружена только на нашей планете?

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Атом (греч. *atomos* — неделимый) — мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства; в центре атома — заряженное ядро, в котором содержится почти вся масса атома; вокруг движутся электроны, образующие электронные оболочки, размеры которых 10^{-8} определяют размер атома (гл.2, 11).

Абиогенез — теории образования органических соединений, распространенных в живой природе, вне организма без участия ферментов, исходная гипотеза современной теории происхождения жизни. Осуществлен на опытах Миллера, имитирующих условия на первобытной Земле (гл.20).

Абсолютно черное тело — фундаментальная модель теории излучения — тело, полностью поглощающее падающее на него излучение, интенсивность излучения единицы его поверхности является универсальной функцией только частоты света и температуры тела (гл.10).

Автокаталитические реакции — реакции, в которых один из продуктов служит катализатором превращения исходных веществ. По мере накопления продукта — катализатора скорость реакции нарастает до максимума и вновь уменьшается по мере расходования исходного вещества (гл.21).

Автоколебания — незатухающие колебания в открытой нелинейной системе вдали от равновесия, поддерживаемые энергией внешнего источника, причем параметры колебаний определяются свойствами самой системы и не зависят от начальных условий. Термин ввел А.А.Андронов в 1928 г. (гл.21).

Автолиз (греч. *lysis* — разложение) — саморастворение тканей и клеток под действием собственных гидролитических ферментов (омертвление) (гл.18).

Автотрофы (греч. *trophe* — пища) — живые организмы, осуществляющие питание неорганическими веществами посредством энергии фотосинтеза или хемосинтеза (зеленые растения, некоторые микроорганизмы). Автотрофный — питающийся неорганическими веществами (гл.22).

Агрегатные состояния (лат. *aggrego* — присоединяют) — состояние (газообразное, твердое, жидкое или плазменное) вещества определяются различиями в тепловом движении составляющих его частиц и их взаимодействиями. Переходы между ними происходят при скачкообразном изменении каких-либо свойств (гл.9).

Адаптация (лат. *adaptatio* — приспособление) — приспособление функций и строения организмов к условиям существования. Совокупность особенностей биологического вида, обеспечивающая возможность специфического образа жизни особей в определенных внешних условиях (гл.19).

Адгезия (лат. *adhaesio* — прилипание) — сцепление поверхностей разнородных тел, которая обеспечивает такие процессы как сварка, склеивание, нанесение лакокрасочных и гальванических покрытий, образование оксидных пленок и пр. (гл.9).

Адроны (греч. *adros* — сильный) — общее название элементарных частиц, подверженных сильному взаимодействию (барионы, мезоны, включая и все резонансы) (гл.6).

Адсорбция (лат. *ad-* — на + *sorbeo* — поглощаю) — поглощение вещества поверхностным слоем (адсорбента) (гл.9).

Аккреция (лат. *accretio* — приращение) — гравитационный захват вещества и последующее падение его на космическое тело с выделением энергии. Обратный процесс — истечение или выброс вещества (гл.14).

Аксиология — теория ценностей (гл.1).

Аксон (греч. *axon* — ось) — отросток нервной клетки (нейрона), проводящий нервные импульсы от клетки к другим нервным клеткам или органам. Пучки аксонов образуют нервы (гл.18).

Активная среда — вещество с неравновесным распределением по энергетическим состояниям, когда хотя бы для двух уровней существует инверсия населенностей (гл.21).

Аллели (греч. *allelon* — взаимно) — различные формы одного и того же гена в одинаковых участках разных хромосом, что определяет варианты развития одного и того же признака (в нормальной диплоидной клетке не более двух аллелей) (гл.19).

Аллопатическое видообразование (греч. *allos* — другой + *patris* — родина) — способ видообразования в процессе эволюции, когда новые организмы происходят от родственных групп с изолированными ареалами (дарвиновские вьюрки) (гл.20).

Альbedo (лат. *albedo* — белизна) — характеристика способности поверхности отражать падающий на нее поток излучения или частиц, равная отношению отраженного потока к падающему и зависящая от длины волны, что дает важную информацию о характеристиках поверхностей тел солнечной системы (гл.22).

Альфа-распад — вид радиоактивного распада атомных ядер, когда испускаются альфа-частицы (ядра атома He, т.е. заряд ядра уменьшается на 2, а массовое число — на 4) (гл.6).

Аминокислоты — класс органических соединений, обладающих свойствами как кислот, так и оснований. Около 20 аминокислот служат мономерными звеньями, из которых построены все растительные и животные белки, причем порядок построения задается генетическим кодом (гл.19).

Аморфное состояние — состояние вещества, характеризующееся изотропией свойств, которые обусловлены неупорядоченным расположением атомов и молекул. В таком состоянии находятся стекла, пластмассы, смолы (гл.12).

Амплитуда — наибольшее отклонение периодически изменяющейся величины от нулевого значения (или от положения равновесия) (гл.5).

Анализ (греч. *analysis* — разложение, расчленение) — метод исследования, состоящий в мысленном или фактическом разделении целого на составные части (гл.1).

Анафаза — стадия деления клетки, характеризующаяся расхождением хромосом к полюсам клетки, следует за метафазой, т.е. третья фаза деления (гл.18).

Анаэробные организмы — организмы, живущие при отсутствии свободного кислорода (многие бактерии, дрожжи, некоторые черви, моллюски) (гл.17).

Аннигиляция (лат. *annihilatio* — превращение в ничто, уничтожение) — превращение элементарной частицы и античастицы при их столкновении в другие частицы, например, электрона и позитрона в фотоны. Предсказана П.Дираком, впервые обнаружена в 1933 г. в космических лучах (гл.6, 11).

Антибиотики — вещества биологического происхождения, подавляющие рост бактерий, вирусов, клеток (гл.19).

Антивещество — материя, образованная античастицами. На ускорителях получены ядра антидейтерия и антигелия. Пока скоплений антивещества во Вселенной не обнаружено (гл.6).

Антициклон — область высокого атмосферного давления, характеризующаяся устойчивой погодой с малой облачностью и слабыми ветрами (гл.22).

Античастица — элементарная частица, масса и спин которой точно равны массе и спину данной частицы, а электрический заряд, магнитный момент и другие соответствующие характеристики равны по величине, но противоположны по знаку. Например, позитрон является античастицей электрона, антипротон — протона, антинейтрон — нейтрона (гл.6).

Антропоген (четвертичный период) — период кайнозойской эры, начавшийся 2,3–3 млн лет назад и продолжающийся поныне. Подразделяется на плейстоцен (3 млн – 20 тыс. лет) и голоцен. Характеризуется оледенениями и становлением человека.

Антропогенез — процесс историко-эволюционного формирования физического типа человека, его речи, развития общества (гл.23).

Антропогенетика — генетика человека (гл.23).

Ареал (лат. *area* — площадь, пространство) — область распространения видов растений и животных на земной поверхности (гл.22).

Ароморфоз (греч. *airo* — поднимаю + *morphosis* — форма) — направленная прогрессивная форма эволюции, при которой происходят усложнения организации и функционирования видов, способствующие улучшению их приспособления к условиям среды (гл.20).

Архей (греч. *archaios* — древний) — крупнейшая геологическая эра докембрия (с ~5 млрд лет назад до зарождения жизни 2,6 млрд лет назад).

Астеносфера — слой пониженной твердости, вязкости в верхней мантии Земли, подстилающий литосферу (верхняя граница — на глубине около 100 км под материками и 50 км под океаном; нижняя — на 350 км), важная для происхождения многих эндогенных процессов в земной коре и землетрясений (гл.16).

Астрономическая единица — среднее расстояние от Земли до Солнца, принимаемое за 149,6 млн км (гл.3, 16).

Атомный номер — номер химического элемента в таблице Менделеева (гл.6).

Аттрактор — относительно устойчивое состояние системы, которое как бы притягивает к себе множество траекторий развития, возможных после точки бифуркаций (гл.21).

Афелий — точка орбиты планеты, кометы или летательного аппарата, наиболее удаленная от Солнца (противоположная — перигелий) (гл.16).

Аэробные организмы — большинство живых организмов, которые могут существовать только при наличии свободного молекулярного кислорода. Ср. Анаэробные организмы (гл.19).

Бактерии (греч. *bakterion* — палочка) — группа микроскопических, в основном, одноклеточных организмов, относящаяся к «доядерным» формам — прокариотам. Считают, что это первые организмы, появившиеся на Земле. Участвуют в круговороте веществ в природе, в образовании и разрушении полезных ископаемых; формируют структуру и плодородия почв; поддерживают запасы углекислого газа в атмосфере (гл.22).

Барионы (греч. *barys* — тяжелый) — элементарные частицы с полуцелым спином (т.е. подчиняются статистике Ферми–Дирака) и массой, которая не меньше массы протона (нуклоны, гипероны и многие резонансы). Все барионы, кроме легкого протона, нестабильны, и в свободном состоянии распадаются на протоны (гл.6).

Барстеры — вспыхивающие галактические рентгеновские источники с интервалом повторения вспышек от нескольких минут до нескольких часов. Открыты в 1975 г. (гл.14).

Белая дыра — гипотетический космический объект, эволюция которого — обращенный во времени гравитационный коллапс тела с образованием черной дыры (гл.14).

Белки — органические вещества, имеющие сложные молекулы, состоящие в основном из углерода, водорода, кислорода и азота и построенные из остатков 20 аминокислот, соединенных пептидными связями в длинные цепи. Они играют важнейшую роль во всех живых организмах, участвуя в построении клеток и тканей, являясь ферментами, гормонами, защитными веществами и т.д. (гл.19).

Белые карлики — компактные звезды с массами порядка солнечной и радиусом в 100 раз меньшим и низкой светимостью (порядка 0,0001 солнечной), которых почти 10% в Галактике (гл.14).

Бета-распад — самопроизвольное превращение ядер, сопровождающееся испусканием или поглощением электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино. Известны три вида: электронный распад (превращение нейтрона в протон), позитронный распад (обратный процесс), электронный захват (гл.6, 14).

Биметалл — материал из двух слоев разнородных металлов или сплавов, получающийся при одновременной прокатке или прессовании (гл.12).

Биогенез — образование органических соединений живыми организмами (гл.22).

Биогенетический закон — обобщение, согласно которому индивидуальное развитие особи (онтогенез) является сокращенным повторением важнейших этапов эволюции (филогенеза) группы, к которой данная особь относится. Установлен Ф.Мюллером (1864) и Э.Геккелем (1866) (гл.20).

Биогеография — наука, изучающая распространение и распределение живого на Земле (гл.22).

Биогеоценоз — однородный участок поверхности с определенным составом живых (биоценоз) и косных (приземный слой атмосферы, почва, солнечная энергия и пр.), а

также и взаимодействие между компонентами. Термин предложен В.Н.Сукачевым (1940). Употребляется как синоним экосистемы (гл.22).

Биомасса — общая масса особей одного вида, группы видов или сообщества в целом, приходящаяся на единицу объема или поверхности местообитания. Иногда говорят — фитомасса и зоомасса (гл.22).

Бионика — наука, изучающая особенности строения и жизнедеятельности организмов для создания приборов, механизмов, систем и модернизации существующих. Одно из направлений кибернетики (гл.21).

Биополимеры — высокомолекулярные соединения (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды и их производные) (гл.19).

Биосфера — область распространения жизни на Земле. Включает нижнюю часть атмосферы, гидросферу и литосферу, населенные живыми организмами и связанные с ними. Термин введен Э.Зюссом (1875); учение о биосфере, в которой жизнедеятельность является геохимическим фактором планетарного масштаба создано В.И.Вернадским (1926) (гл.22).

Биота (греч. *biote* — жизнь) — исторически сложившаяся совокупность растений, микроорганизмов и животных на определенной территории. В отличие от биоценоза может характеризоваться отсутствием экологических связей между видами (гл.22).

Биоценоз (греч. *bio* + *koinos* — общий) — исторически сложившаяся совокупность растений, животных и микроорганизмов, населяющих данный участок и характеризующихся определенными отношениями между собой и приспособленностью к среде (гл.22).

Бифуркация (лат. *bifurcus* — раздвоенный) — приобретение нового качества движениями динамической системы при малом изменении ее параметров, соответствующее перестройке характера движения реальной системы, разветвлению в траектории движения системы в определенной точке (бифуркации) (гл.21).

Бихевиоризм (англ. *behavior* — поведение) — одно из ведущих направлений западной современной психологии, считающее предметом психологии не сознание, а поведение, понимаемое как совокупность реакций (двигательных, словесных...) на воздействия внешней среды (стимулы). Термин введен Э.Торндайком (гл.23).

Блеск — освещенность, создаваемая небесным телом в месте наблюдения на перпендикулярной лучам поверхности. Измеряется в звездных величинах (гл.14).

Близкодействие — представление, согласно которому взаимодействие между удаленными телами осуществляется через промежуточную среду от точки к точке с конечной скоростью (гл.7).

Бозе-газ, -жидкость, -частица — квантовый газ (жидкость, частица), с целым спином, бозонов, подчиняющаяся статистике Бозе–Эйнштейна, согласно которой в каждом квантовом состоянии может находиться произвольное число частиц (гл.6, 8).

Бозоны — микрочастицы с нулевым или целочисленным спином (фотон, глюоны, гравитон, векторные бозоны, бозон Хиггса, ядра с четным числом нуклонов...) (гл.6).

Больцмана принцип — соотношение между энтропией S и термодинамической вероятностью W (1872), на основании которого было дано статистическое истолкование второго начала термодинамики $\Delta S > 0$, $S = k \ln W$ (гл.9).

Больцмана распределение — равновесное распределение частиц идеального газа по энергиям во внешнем силовом поле, полученное в результате обобщения распределения Максвелла по скоростям частиц (гл.8).

Больцмана статистика — статистический метод описания идеального газа в состоянии термодинамического равновесия для частиц, движущихся по законам классической механики (гл.8).

Бора постулаты — введенные Н.Бором (1913) допущения теории атома, полученные из спектральных закономерностей: существование стационарных состояний атома определяемых значениями его внутренней энергии, на которых нет излучения; условие частот при переходе с одной орбиты на другую, причем $\nu = (E_2 - E_1)/h$, где h — постоянная Планка (гл.11).

Брахистохрона (греч. *brachistos* — кратчайший + *chronos* — время) — кривая быстрого спуска, при отсутствии сопротивления — циклоида.

Бриз — слабый береговой ветер, дующий днем с моря на сушу, а ночью — с суши на море.

Вакуум (лат. *vacuum* — пустота) — состояние газа при низких давлениях; в квантовой теории поля — низшее энергетическое состояние поля, в котором среднее число частиц — квантов поля — равно нулю. Но в нем могут рождаться виртуальные частицы, влияющие на различные процессы (было обнаружено) (гл.3, 6).

Валентность (лат. *valentia* — сила) — мера способности атома химического элемента к образованию химических связей с другими атомами (гл.12).

Вариантность — число степеней свободы термодинамической системы или число независимых параметров, полностью определяющих состояние системы.

Вегетативная нервная система (лат. *vegeto* — возбуждаю, оживляю) — часть нервной системы позвоночных, регулирующая деятельность внутренних органов и систем, обмен веществ и функциональное состояние тканей организма.

Вектор (лат. *vector* — несущий) — отрезок определенной длины и направления. Вектором состояния называют волновую функцию в квантовой механике. Под векторной диаграммой понимают графическое изображение физических величин, изменяющихся по гармоническому закону, и соотношений между ними в виде векторов. Векторное исчисление — раздел математики, изучающий операции над векторами.

Вероятность термодинамическая — число, пропорциональное количеству физически различимых микросостояний, которыми может быть осуществлено данное макроскопическое состояние системы (гл.9).

Верхняя мантия — оболочка Земли, подстилающая земную кору от границы между поверхностью и мантией (Мохоровичич, 1909) до глубин порядка 900 км; в ней развиваются процессы, с которыми связаны тектонические, магматические и метаморфические явления в земной коре (гл.16).

Вечный двигатель — 1. Первого рода — воображаемая непрерывно действующая машина, совершающая работу без получения энергии извне (противоречит 1-му началу термодинамики). 2. Второго рода — воображаемая тепловая машина, которая в результате совершения кругового процесса полностью преобразовывала бы получаемую теплоту в работу (противоречит 2-му началу термодинамики) (гл.9).

Вещество живое (в концепции В.И.Вернадского) — совокупность живых организмов биосферы, численно выраженная в химическом составе, массе, энергии.

Вещество косное (в концепции В.И.Вернадского) — материя, которая образует биосферу и не входит в состав живого вещества.

Вид — основная структурная классификационная единица в системе живых организмов, совокупность популяций особей, способных к скрещиванию с образованием плодотворного потомства, населяющих определенный ареал, обособленных от других нескрещиваемостью в природных условиях (гл.17).

Вильсона камера — первый трековый детектор заряженных частиц; основан на явлении конденсации пересыщенного пара на ионах, которые образуются вдоль следа (трека) заряженных частиц, треки фотографируются. Изобретена Ч.Вильсоном (1912).

Вириальное уравнение — уравнение состояния реального газа, в котором давление представлено в виде ряда — разложения по степеням плотности с так называемыми вириальными коэффициентами (гл.9).

Виртуальные частицы (состояния) — введенные теоретически частицы (состояния), непрерывно возникающие и исчезающие в очень короткие промежутки времени, причем в этих состояниях не выполняются обычные соотношения между массой, энергией, импульсом, тогда как другие характеристики у них — как у обычных частиц.

Вирусы (лат. *virus* — яд) — мельчайшие неклеточные частицы, состоящие из нуклеиновой кислоты (ДНК или РНК) и белковой оболочки; это внутриклеточные паразиты, поскольку размножаются только в живых клетках. Открыты Д.И.Ивановским (1892); возбудители инфекционных болезней растений, животных и человека, размножающиеся только внутри живых клеток (гл.18).

Внутреннее трение — свойство тел необратимо поглощать механическую энергию, получаемую при деформации тела; в жидкостях и твердых телах аналог вязкости.

Внутренняя энергия — понятие о энергии, которая складывается из кинетической энергии частиц тела и энергии взаимодействия атомов в молекулах, т.е. не включает потенциальную и кинетическую энергию движения тела как целого (гл.9).

Водородная связь — вид химической связи типа А–Н...В, в которой атом водорода, соединенный ковалентной связью с электроотрицательным ионом А (С, О, N, S...) образует дополнительную связь с атомом В (О, N, S), которая имеет направленную вдоль линии этой связи неподеленную электронную пару. Водородная связь приводит к ассоциации молекул в комплексы, что определяет свойства воды, молекулярных кристаллов, нуклеиновых кислот, белков и др. (гл.12).

Возбужденное состояние — неустойчивое состояние квантовой системы с энергией, которая превышает энергию основного состояния (гл.21).

Волновая функция — основная величина, определяющая состояние в квантовой механике (по квадрату ее модуля) и позволяющая находить вероятности и средние значения величин. Волновой пакет — волновое поле, занимающее ограниченный объем и перемещающееся в пространстве. Он может быть разложен на сумму монохроматических волн, частоты которых лежат в определенном интервале, причем центр волнового пакета движется с механической скоростью квантовомеханической частицы и из-за дисперсии среды пакет расплывается (гл.11).

Волны де Бройля — волны, соответствующие каждой движущейся частице (с импульсом p и энергией E) согласно концепции корпускулярно-волнового дуализма материи с $\lambda = h/p$, $\nu = E/h$, h — постоянная Планка (гл.10).

Волны — возмущения, распространяющиеся с конечной скоростью в пространстве и несущие энергию без переноса вещества. Волны могут быть поперечными и продольными; длинные волны могут быть представлены как суперпозиция гармонических волн, характеризующихся амплитудой, фазой, скоростью, частотой или длиной волны (гл.5).

Волоконная оптика — раздел оптики, изучающий распространение света и передачу информации по световодам. Наиболее распространены световоды из стекловолокна, который представляет тонкую нить, имеющую в центре показатель преломления больше чем в оболочке, так что свет распространяется в результате полного внутреннего отражения (гл.21).

Вынужденное излучение (индуцированное) — процесс испускания электромагнитных волн возбужденными квантовыми системами под внешним воздействием, основные характеристики (частота, поляризация, направление испускания и фаза) которого оно повторяет. Предсказано А.Эйнштейном (1917), использовано в лазерах (гл.21).

Вязкость — свойство газов и жидкостей, отражающее сопротивление действию внешних сил, вызывающих их течение (внутреннее трение).

Газ — агрегатное состояние вещества, при котором кинетическая энергия теплового движения составляющих газ частиц существенно превосходит потенциальную энергию взаимодействия этих частиц. Поэтому все частицы двигаются независимо и свободно, заполняя весь, предоставленный объем (гл.8).

Галактика (греч. *galaktikos* — млечный, молочный) — гигантская звездная система (до сотен миллиардов звезд). Галактики разделяют по внешнему виду на спиральные, эллиптические, компактные и неправильные (гл.14). Млечный путь — наша галактика — типичная спиральная звездная система, включающая в себя $2 \cdot 10^{11}$ степени звезд, в том числе Солнце со всеми планетами и межзвездное вещество. Солнце расположено на расстоянии около 10000 пк от ее центра, период обращения порядка 250 млн лет, линейная скорость вращения — 220–250 км/с (гл.14).

Галилея принцип относительности — во всех инерциальных системах любой механический процесс происходит одинаково, принят в классической механике

Ньютона; для перехода между такими системами — преобразования Галилея (гл.3, 4).

Галлея комета — член Солнечной системы с периодом обращения в 76 лет (гл.4).

Галогены (греч. *hals* — соль + *genes* — рождающий) — ряд химических элементов 7 группы Периодической таблицы Менделеева (фтор, хлор, бром, йод, астат), которые при соединении с металлами образуют соли.

Гальванический элемент — источник электрического тока, в котором энергия выделяется в результате окислительно-восстановительных реакций.

Гаметы — половые клетки растений и животных, обеспечивающие при слиянии развитие новой особи и передачу наследственных признаков от родителей к потомкам (гл.18).

Гамма-излучение — коротковолновое электромагнитное излучение (менее 10^{-8} см), которое возникает при распаде радиоактивных ядер, при аннигиляции и т.п., а также наблюдаемое как космическое фоновое и излучение от некоторых пульсаров (гл.6, 14).

Гармонические колебания — изменения колеблющейся величины во времени по гармоническому закону (по закону типа $x = A \sin(\omega t + \varphi)$, где A — амплитуда колебаний, ω — угловая частота, φ — начальная фаза колебаний (гл.5).

Гаусса распределение — закон Гаусса для распределения вероятностей, или нормальное распределение (гл.8).

Гейгеровский счетчик — детектор отдельных заряженных частиц, основанный на возникновении в газе ионизации при пролете частицы. Изобрел Х.Гейгер (1908).

Гелиобиология — раздел биофизики, изучающий влияние изменений активности Солнца на земные организмы. Один из основателей — А.Л.Чижевский (гл.22).

Гелиоцентрическая система мира — представление о строении солнечной системы с центром Солнце. Гипотеза Аристарха, возрожденная Н.Коперником (гл.2, 4).

Гемоглобин — дыхательный пигмент крови человека, переносящий кислород от органов дыхания к тканям и обратно — углекислый газ. Состоит из белка (глобина) и железопорфирина (гема) (гл.19).

Ген (греч. *genos* — происхождение) — участок молекулы ДНК, являющийся материальным носителем генетической (наследственной) информации, способный к воспроизведению и расположенный в определенном участке хромосомы. Генетический код универсален для всех организмов на Земле (гл.19).

Геном (англ. *genome* < греч. *genos* — происхождение) — совокупность генов, содержащихся в одинарном наборе хромосом данной растительной или животной клетки, т.е. весь объем наследственной информации организма, передаваемой при размножении (гл.19).

Генотип — совокупность всех генов организма (гл.19).

Гены-регуляторы — особый вид генов, действие которых в организме может меняться в зависимости от условий внешней среды и стадии развития при регуляторных процессах (гл.19).

Геонд — фигура нашей планеты Земли, ограниченная поверхностью мирового океана и ее продолжением под континентами; шар, сплюснутый у полюсов так, что радиус полярный меньше экваториального на 21 км (гл.4, 16).

Геоморфология — наука о рельефе суши, дна океанов и морей, изучающая строение, развитие, современную динамику и закономерности распространения (гл.16).

Геосферы — концентрические оболочки Земли, составляющие при движении к центру Земли: магнитосферу, атмосферу, гидросферу, литосферу, мантию и ядро Земли (гл.16).

Геоцентрическая система мира — антропоцентрическое представление о строении солнечной системы, где центр мироздания — Земля, вокруг которой вращаются Солнце, Луна и планеты по орбитам из кругов (эпициклы и деференты). Предложена Гиппархом и Птолемеем и сохраняющаяся до эпохи Возрождения (гл.3).

Герменевтика (греч. *hermeneutike* — искусство истолкования) — направление в методологии гуманитарного познания, исследующее проблемы интерпретации, перевода и понимания разнообразных текстов (гл.1).

Гетерозигота — клетка или организм, в наследственном наборе (генотипе) которого гомологические хромосомы несут разные формы (аллели) того или иного гена (гл.18).

Гетеролитические реакции — химические реакции без разделения электронной пары, осуществляющей химическую связь; разделяются на нуклеофильные и электрофильные реакции.

Гетеротрофные (гетеро + греч. *trophe* — пища) — организмы, питающиеся готовыми органическими веществами. К ним относятся грибы, многие микроорганизмы, все животные и люди (гл.19, 22).

Гиббса правило фаз — число равновесно существующих фаз в термодинамической системе не может быть больше числа образующих эти фазы компонентов плюс два. Установлено в 1875 г. (гл.8).

Гидроксильная группа — группа OH, входящая в состав молекул соединений (НОН — воды, C_2H_5OH — спиртов, NaOH — щелочей, к примеру) (гл.12).

Гидролиз — обменная реакция между веществом и водой ($AlCl_3 + 3H_2O = Al(OH)_3 + 3HCl$, например), лежащая в основе многих природных и технологических процессов (гл.19).

Гидросфера — водная оболочка Земли, совокупность океанов, морей, озер, рек, водохранилищ, болот (гл.16, 22).

Гильбертово пространство — понятие, обобщающее евклидово пространство на бесконечномерный случай, введенное Д.Гильбертом в начале XX века (гл.3).

Гипероны — квазистабильные барионы с отличным от нуля значением странности и полужелым спином. Существование их доказано в 1951 г. (гл.6).

Гироскоп — твердое тело, быстро вращающееся вокруг оси вращения, имеющейся у него. Основное свойство гироскопа с тремя степенями свободы — его ось сохраняет приданное ей первоначальное положение, поэтому при возмущении его ось отклоняется в направлении, перпендикулярном возмущению — начинается прецессия (гл.3).

Гликолиз — процесс расщепления углеводов под действием ферментов в отсутствие кислорода, конечный продукт в животных тканях — молочная кислота, у растений — пировиноградная кислота. Освобождающаяся энергия используется для жизнедеятельности; процесс связан с дыханием и брожением (гл.19).

Глобальный эволюционизм — представление о всеобщем характере эволюции во Вселенной, подтвержденное теориями в разных областях естествознания (гл.2, 20).

Глобулы — в Галактике газово-пылевые образования, наблюдаемые как темные пятна на фоне светлых туманностей, возможно, области рождения звезд; в белках полипептидные цепи свернуты в компактные шарообразные структуры — глобулы (ферменты, антитела, некоторые гормоны и т.д., выполняющие в клетках динамические функции) (гл.15).

Глобулярные белки — белки, в которых полипептидные цепи плотно свернуты в компактные шарообразные структуры — глобулы. Например, ферменты, антитела, многие белки, выполняющие в клетках динамические функции (гл.19).

Глюкоза (греч. *glykys* — сладкий) — углевод из группы моносахаридов, входящий в состав сахарозы и лактозы и образующий крахмал, гликоген, целлюлозу. Ключевой продукт обмена веществ, источник энергии, исходный продукт биосинтеза (гл.19).

Глюон (греч. *glio* — клей) — нейтральная частица с нулевой массой, переносящая сильное ядерное взаимодействие и имеющая спин, равный 1. «Склеивают» кварки в адроны при переносе сильного взаимодействия (гл.6).

Голография (греч. *holos* — полный + ...графия) — метод точной записи, воспроизведения и преобразования волновых полей, основанный на явлениях интерференции. Предложен Д.Габором (1948) (гл.10).

Гомеостазис (греч. *homoiios* — подобный + *stasis* — состояние) — совокупность приспособительных реакций организма, направленных на сохранение динамического состояния его внутренней среды (температуры тела, кровяного давления и др.). В его основе лежит принцип отрицательной обратной связи.

Гомогенная система — система, в которой химический состав и физические свойства меняются непрерывно или постоянно.

Гондвана — гипотетический материк южного полушария, существовавший якобы с начала палеозойской эры и частично в мезозойской и погрузившийся большей своей частью в Индийский океан в триасе и юре (гл.16, 23).

Горизонт событий — замкнутая поверхность вокруг черной дыры, ограничивающая область, где силы гравитации столь велики, что никакие сигналы не выходят.

Гормоны (греч. *hormao* — возбуждаю, привожу в движение) — биологические активные специфические вещества, управляющие функционированием отдельных органов и систем организма, которые вырабатываются в небольших количествах железами внутренней секреции и разносятся по всему организму.

Горные породы — природные агрегаты минералов почти постоянного состава, образующие самостоятельные геологические тела, составляющие земную кору.

Гравитация (лат. *gravitas* — тяжесть) — всемирное тяготение, образующие поле тяготения. Гравитационное взаимодействие самое слабое из известных (гл.4).

Грамм-атом (грамм-молекула) — количество вещества в граммах, численное равное его атомной (молекулярной) массе, вместо последнего в системе СИ — моль.

Гранитизация — совокупность процессов, происходящих в глубинных зонах и превращающих твердые породы в граниты, связанная с обогащением их щелочными металлами и SiO_2 и выносом из них Fe, Mg, Ca.

Групповая скорость — скорость переноса энергии волной; величина, характеризующая распространение негармонической волны, представляемой в виде суперпозиции гармонических волн со своими фазовыми скоростями (гл.5).

Давление света — результат передачи телам импульса отражаемых или поглощаемых фотонов, приводящий к давлению света. Обнаружено П.Н.Лебедевым (1899).

Дальнодействие — представление, по которому действие передается мгновенно через пустоту на любые расстояния. Концепция жила со времен Ньютона до открытия электромагнитного поля в 60–80-е годы XX в. (гл.4).

Дальтониды и бертоллоиды — химические соединения постоянного (твердые тела с кристаллической решеткой, газы) и переменного состава (ионные кристаллы), соответственно. Термины введены Н.С.Курнаковым (1912–1914 гг.) в память ученых.

Дарвинизм — теория исторического развития органического мира на Земле, основанная на идеях Ч.Дарвина, и полагающая, что эволюцию определяют три фактора: наследственность, изменчивость и естественный отбор. Термин предложен А.Уоллесом, пришедшим к аналогичным движущим силам эволюции живого (гл.20).

Двойные звезды — система из двух звезд, вращающиеся вокруг общего центра масс под действием гравитации (гл.3, 14).

Девонский период — четвертый период палеозойской эры геологической истории, начавшийся 410 млн лет назад и длящийся около 60 млн лет. В начале климат засушливый, отступление моря и накопление толщ континентальных отложений до каледонской складчатости; в середине — эпоха погружений, активизация вулканической деятельности, потепление климата; конец периода — начало герцинской складчатости, появление в морях панцирных и кистеперых рыб, кораллов, на суше — первые членистоногие, папоротники. Полезные ископаемые — нефть, газ, бокситы, каменные и калийные соли, медистые песчаники (гл.23).

Деление атомных ядер — распад атомного ядра на 2, реже — более осколка. Сопровождается вылетом вторичных нейтронов, гамма-квантов и высвобождением энергии. Обнаружено О.Ганом и Ф.Штрассманом (1938). Самопроизвольное деление у тяжелых элементов (урана) открыто Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком (1940).

Детального равновесия принцип — при статистическом равновесии любой микропроцесс протекает с той же вероятностью, что и обратный (гл.9, 21).

Детонация (фр. *detoner* — взрывать) — химические процессы в тонком слое при взрыве, распространяющиеся со сверхзвуковой скоростью, входящие в комплект ударной волны и следующие за ней.

Диаграмма состояния (фазовая диаграмма) — графическое изображение соотношений между параметрами состояния термодинамически равновесной системы (темпе-

ратура, давление, объем, состав), позволяющее определить фазовый состав при данных условиях (гл.9).

Динамическая система — механическая система с конечным числом степеней свободы.

Диплоидный — двойной набор хромосом в отличие от одинарного, гаплоидного набора половых клеток (гл.18).

Диполь (греч. *di* — дважды + *polos* — полюс) — совокупность двух электрических (магнитных) зарядов, отличающихся только знаком и расположенных на определенном расстоянии. Свойства диполя определены его дипольным моментом (гл.7, 12).

Дискретный (лат. *discretus* — раздельный, прерывистый) — прерывный, состоящий из отдельных частей.

Дислокации — дефекты кристаллической решетки, представляющие собой линии нарушения правильного чередования атомных плоскостей (гл.12).

Дисперсия волн (лат. *dispersio* — рассеяние) — зависимость фазовой скорости гармонической волны в среде от их частоты, которая искажает форму сигнала. Пример — разложение в спектр белого света после прохождения через призму (гл.10).

Диссимилиация (лат. *dissimilatio* — расподобление) — распад сложных веществ на простые в организме, сопровождающийся освобождением энергии. В единстве с ассимиляцией характеризует обмен веществ — метаболизм (гл.18).

Диссипативные системы — системы, при движении которых происходит рассеивание энергии. По Пригожину, возникающие в сложных неравновесных системах структуры могут существовать только при диссипации энергии от внешнего источника (гл.21).

Диссипация (лат. *dissipatio* — рассеивание) — переход энергии упорядоченного движения в энергию хаотического движения (теплоту) (гл.21).

Дифракция волн — явление, связанное с отклонением волн от прямолинейного распространения при прохождении препятствия, проявляющееся в проникновение волн в область геометрической тени (гл.5, 10).

Дифракция волн (лат. *diffractus* — разломанный) — явление огибания препятствий волнами, когда размеры препятствий порядка или больше длины волны. Используемый в спектроскопии прибор — дифракционная решетка (гл.10).

Дифракция частиц — рассеяние потока микрочастиц кристаллами или молекулами с образованием чередующихся максимумов и минимумов в интенсивности рассеянного света; проявление корпускулярно-волнового дуализма частиц (гл.10).

Дифференциация (фр. *differentiation* < лат. *differentia* — различие) — в научном познании необходимый этап развития, направленный на более тщательное и глубокое изучение отдельных явлений и процессов определенной области действительности. В филогенезе — расчленение группы организмов на несколько в процессе эволюции; в онтогенезе — превращение первоначально одинаковых клеток зародыша в специализированные клетки тканей и органов (гл.1).

Диффузия (лат. *diffusio* — распространение, рассеивание) — движение среды, направленное на выравнивание

концентрации и установление равновесного их распределения (гл.9).

Диэлектрик — вещество, обладающее малой электропроводностью. Изолятор (например, стекло, сера) (гл.12).

Длина свободного пробега — среднее расстояние, проходимое частицей между двумя последовательными столкновениями с другими частицами (гл.8).

ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота — самое сложное из известных органическое вещество, молекула которого содержит всю наследственную информацию организма. На протяжении всей жизни организма с различных участков его ДНК снимается информация для построения всех внутренних систем. Молекула ДНК состоит из двух длинных нитей, скрученных между собой. При определенных условиях она может дублировать себя путем разведения нитей и воссоздания недостающей части (процесс репликация) (гл.19).

Дозвездное вещество — вещество, из которого формировались звезды. По модели горячей Вселенной оно состояло из водорода и примерно на 1/3 — из гелия (гл.15).

Докембрий — древнейшие толщи земной коры, сформированные более 570 млн лет назад, что составляет 6/7 истории планеты или 4 млрд лет. В это время зародилась жизнь, возникла почти современная атмосфера (появился в ней кислород), но отсутствовала скелетная фауна. Примерно 2 млрд лет назад появились и первые животные, первые их останки — в конце периода. Несколько раз отмечалась повышенная тектономагматическая активность, сформированы отложения Fe, Au, Cu, U, Mn и полиметаллов (гл.23).

Дрейф континентов — медленные перемещения материков («мобилизм») или крупных плит, на которые по гипотезе «глобальной тектоники» разбиты литосфера Земли, по астеносфере. Гипотезу мобилизма первым предложил А.Вегенер (1912) (гл.16).

Дробовой шум — флуктуации напряжений и токов относительно средних значений в приборах радиоэлектроники (гл.8).

Естественный отбор — особый механизм отбора в природе, приводящий к выживанию наиболее приспособленных и гибели организмов, оказавшихся не приспособленными к условиям окружающей среды. Как следствие борьбы за существование он обуславливает целесообразность строения и функций организмов и служит движущим фактором исторического развития живой природы. Открыт Ч.Дарвином (1839) (гл.20).

Жидкие кристаллы — жидкости, обладающие анизотропией свойств, определяемой упорядоченностью ориентации молекул (гл.12).

Жидкости — агрегатное состояние веществ, сочетающее свойства газообразного (изменчивость формы) и твердого состояния (сохранение объема, некоторую прочность на разрыв). В отличие от газов — наличие ближнего порядка в расположении частиц и малое отличие величины кинетической энергии теплового движения частиц (колебания частиц около положений равновесия и редких перекоков от одного положения равновесия к другому, что

вызывает текучесть жидкости) от потенциальной энергии их взаимодействия (гл.12).

Жиры — органические соединения, липиды (гл.19).

Замкнутая система управления — система управления с обратной связью, один из основных типов систем автоматического регулирования (гл.21).

Звездная величина — мера блеска небесного светила, изменение которой на единицу соответствует изменению блеска в 2,5 раза (гл.14).

Звездная эволюция — изменение физико-химического состояния звезд со временем (гл.15).

Звездные скопления — группы звезд, имеющих общее происхождение и близкий химический состав, а также связанных тяготением. Бывают шаровые и рассеянные (гл.14).

Звук — упругие волны, воспринимаемые ухом человека и животных, т.е. с частотами от 16 Гц до 4–4,5 кГц; с меньшими частотами — ультразвук, а с большими, до 1000 мГц — инфразвук; с еще большими — гиперзвук (гл.5).

Землетрясение — колебания земной поверхности (и толчки), возникающие при внезапных смещениях и разрывах в земной коре или мантии и передающиеся на большие расстояния в виде упругих колебаний. Энергетическая шкала — магнитуда по шкале Рихтера, интенсивность — сейсмические баллы (гл.16).

Земля — третья от Солнца планета, находящаяся на расстоянии 149,6 млн км и движущаяся по эллиптической орбите со скоростью 29,765 км/с за период 365,24 средних суток. Наклон земной оси к плоскости эклиптики 66°33 мин, период вращения 23 ч. 56 мин 4 с. Экваториальный радиус 6378,160 км, полярный — 6356,777 км; средняя плотность 5518 кг/м³, масса 5976,10²¹ кг. Гравитационное поле Земли определяет почти сферическую форму и существование атмосферы. Спутник Луна обращается вокруг Земли за 27,3 сут. на расстоянии 384400 км (гл.16).

Зигота — клетка, образующаяся при слиянии двух половых клеток в процессе оплодотворения у растений и животных (гл.18, 19).

Зодиак — совокупность созвездий, расположенных вдоль эклиптики — большого круга небесной сферы, по которому Солнце совершает свой видимый путь в течение года (гл.3, 14).

Золотое сечение — гармоническое деление, введенное Леонардо да Винчи, или деление отрезка AC на части так, что большая часть AB относится к меньшей BC так, как весь отрезок AC относится к AB ($AB : BC = AC : AB$).

Игр теория — раздел математики, изучающий модели принятия оптимальных решений в условиях конфликта, в играх (шахматы, домино, шашки) и в ситуациях, возникающих в военном деле, экономике, пр.

Изменчивость — общее для всех организмов свойство приобретать различия между особями одного вида. Классической причиной изменчивости являются точечные мутации молекулы ДНК под действием факторов окружающей среды, которые переходят к потомкам данного организма.

Это так называемая наследственная изменчивость, лежащая в основе эволюции; ненаследственная — под действием иных внешних факторов (гл.20).

Изомеры (изо... + греч. *meros* — доля, часть) — химические соединения, одинаковые по молекулярной массе и составу, но различающиеся по строению (гл.12).

Изотопы — атомы одного и того же химического элемента, имеющие разные атомные массы, обладающие одинаковыми химическими свойствами, но отличающиеся по физическим свойствам (гл.6).

Изотропность (изо... + греч. *tropos* — свойство) — одинаковость свойств объектов (пространства, вещества и др.) по всем направлениям. Это условие служит одной из предпосылок стандартной модели Вселенной (гл.3, 14).

Инбридинг — скрещивание между собой двух близкородственных организмов для улучшения животных или растений в сельском хозяйстве (гл.20).

Инверсия населенностей — неравновесное состояние, при котором населенность верхнего уровня энергии одного типа атомов, ионов или молекул превышает населенность нижнего, что нарушает равновесное распределение (по Больцману) (гл.9, 10).

Ингибитор — вещество, снижающее скорость химической реакции, но не расходующееся в ее процессе (гл.13).

Индукция — возбуждение электрического поля в проводнике при перемещении его в магнитном поле или при изменении магнитного поля вокруг него (гл.7).

Инстинкт — врожденная форма поведения, свойственная данному виду животных, представляющая собой цепь безусловных рефлексов, вызываемых определенными раздражителями (гл.23).

Интегральная оптика — раздел науки, изучающий миниатюрные оптические системы, содержащие тонкопленочные диэлектрические световоды, генераторы и т.п., осуществляющие передачу, усиление и преобразование световых сигналов.

Интерференция волн — явление, состоящее в стационарном пространственном распределении амплитуды и фазы волны, образованной при одновременном распространении нескольких волн. Интерференция возможна при когерентности волн, т.е. при условии постоянства их разности фаз (гл.5, 10).

Ионизация — превращение атомов в ионы путем потери электрона, отношение плотности ионов в плотности нейтральных частиц — степень ионизации (гл.7).

Ионная связь — связь атомов в молекуле, когда один атом отдает другому один или несколько электронов так, что каждый атом становится обладателем стабильного набора электронов (гл.12).

Ионосфера — ионизованная часть верхней атмосферы Земли, расположенная на высоте более 50 км, ограниченная снаружи магнитосферой. Это — природное образование разреженной слабоионизованной плазмы, находящейся в магнитном поле Земли и подвергающейся действию ионизирующего солнечного излучения, благодаря ионосфере возможна передача радиоволн на большие расстояния (гл.7, 16).

Кавитация (лат. *cavitas* — пустота) — образование в жидкости пузырьков, заполненных газом, паром или их смесью, возникающее при местном понижении давления в жидкости из-за увеличения ее скорости или при прохождении сильной акустической волны. При перемещении в область более высокого давления кавитационный пузырек захлопывается, испуская ударную волну, которая повреждает поверхности судов (гл.12).

Кайнозойская эра — самая молодая группа общей стратиграфической шкалы слоев земной коры и новейшая эпохи геологической истории, начавшаяся 60–70 млн лет назад. Характеризуется интенсивным горообразованием, подразделяется на следующие периоды: Палеоген (40 млн лет назад), неоген (24 млн лет назад) и антропоген (с 3 млн лет назад). Перед последним (четвертичным) произошло сильное оледенение и скачок в распространении млекопитающих (гл.23).

Календарь — система счисления времени, основанная на периодических явлениях природы; по Солнцу — смене времен года, по Луне — смене фаз Луны. Современный календарь назван григорианским — новый стиль — введен папой Григорием XIII в 1582 г. взамен юлианского (старый стиль) (гл.3).

Карбон (каменноугольный период) — пятый период палеозойской эры геологической истории Земли, начавшийся 350 млн лет назад и продолжавшийся 65–75 млн лет, отличающийся тектонической активностью, приведшей к герцинской складчатости, формированию залежей торфа и каменного угля (гл.16, 23).

Карлики — звезды до 0,1 солнечной массы, небольших размеров (до 0,01 радиуса Солнца) и малой светимости (до 10^{-4} солнечной). Считается, что они — финальная стадия эволюции звезд (гл.15).

Карст — явления связаны с растворением природными водами горных пород и приводят к комплексы структур как под землей (пещеры, ходы, колодцы), так и на поверхности (воронки, поля) (гл.16).

Катаболизм (греч. сбрасывание, разрушение) — совокупность ферментативных реакций расщепления (дыхание, гликолиз, брожение) сложных органических веществ в организме, при которых происходит высвобождение энергии и запасание ее в форме богатых энергией фосфатных связей в АТФ. Конечные продукты: вода, CO_2 , мочевины, молочная кислота (гл.18).

Катализ (греч. *katalysis* — разрушение) — возбуждение химических реакций или изменение скорости их протекания посредством добавления особых веществ — катализаторов, не участвующих непосредственно в реакции, но изменяющих ход ее протекания. Реакции могут замедлять иные вещества — ингибиторы (гл.13).

Катализатор — вещество, ускоряющее (замедляющее — ингибитор) ход химической реакции и остающееся в итоге в неизменном количестве (гл.13).

Катастроф теория — универсальный метод исследования всех скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений, возникающих в системе в ответ на плавное изменение внешних условий (гл.21).

Квазары (квазизвездный источник излучения) — космические объекты малых угловых размеров, имеющие

большие красные смещения линий в спектрах, т.е. находящиеся на окраинах Вселенной, и излучающие в десятки раз больше энергии, чем мощные галактики, считают их являющимися протоядрами новых галактик (гл.14).

Квант — минимальное количество энергии, на которое может измениться физическая величина или носитель какого-либо поля (например, квант электромагнитного поля — фотон, гравитационного — гравитон, звукового поля — фонон) (гл. 6).

Квантовая механика — теория, устанавливающая способ описания и законы движения микрочастиц во внешних полях. С ее помощью удалось описать структуру атомов и понять их спектры, выяснить природу химической связи и смысл периодической системы химических элементов, осуществить переход от свойств микромира к макроскопическим характеристикам, понять многие явления и предсказать новые (сверхтекучесть, сверхпроводимость, ферромагнетизм, а так же создать ядерную энергетику, квантовую электронику и др. Дискретность значений физических величин и вероятностный характер предсказаний изменили мировоззрение (гл.11).

Квантовая теория поля — релятивистская квантовая теория систем с бесконечным числом степеней свободы, определяет взаимодействия и превращения элементарных частиц, включает теорию известных взаимодействий в физике (электромагнитного, слабого и сильного ядерного — квантовую хромодинамику) (гл.11).

Кварки — гипотетические частицы с дробным электрическим зарядом, из которых, возможно, состоят адроны (барионы — из трех, мезоны — из кварка и антикварка). Им приписывают разные свойства — типы: цвет, аромат... Их шесть типов с дробным электрическим зарядом, последний (шестой) из предсказанных теоретически был открыт в 1994 г. Это конечные бесструктурные образования размером порядка 10^{-12} см (гл.6).

Кембрий — первый период палеозойской эры, начавшийся 570 млн лет назад и длившийся 70 млн лет. В кембрии появились скелетные организмы, преобладали трилобиты, моллюски, иглокожие.

Кеплера законы — три закона движения планет вокруг Солнца, установленные на основе обобщения данных наблюдений за перемещением планет (гл.4).

Кибернетика (греч. *kybernetike* — искусство управления) — наука об общих принципах управления в машинах, живых организмах и обществе, о связи и переработке информации. Кибернетические системы рассматриваются абстрактно, вне зависимости от их природы (регуляторы в технике, ЭВМ, общество, мозг человека...) (гл.21).

Кинетическая теория газов — теория, объясняющая свойства газов на основе представлений о движении и взаимодействии частиц, составляющих тела. Объясняет и неравновесные свойства газов, явления переноса массы, энергии, импульса (гл.8).

Клетка — элементарная структурная единица живой материи, основа строения и жизнедеятельности всех организмов, которые бывают одноклеточные и многоклеточные. Клетка состоит из оболочки (мембраны), ядра и органелл, погруженных в цитоплазму (гл.18).

Климат — статический многолетний режим погоды какой-либо местности (гл.22).

Клон — ряд следующих друг за другом поколений наследственно однородных потомков одной исходной особи, образовавшиеся в результате бесполового размножения (гл.19, 20).

Коацерваты — капельки или слои в коллоидном растворе с большей концентрацией коллоида, чем окружающий раствор (гл.20).

Когезия — взаимное притяжение частиц в теле, вызванное межмолекулярным взаимодействием, что наиболее существенно в конденсированных средах — твердых и жидких (гл.12).

Когерентность — согласованное протекание во времени нескольких колебательных процессов, характеризующее сохранением во времени или изменением по строго выполняемому закону разности фаз колебаний (гл.10, 21).

Коллоидные системы — дисперсные системы с частицами размером от 0,001 мкм до 0,1 мкм, для которых характерно броуновское движение (гели и золи) (гл.12).

Комета (греч. *kometes* — длинноволосый) — небесные тела, члены солнечной системы с массой в 10^{11} – 10^{19} кг, двигающиеся по сильно вытянутым орбитам, у которых при приближении к Солнцу выделяется ядро — «голова» (диаметром в 0,5–20 км) и «хвост»; состоят из обледеневших газов и частичек пыли (гл.3, 16).

Комплементарность — однозначное соответствие последовательности нуклеиновых оснований в одной и другой цепях ДНК при синтезе новой цепи ДНК (гл.19).

Конвекция — перенос массы при перемещении сплошной среды (газ, жидкость) — свободная, вынужденная, капиллярная (гл.12).

Конвергенция — схождение признаков в процессе эволюции неблизкородственных групп организмов, приобретенные ими сходного строения в результате существования в сходных условиях и одинаково направленного естественного отбора (гл.19).

Консументы — организмы, являющиеся потребителями органического вещества в пищевых цепях, т.е. все гетеротрофные организмы (гл.22).

Конфигурации планет — характерные взаимные расположения тел солнечной системы относительно Земли и Солнца (соединения, элонгации, квадратуры).

Кориолиса сила — одна из сил инерции, учитывающая влияние вращения подвижной системы отсчета на относительность движения тела. Объясняет закон Бэра (гл.4).

Корпускулярно-волновой дуализм — двойственная природа мельчайших частиц вещества, состоящая в наличии у них не только корпускулярных, но и волновых свойств. Количественно представляется соотношением де Бройля (гл.10).

Космическая пыль — частицы вещества межзвездного и межпланетного пространств. В Галактике они образуют облака и глобулы, ослабляющие свет звезд.

Космические лучи — поток частиц высоких энергий (до 10^{12} ЭВ), приходящих на Землю из космического пространства (протоны, альфа-частицы, ядра атомов) а также рожденное ими вторичное излучение при возбуждении атомов атмосферы, которое включает все известные элементарные частицы. Основные источники — пульсары, сверхновые звезды и только небольшая часть — от Солнца (гл.6).

Космогония (греч. *kosmogonia*) — наука о происхождении космических тел и их систем, подразделяется на планетную и звездную (гл.16).

Космологические модели — модели Вселенной, удовлетворяющие общей теории относительности и относящиеся ко Вселенной в целом. Значение средней плотности вещества определяет выбор модели — открытая или замкнутая, расширяющаяся или пульсирующая (гл.15).

Космология — физическое учение о развитии Вселенной в целом, основанное на общих ее свойствах (однородности, изотропности, расширении наблюдаемой ее части). Сейчас распространена теория горячей Вселенной, начало которой связано с гипотезой Большого Взрыва (гл.15).

Красное смещение — увеличение длины волны в спектре источника, удаляющегося от наблюдателя, связанное с эффектом Доплера. В астрономии наблюдается в спектрах далеких галактик и истолковывается как космологическое расширение (гл.5, 15).

Креационизм (лат. *creatio* — созидание) — концепция, трактующая многообразие органических форм как результат божественного творения (гл.20).

Криогенез (греч. *kríos* — холод, лед) — процессы, происходящие в оболочке Земли от верхних слоев коры до ионосферы, сопровождающиеся образованием льда (гл.16, 23).

Критическая точка — изображение на диаграммах состояния вещества на границе равновесия фаз. Например, выше критической температуры может существовать только одна фаза — пар, а ниже — две фазы — пар и жидкость (гл.9).

Кроссинговер — взаимный обмен участками парных хромосом, приводящий к рекомбинации генов, который происходит в процессе деления клеток, это один из механизмов наследственной изменчивости в генетике (гл.19).

Кроссинговер — взаимный обмен участками парных хромосом, происходящий в результате разрыва и соединения в новом порядке их нитей; механизм, обеспечивающий комбинаторную изменчивость — один из главных факторов эволюции (гл.20).

Кросс-катализ — химическая реакция, при которой два вещества помогают взаимному синтезу друг друга (например, нуклеиновые кислоты являются носителями информации, необходимой для синтеза протеинов, а протеины синтезируют нуклеиновые кислоты).

Лавразия — по предположению, это материк Северного полушария, существовавший с середины палеозоя и отделившийся от Гондваны — материка Южного полушария — океаном, а в середине мезозоя распавшийся на части, разделенные Атлантическим океаном (гл.16).

Лазер — прибор для получения узконаправленных, интенсивных и когерентных пучков светового излучения (гл.10).

Ламаркизм — первая концепция эволюционного развития живой природы, разработанная Ж.Б.Ламарком и основанная на изначальной целесообразной реакции организмов на изменение условий среды (гл.20).

Ландшафт — природный географический комплекс, в котором все основные компоненты (рельеф, воды, почвы, климат, растительный и животный миры) находятся во взаимодействии и взаимообусловленности, образуя неразрывную систему (гл.16).

Лептоны (греч. *leptos* — легкий) — элементарные частицы с $s = 1/2$, которые участвуют в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях и не участвуют в сильных взаимодействиях (электрон, мюон, нейтрино, их античастицы и др.) (гл.6).

Липиды (греч. *lipos* — жир) — природные органические соединения, содержащие жирные кислоты и спирт, которые участвуют в передаче нервных импульсов, создании водоотталкивающих и теплоизолирующих свойств, образуют энергетический резерв организма и содержатся во всех живых клетках (гл.18, 19).

Литология — наука об осадочных породах, их составе, строении, образовании и изменениях.

Литосфера — верхняя оболочка Земли, включающая земную кору и часть верхней мантии (гл.16).

Магма — расплавленная масса, в основном силикатная, образующаяся в глубинных слоях Земли при плавлении вещества верхней мантии (гл.16).

Магнитная гидродинамика — наука, изучающая движение электропроводящих сред в магнитных полях, объясняет явления в космосе и важна при решении задач управляемых термоядерных реакций.

Магнитобиология — раздел биологии, изучающий действия создаваемых в организме и внешних магнитных полей на живые организмы.

Магнитосфера — область околопланетного пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем планеты и его взаимодействием с потоками заряженных частиц (солнечным ветром). Имеет вытянутую форму — для Земли со стороны Солнца размер 8–14 радиусов Земли, а с другой — до сотен радиусов. Помимо земной, выраженные магнитосферы имеют Юпитер и Сатурн (гл.16).

Магнитуда — величина, которая характеризует общую энергию упругих колебаний, вызванных землетрясениями или взрывами (гл.16, 21).

Мазер — квантовые усилители и генераторы СВЧ-диапазона (гл.10).

Макромолекулы — молекулы полимеров, содержащие до миллиона атомов, соединенных химическими связями. Способны менять форму из-за воздействий (гл.12).

Макроскопическое состояние — определяется значениями термодинамических параметров: давления, температуры, внутренней энергии и т.п. (гл.9).

Макрофаги — клетки животных и человека, способные к захвату и перевариванию бактерий, токсичных частиц и остатков чужеродных клеток (гл.17, 18).

Макроэволюция — совокупность эволюционных преобразований за длительный исторический период, приводящие к возникновению новых надвидовых форм организации живого, происходящая на основе микроэволюционных процессов (гл.20).

Максвелла распределение — распределение частиц газа по скоростям в условиях термодинамического равновесия (гл.8).

Максвелла уравнения — уравнения макроскопической электродинамики, описывающие электромагнитные явления в различных средах (гл.7).

Мантия — оболочка Земли, расположенная между ядром и земной корой (гл.16).

Марковский процесс — специфический вид случайного процесса (пример — радиоактивный распад).

Медиаторы — химические вещества, способные под влиянием нервных импульсов регулировать проницаемость клеточной мембраны для определенных ионов, что сопровождается генерацией электрического сигнала или передачей сигнала между клетками (гл.18).

Межмолекулярное взаимодействие — взаимодействие молекул с насыщенными химическими связями, т.е. определяющее электрическими свойствами. Понятие введено Ван-дер-Ваальсом для реальных газов и жидкостей (1873) (гл.12).

Мезозойская эра (греч. *mesos* — средний + *zoē* — жизнь) — вторая группа фазерозы и соответствующая ей эра в истории Земли, которая началась 235 млн лет назад и продолжалась 170 млн лет, ее составляют периоды — триас, юр и мел. Отличается горообразованием и магнетизмом, развитием пресмыкающихся, достигавших огромных размеров (динозавры, ихтиозавры...), сменой флоры и фауны (гл.16, 23).

Мезоны — нестабильные элементарные частицы, имеющие целый или нулевой спин и относящиеся к адронам (π -мезоны, K -мезоны, некоторые резонансы), являющиеся переносчиками ядерных сил (гл.6).

Мезосфера — слой атмосферы, находящийся над стратосферой (на высотах от 50 до 85 км) и обладающий перепадом температур от 0° до -90°С (гл.16).

Мейоз (греч. *meiosis* — уменьшение) — способ деления клетки с уменьшением числа хромосом в дочерней клетке, определяющий образование половых клеток (гл.18).

Меловой период (мел) — третья система мезозойской эры, начавшаяся 137 млн лет назад продолжительностью в 70 млн лет, которая отличалась вымиранием крупных пресмыкающихся и появлением млекопитающих, а также залежами мела, нефти, осадочных железных руд (гл.16, 23).

Менделя законы сформулированы в 1866 г. и подтверждены хромосомной теорией наследственности: единообразии гибридов первого поколения; расщепления гибридов второго поколения; независимости расщепления (гл.19).

Местная группа галактик — включает около 20 галактик, расположенных ближе к нашей Галактике (на расстояниях менее 1 Мпс) (гл.14).

Метаболизм (греч. *metabole* — перемена) — обмен веществ, совокупность процессов ассимиляции и диссимиляции в организме (гл.17, 19).

Метagalaktika — наблюдаемая часть Вселенной со всеми находящимися в ней галактиками и другими объектами (гл.14).

Метаморфизм горных пород — процесс изменения текстуры, структуры и состава из-за изменения T , p и химической активности глубинных растворов.

Метастабильное состояние — относительно устойчивое состояние системы, из которого она может самопроизвольно или под влиянием внешнего воздействия перейти в более устойчивое (пример — переохлажденная жидкость или газ) (гл.12).

Метафаза — вторая стадия клеточного деления, которая характеризуется движением хромосом к центру клетки и разведением сестринских хромосом; следует за профазой (гл.18).

Метеоры (греч. *meteora* — атмосферные явления) — свечения в верхних слоях атмосферы, вызванные попаданием очень быстрых (до 12 км/с) частиц или тел из космоса, либо сгорающих полностью (абляция), либо вызывающих ионизацию и свечение газов (гл.16).

Метрика пространства-времени — геометрические свойства четырехмерного пространства-времени в теории относительности, согласно общей теории относительности метрика зависит от находящейся в пространстве-времени материи (гл.3).

Метрология — наука об измерениях и методах достижения определенной точности.

Механицизм — метод познания и понимания, основанный на сведении всех форм движения материи к механической (гл.2, 4).

Миграция элементов — перераспределение элементов в земной коре из-за геохимических процессов, которая приводит к появлению месторождений.

Микроэволюция — совокупность эволюционных изменений, происходящих в генофондах популяций за сравнительно небольшой период времени, приводящая к возникновению различий между организмами, изменению генофонда и образованию новых видов (гл.20).

Митоз (греч. *mitos* — нить) — способ деления клеток, обеспечивающий одинаковое распределение генетического материала между дочерними клетками и преемственность хромосом (состоит из нескольких этапов) (гл.18).

Митохондрии — органоиды клетки, в которых происходят окислительно-восстановительные реакции, обеспечивающие клетки энергией (гл.18).

Млечный путь — наша галактика — типичная спиральная звездная система, включающая в себя $2 \cdot 10^{11}$ степени звезд, в том числе Солнце со всеми планетами и межзвездное вещество.

Модуляция колебаний — изменение по заданному временному закону величин, характеризующих колебания, чаще всего электромагнитные (гл.5).

Молекулы (лат. *mole* — масса) — наименьшая частица вещества, сохраняющая его свойства (гл.12).

Мономеры — вещество, состоящее из молекул, способных реагировать с образованием полимера.

Муссоны — устойчивые сезонные ветры, дважды за год меняющие направления на противоположное (гл.22).

Мутагенез — процесс возникновения в организме наследственных изменений — мутаций (гл.19).

Мутация (лат. *mutatio* — изменение, перемена) — внезапное и стойкое изменение наследственных структур на уровне гена, вызванное естественным или искусственным путем. Измениться могут сами гены, или у потомков они могут оказаться в новой комбинации (комбина-

тивная изменчивость), или этот ген повлияет на несколько признаков организма (соотносительная изменчивость). При этом механизме порядок расположения генов в хромосоме не меняется (гл.19).

Наследственная изменчивость — изменчивость, обусловленная возникновением новых генотипов (аналог «неопределенной наследственности» Ч.Дарвина) (гл.19).

Наследственность — свойство организмов сохранять в следующих поколениях похожие типы обмена веществ и индивидуального развития в результате самовоспроизведения генов, что лежит в основе эволюции живого (гл.19, 20).

Нейрон (греч. *neuron* — нерв) — клетка, имеющая отростки (длинный аксон и короткие — дендриты) и проводящая нервные импульсы к органам, причем взаимодействие нервов как между собой, так и с органами — через синапсы (гл.18).

Нейтрино (итал. *neutrino* — уменьшенный нейтрон) — стабильная нейтральная частица, участвующая в только в слабом и гравитационном взаимодействиях и относящаяся к лептонам, имеющая спин $1/2$; считают, что ее масса равна почти нулю. Электронное нейтрино участвует всегда с электроном или позитроном, мюонное — с мюоном, тау-нейтрино — с тяжелым лептоном; кроме того, каждое нейтрино имеет свою античастицу (гл.6).

Нейтрон (лат. *neuter* — ни тот, ни другой) — нейтральная элементарная частица (нестабильная в свободном состоянии, но стабильная в ядрах атомов) со спином $1/2$ и массой чуть больше массы протона, относящаяся к барионам (гл.6).

Нелинейная оптика — раздел оптики, посвященный исследованию явлений, возникающих при взаимодействии с веществом сильных электромагнитных полей, способных изменить оптические свойства системы (гл.21).

Ненаследственная изменчивость — изменчивость, отражающая изменения фенотипа под влиянием внешних условий (аналог «определенной изменчивости» Ч.Дарвина) (гл.19).

Неогеновая система (период) — вторая система кайнозойской эры, начавшаяся 25 млн лет назад и продолжающаяся более 23 млн лет. В этот период произошло образование Кавказа, Альп, Гималаев (гл.16, 23).

Неодарвинизм — эволюционная концепция, сложившаяся в конце прошлого века (основоположник — А.Вейсман) и считающаяся устаревшей, которая увязывала данные цитологии об оплодотворении с эволюцией, чем дополняла представление о естественном отборе. Кроме того, отрицала наследование приобретенных признаков, оценивала роль хромосом в наследственности (гл.20).

Неопределенности принцип — один из фундаментальных принципов квантовой механики, утверждающий, что часть физических величин имеет дополнительную себе (импульс и координата, энергия и время) так, что обе не могут быть измерены одновременно точно, ограничения пропорциональны постоянной Планка (гл.11).

Неотектоника — раздел тектоники, изучающий процессы, возникшие в кайнозойскую эру (гл.16).

Неравновесное состояние — состояния системы, отличающиеся неравномерностью распределения температуры, давления, плотности, концентрации и других параметров в отсутствие внешних воздействий на систему (гл.10).

Нервный импульс — волна возбуждения, распространяющаяся по нервному волокну в ответ на раздражение нейронов, обеспечивающая передачу информации от рецепторов в ЦНС и от нее к органам и мышцам со скоростью от 0,5 до 120 м/с (гл.18).

Номогенез — гипотеза, выдвинутая академиком Л.С.Бергом в 1922 г. в противовес дарвинизму, — эволюция происходит на основе внутренних механизмов типа целесообразности реакции на внешние воздействия, поэтому и происходит усложнение в живой природе (гл.20).

Ноосфера (греч. *noos* — разум + сфера) — в учении В.И.Вернадского — сфера разума, ставшая по своему воздействию на планету сравнимой с геологической силой (гл.23).

Нормальное распределение — распределение случайных величин, называемое Гауссовым.

Нуклеиновые кислоты — высокомолекулярные органические соединения, образованные остатками нуклеотидов (ДНК и РНК), необходимая составная часть всех живых систем, которым принадлежит ведущая роль в биосинтезе белка и передаче наследственных признаков организма (гл.19).

Нуклеотиды — органические соединения, состоящие из азотистого основания, углевода и остатка фосфорной кислоты, входящие в нуклеиновые кислоты и другие активные соединения (гл.19).

Нуклоны — частицы, составляющие ядра атомов — протоны и нейтроны (гл.6).

Облака — скопления водных капель и ледяных кристаллов в атмосфере (гл.22).

Озон — газ синего цвета и характерного запаха, молекулы которого представляются соединением трех атомов кислорода (гл.22).

Онтогенез (греч. *ontos* — существо + генез) — индивидуальное развитие организмов, охватывающее все изменение от зарождения до смерти (гл.17, 20).

Организация — упорядоченность, достигаемая внешними по отношению к системе факторами.

Ортогенез — теория эволюции живой природы, основанная на строго определенном пути развития, основанном на целесообразности. Была предложена в конце XIX века Т.Эймером (гл.17, 20).

Открытые системы — системы, могущие обмениваться с окружающей средой энергией, веществом, импульсом или информацией. Такие системы могут находиться в стационарных состояниях вдали от равновесного и в них могут возникать упорядоченные структуры (гл.9, 21).

Палеоген — самый древний период кайнозойской эры, начавшийся 67 млн лет назад и продолжавшийся 40 млн лет. Он состоит из палеоцена (13 млн лет), эоцена (16 млн лет) и олигоцена (11 млн лет). В течение этого периода широкое

развитие получили млекопитающие; образовались горы (Анды, Кордильеры).

Палеозойская эра (или геологическая эра явной жизни) началась 570 млн лет назад и продолжалась около 250 млн лет. Состоит из периодов: кембрий (70 млн лет), ордовик (60 млн лет), силур (30 млн лет), девон (60 млн лет), карбон (65 млн лет) и пермь (55 млн лет).

Палеолит — древний каменный век, начавшийся 2 млн лет назад и закончившийся 10–12 тыс. лет назад, время существования ископаемого человека (гл.16, 23).

Параллакс — видимое перемещение светил на небесной сфере, обусловленное перемещением наблюдателя в пространстве из-за вращения Земли (суточный параллакс), обращения Земли вокруг Солнца (годовой параллакс), движения солнечной системы в Галактике (вековой параллакс) (гл.3).

Парсек — астрономическая единица длины: звезда, расположенная на расстоянии в 1 пк, имеет годичный параллакс, равный одной угловой секунде (гл.3).

Пептиды — органические вещества, состоящие из остатков аминокислот, соединенных пептидной связью, у которых на одном конце цепи аминокислотной группы, а на другом — карбоксильная группа (COOH) (гл.19).

Плазма — ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов равны (гл.12).

Плазмиды — факторы наследственности, расположенные вне хромосом, представляющие молекулы ДНК, способными к размножению (гл.19).

Планетарная туманность — галактическая туманность размером около 10 тыс. а.е., состоящая из космической пыли и газа, имеющая в центре звезду с очень высокой температурой — источником свечения туманности — наблюдаемая как овальные диски или кольца, и названная так за свой внешний вид (гл.15).

Платформа геологическая — одна из глубинных структур земной коры, характеризующаяся малой интенсивностью тектонических движений, магматической деятельностью и плоским рельефом (гл.16).

Плейстоцен — часть четвертичного периода, характеризующаяся общим похолоданием климата Земли и возникновением оледенений в средних широтах. Продолжался от 3 млн до 20 тыс. лет назад (гл.16, 23).

Поверхностное натяжение — работа образования единицы площади поверхности раздела двух фаз при постоянной температуре.

Пограничный слой — тонкая область течения вязкой жидкости (газа), образующаяся у поверхности обтекаемого ею тела или на границе раздела двух потоков с разными скоростями, температурами или химическим составом. В слое имеет место скачкообразное изменение характеристик потока. Для атмосферы он имеет толщину около 1000 м, и его свойства определяются поверхностью Земли (гл.16).

Погрешности измерений — отклонения результатов измерений от истинных значений измеряемой величины, которые бывают систематическими и случайными.

Подъемная сила — составляющая полной силы давления среды на движущееся в ней тело, направленная перпендикулярно скорости тела.

Поле физическое — особая форма материи, создаваемая частицами (гравитационное, электромагнитное, поле ядерных сил...) и переносящая взаимодействия между ними; система с бесконечным числом степеней свободы (гл.2, 7).

Полупроводники — вещества, электропроводность которых сильно зависящая от дефектов структуры, растет с температурой, но находится по величине между электропроводностью металлов и диэлектриков. Носителями тока являются электроны проводимости и «дырки», причем их концентрации равны (гл.12).

Поляризация света — одно из фундаментальных свойств света, упорядоченность в ориентации векторов напряженностей электрического и магнитного полей световой волны в плоскости, перпендикулярной направлению света, объяснение явления О.Френелем требовало поперечности световых волн (гл.10).

Популяция (фр. *populus* — население) — совокупность особей одного вида, длительно населяющая некоторую территорию, относительно обособленная от других и обладающая определенным генофондом. Рассматривается как элементарная единица эволюции (гл.17, 19).

Порядок (упорядоченность) — исходное понятие теории систем, означающее определенное расположение элементов или их последовательность во времени (гл.21).

Прецессия (лат. *praecessio* — движение впереди) движение оси вращения твердого тела (гироскопа, к примеру), при котором она описывает круговую коническую поверхность. Земная ось испытывает прецессию с периодом около 26 тыс. лет, вследствие чего точка весеннего равноденствия смещается за год на 50,24 с. Кроме того, земная ось испытывает нутацию — колебания оси вращения из-за влияния притяжения Солнца и Луны (гл.4).

Продольная волна — волны, в которой колебания происходят в направлении распространения (пример — волны сгущения и разрежения в воздухе: звук) (гл.5).

Прокариоты (лат. *pro* — вперед + греч. *καρυον* — ядро) — организмы, лишенные оформленного ядра (вирусы, бактерии, сине-зеленые водоросли). Наследственная информация передается через ДНК (гл.18).

Протерозой (греч. *proteros* — более ранний и *zoe* — жизнь) — эра зарождения жизни, продолжающаяся от 2,6 млрд лет до 570 млн лет назад.

Протон (греч. *protos* — первый) — стабильная элементарная частица с массой в 1840 масс электрона (10^{-24} г) и спином 1/2, которая вместе с нейтроном образует атомное ядро. Относящееся к барионам ядро легкого изотопа водорода (гл.60).

Протуберанцы (лат. *protuberans* — взрываюсь) — плазменные образования размером до сотен тыс. км в солнечной короне, имеющие большую плотность. Поскольку их температура ниже чем плазма короны, они выглядят на фоне диска солнца темными, а на краю яркими (гл.10, 14).

Пульсары — пульсирующие источники радиоизлучения в космосе, открытые группой Э.Хьюиша в 1967 г., которые пульсируют с высокой точностью с периодом от нескольких долей секунды до секунд в диапазоне от метровых до сантиметровых волн. Они отождествляются с быстро вращающимися нейтронными звездами, имеющими ак-

тивную область, генерирующую излучение в узком конусе, направленном в сторону наблюдателя через промежуток времени, равный периоду вращения звезды. Пульсары, излучающие в рентгеновском или гамма-диапазоне спектра, имеют периоды от нескольких до сотен секунд и входят в системы двойных звезд. Считается, что источником их излучения является гравитационная энергия, выделяющаяся при аккреции на нейтронную звезду или черную дыру вещества, перетекающего с соседней нормальной звезды (гл.14, 15).

Редукция — сведение сложного к простому, составного — к элементарному; в биологии — уменьшение размеров органа, упрощение его строения (гл.1).

Резонансы — резонансные частицы, адроны, которые могут распадаться за счет сильного взаимодействия и потому имеют очень малый срок жизни порядка 10^{-24} (гл.6).

Рекомбинация — процесс, обратный ионизации, состоящий в захвате ионом свободного электрона (гл.6).

Реликтовое излучение — космическое электромагнитное излучение, сохранившееся от ранних стадий эволюции Вселенной (гл.5, 15).

Репликация ДНК — самоудвоение молекул ДНК. Матричная молекула ДНК, состоящая из двух скрученных молекулярных цепочек, раскручивается с образованием двух молекулярных нитей, каждая из которых служит матрицей для синтеза новой нити, комплементарной к ней (гл.19).

Рибосомы — немембранные клеточные органоиды, являющиеся обязательными структурными компонентами цитоплазмы клеток растений и животных, осуществляющие синтез белка из аминокислот (гл.18, 19).

Самоорганизация — процесс взаимодействия элементов, в результате которого происходит возникновение нового порядка или структуры в системе (гл.13, 21).

Самофокусировка — самопроизвольная фокусировка мощного лазерного луча при распространении в среде из-за нелинейной зависимости коэффициента преломления от напряженности поля световой волны (гл.10, 21).

Сапротрофы (греч. *sapros* — гнилой + *trophe* — питание) — организмы (бактерии, грибы и др.), питающиеся остатками растений и животных и превращающие органические вещества в неорганические и тем самым участвующие в круговороте веществ (гл.22).

Сверхновые звезды — вспыхивающие внезапно звезды, мощность которых во время вспышки превышает во много тысяч раз мощность вспышки новой звезды. Вызывает вспышки гравитационный коллапс, при этом центральная часть становится нейтронной звездой (пульсаром), вещество внешних слоев выбрасывается со скоростью в несколько тысяч км/с и образует волокнистую туманность (типа Крабовидной) (гл.14, 15).

Светимости классы — разделение звезд по светимости (интервал 20 звездных величин) на классы: сверхгиганты, яркие и слабые гиганты, субгиганты, карлики, субкарлики и белые карлики. Светимость — полная энергия, излучаемая источником в единицу времени (гл.14).

Световой год — единица расстояния, равная пути, который проходит свет за год. 1 св. г. = 0,3 пк (гл.3, 14).

Селекция (лат. *selectio* — выбор, отбор) — раздел агрономии и зоотехники, изучающий методы выведения новых и улучшения существующих сортов растений, пород животных путем применения научных методов отбора (гл.17, 20).

Сибирская платформа — докембрийская платформа, расположенная между Енисеем, Леной и озером Байкал (гл.16).

Синтез (греч. *synthesis* — соединение, сочетание) — в химии — получение сложных соединений из более простых. В научном познании — метод исследования предмета или явления как единого целого (гл.1).

Система — совокупность взаимодействующих объектов, образующих определенную целостность, в которой в результате взаимодействия возникают новые интегративные свойства целого, отсутствующие у ее объектов или частей (гл.1).

Системотехника — научно-техническая дисциплина, изучающая проблемы анализа и синтеза систем.

Слабое взаимодействие — очень короткодействующее взаимодействие между микрочастицами, превращающее одни элементарные частицы в другие, переносимое с помощью так называемых векторных бозонов. Проявляется при взрыве сверхновых звезд (гл.6).

Солитон — структурно устойчивая уединенная волна, распространяющаяся в нелинейной среде (гл.21).

Спектр — совокупность значений, которые может принимать физическая величина. Может быть непрерывным и дискретным (гл.10).

Спин (англ. *spin* — вращение) — собственный момент количества движения микрочастицы, не связанный с движением ее как целое. Измеряется в единицах — постоянной планка и может быть целым (0, 1, 2...) — такие частицы называют бозонами (фотон...) — или полуцелым (1/2, 3/2...) — такие частицы называют фермионами (протон, нейтрон, электрон...) (гл.6).

Стохастический — случайный (гл.21).

Странность — квантовое число, характеризующее адроны, сохраняется в электромагнитном и сильном взаимодействиях, но не сохраняется в слабом.

Таксон — подразделение биологической систематики.

Тектонические циклы — определенная последовательность тектонических процессов, при которых геосинклиналь превращается в платформу, охватывающая интервалы геологического времени в галактический год (120–250 млн лет) и завершающаяся эпохами горообразования (гл.16).

Телеология (греч. *telos* — цель + логия) — воззрение, считающее, что всякое развитие в мире служит осуществлением заранее predeterminedных целей.

Термодинамика — раздел физики, изучающий общие свойства макросистем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями (гл.9).

Термоядерные реакции — реакции слияния легких ядер в более тяжелые, происходящие при высоких темпе-

ратурах и сопровождающиеся выделением огромной энергии. Являются основным источником энергии звезд (гл.13, 14).

Толерантность — иммунологическое состояние организма при неспособности синтеза антител к ответ на введение антигена (гл.19).

Триас — первый период мезозойской эры, начавшийся 230 млн лет назад и длившийся около 35 млн лет. Характеризуется расцветом пресмыкающихся и папоротниковых растений.

Триггерный механизм — спусковой механизм, внезапно изменяющий скачком состояние любой физической биологической или химической системы, развивающейся самопроизвольно или под внешним воздействием (гл.21).

Трофические связи — пищевые связи в экосистемах (гл.22).

Туманности — внутригалактические облака разреженных газов и пыли. Бывают планетарные и диффузные (гл.14).

Фаготрофы, фаги, бактериальные вирусы (греч. *phagos* — пожирающий + *trophe* — питание) — организмы, питающиеся другими организмами (гл.17, 18).

Фазовое пространство — многомерное пространство, на осях которого откладываются значения обобщенных координат и импульсов системы, а состояние статистической системы изображается точкой, изменение состояния — траекторией точки в фазовом пространстве (гл.8, 21).

Фазовые переходы — фазовые превращения, при которых скачком меняются параметры системы (теплоемкость, сжимаемость, коэффициент теплового расширения), тогда как остаются постоянными энтропия, плотность и термодинамические потенциалы (переходы второго рода: переход жидкого He в сверхтекучее состояние). Если наоборот — переходы первого рода: испарение, плавление, конденсация, кристаллизация (гл.13).

Фазовые превращения — переходы между фазами вещества (гл.13).

Фанерозой (греч. *phaneros* — явный + *zoe* — жизнь) — крупнейший этап (570 млн лет) геологической истории, подразделяемый на палеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую эры (гл.16, 23).

Фенотип — совокупность признаков организма (внешних и внутренних), сформировавшихся в процессе его индивидуального развития (гл.17).

Ферменты — биологические катализаторы, присутствующие во всех живых клетках и осуществляющие превращения веществ в организме, направляя и регулируя обмен веществ (гл.19).

Филогенез (греч. *phylon* — племя + генез) — историческое развитие организмов, различных типов, классов, отрядов (таксонов) (гл.17, 19).

Флуктуации — случайные отклонения системы от некоторого среднего положения (гл.8).

Фотон — квант электромагнитного поля, переносчик электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами, нейтральная элементарная частица с нулевой массой покоя и спином, равным 1 (гл.6, 10).

Фотоэффект — освобождение электронов вещества при поглощении им электромагнитного излучения (фотонов), исследован А.Столетовым, объяснен А.Эйнштейном в 1905 г. (гл.10).

Хиральность — свойство молекулы не совмещаться со своим отражением в идеальном плоском зеркале, необходимое условие оптической активности молекул (гл.12, 13).

Хондриты — каменные метеориты (гл.16).

Хромосома — часть ядра клетки, состоящая из белка и нуклеиновых кислот, в которой заключена наследственная информация об организме (гл.17, 18).

Цепные реакции — сложные реакции, в которых промежуточные активные продукты могут образовывать большое число превращений (цепь) исходного вещества. В реакциях горения — это свободные радикалы, в ядерных реакциях — нейтроны (гл.13).

Цитогенетика — отрасль генетики, изучающая закономерности наследственности и изменчивости на уровне клетки и субклеточных структур (гл.17).

Цитоплазма — в клетке живая коллоидная система с упорядоченной субмикроскопической структурой, содержит все органоиды и обуславливает жизнедеятельность клетки в целом (гл.17, 18).

Четвертичный период — последний период истории Земли длительностью от 700 тыс. до 2–3 млн лет, подразделяемый по климату и биофакторам на плейстоцен и голоцен. Отмечен рядом оледенений и становлением человека (антропогенез) (гл.16, 23).

Четность — квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции при ряде дискретных преобразований (пространственная, зарядовая и комбинированная) (гл.6).

Экзосфера — внешний слой атмосферы, начинающийся с нескольких сотен км, из которого легкие атомы (водорода) могут улетать (рассеиваться) в космос (гл.16).

Эклиптика — большой круг небесной сферы, по которому проходит годичный путь Солнца, наклоненный к плоскости небесного экватора на 23 градуса 27 минут (гл.3, 16).

Экосистемы — единый природный комплекс, образованный живыми организмами и средой их обитания, в котором живые и косные компоненты связаны между собой обменом энергией и веществом. Термин введен английским фитоценологом А.Тенсли в 1935 г. (гл.22).

Экосфера — совокупность всех экосистем (гл.22).

Экситон — квазичастица, отвечающая за электронное возбуждение в твердом теле, которое не связано с переносом заряда или массы (гл.6).

Электрический ток — упорядоченное движение заряженных частиц (электронов, ионов и пр.).

Электролиз — совокупность процессов окисления и восстановления, происходящих на электродах, опущенных в электролит, при прохождении электрического тока.

Электромагнитное взаимодействие — фундаментальное взаимодействие, в котором участвуют заряженные

частицы; переносится с помощью электромагнитного поля или его квантами — фотонами. Является дальнедействующим и определяющим большинство сил (трения, упругости, химической связи и пр.).

Электромагнитное поле — форма материи, осуществляющая взаимодействие между заряженными частицами. Характеризуется напряженностями электрического и магнитного полей, распространяется в вакууме с максимальной возможной скоростью C .

Электрослабое взаимодействие — единая теория электромагнитного и слабого взаимодействий лептонов и кварков.

Элементарные частицы — мельчайшие из известных частиц материи, которые способны взаимно превращаться и потому не являются «элементарными кирпичиками мироздания» (по Демокриту); вместе с античастицами их уже около 300, и потому они имеют собственную классификацию (гл.6).

Эндогенные процессы — геологические процессы, обусловленные энергией недр Земли.

Энергия — количественная мера различных форм движения материи (гл.2, 4, 9).

Энтелехия — в философии Аристотеля целенаправленное активное начало, превращающее возможность в действительность (гл.2).

Энтропия — (превращение) — функция состояния системы, изменение которой в равновесных процессах определяется отношением количества теплоты, сообщенного системе или отведенного от нее, к термодинамической температуре системы. В статистической физике — мера вероятности пребывания системы в данном состоянии (принцип Больцмана) (гл.9).

Эпигенез — учение о зарождении организмов, согласно которому, качественная структура нового организма не предопределена зародышем, а формируется по мере его роста (гл.17, 20).

Эпицикл — вспомогательная окружность в геоцентрической системе К.Птолемея, помогающая объяснить сложное движение планет. Считалось, что планета двигалась по эпициклу, центр которого двигался еще по одной вспомогательной окружности — деференту, центр которого практически совпадал с центром Земли (гл.3, 4).

Эукариоты (греч. *eu* — хорошо + *karyon* — ядро) — все организмы, клетки которых содержат оформленное ядро, отделенное оболочкой от цитоплазмы (гл. 20).

Юрский период — средняя система мезозойской эры, начавшаяся 185 млн лет назад и продолжавшаяся 53 млн лет. В это время развиты рыбы, пресмыкающиеся достигли гигантских размеров, млекопитающие — примитивны (гл.16, 23).

Ядро (атомное) — положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена почти вся его масса; состоит из нуклонов (протонов и нейтронов); в биологической клетке ядро — самый большой органоид, обеспечивающий важнейшие метаболические и генетические функции (гл.18).

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис.1. Модель научной теории, представленная в виде многослойной оболочки: снаружи — непрерывно расширяющаяся сфера предсказаний, внутри — фундаментальные принципы

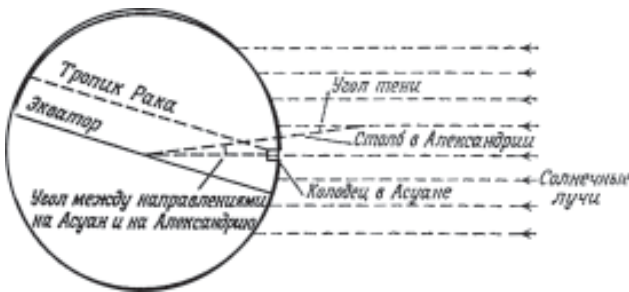


Рис.2. Геометрическое построение, которым пользовался Эратосфен для измерения длины окружности Земли

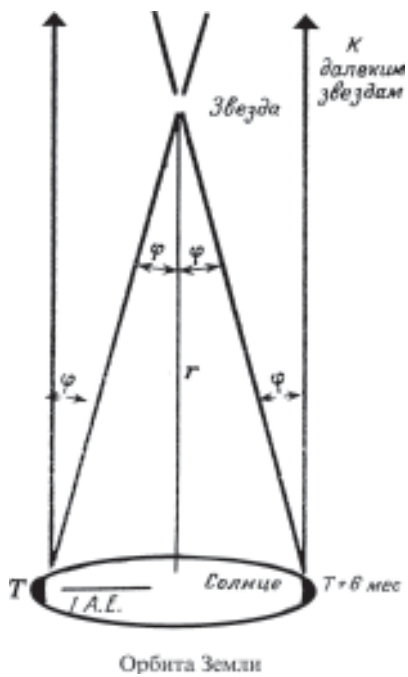


Рис.3. Метод параллакса для определения расстояния до звезды

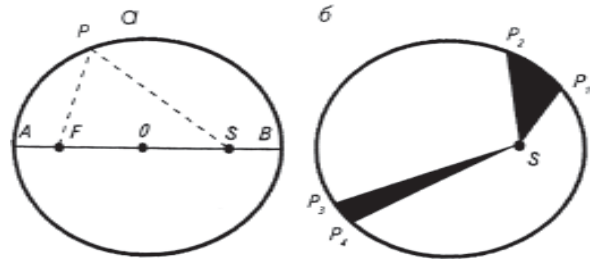


Рис.4. Схема, поясняющая два закона Кеплера: а — первый закон; б — закон площадей

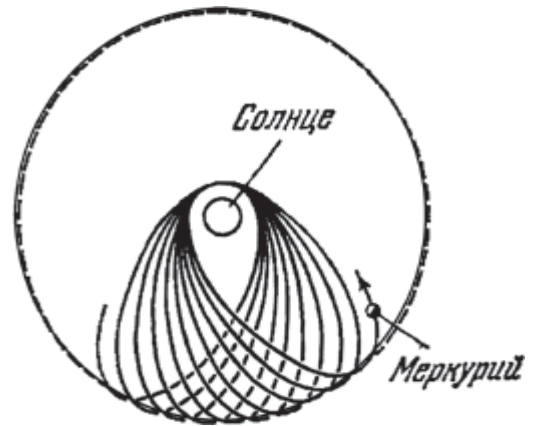


Рис.5. Схема вращения орбиты Меркурия, объясняемого общей теорией относительности

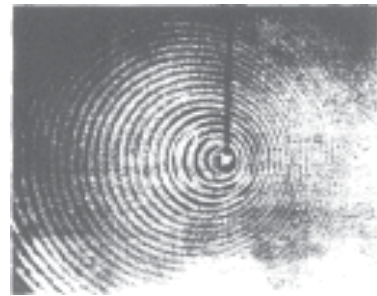


Рис.6. Фотография волн, созданных на поверхности воды движущимся вправо источником

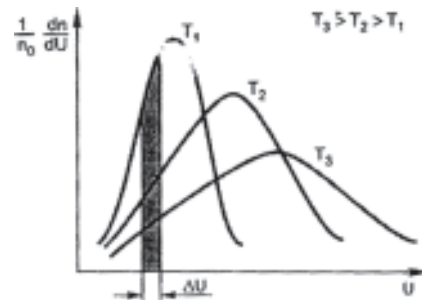


Рис.7. Распределение молекул по скоростям при разных температурах

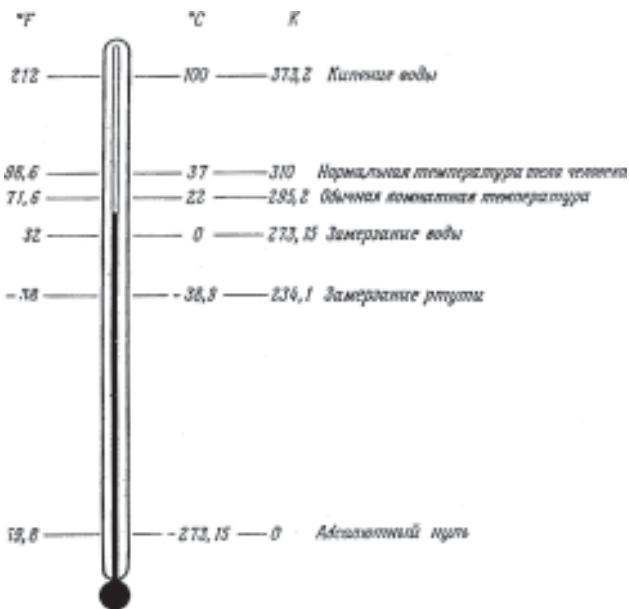


Рис.8. Сравнение температурных шкал Фаренгейта (°F), Цельсия (°C) и Кельвина (K)

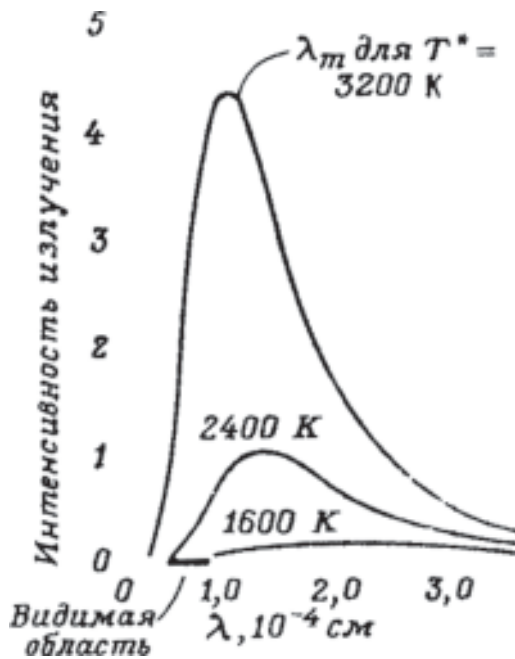


Рис.12. Спектры излучения абсолютно черного тела при нескольких различных температурах

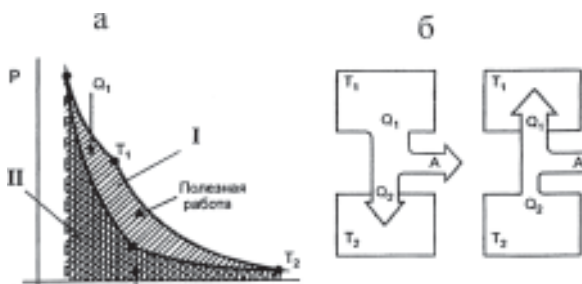


Рис.9. Схема работы тепловой машины: а — тепловая машина; б — рефрижератор.

На графике: площадь, заштрихованная наклонными линиями, — работа, совершенная расширяющимся газом, вертикальными линиями — работа, совершенная над газом

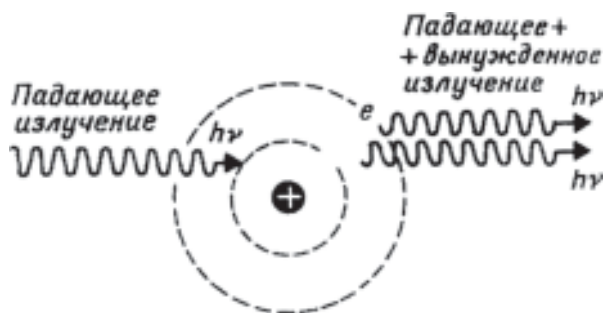


Рис.13. Вынужденное излучение

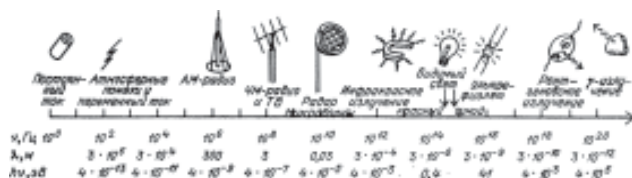


Рис.10. Спектр электромагнитных волн

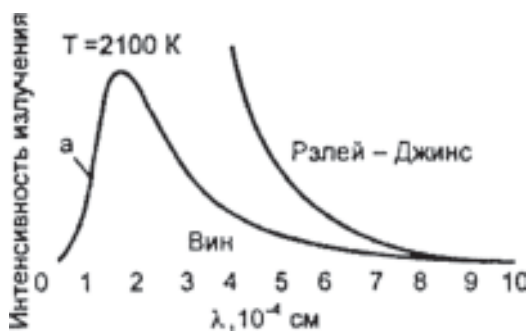


Рис.11. Ультрафиолетовая катастрофа в теории теплового излучения: сравнение полученного в экспериментах спектра излучения с результатами теории

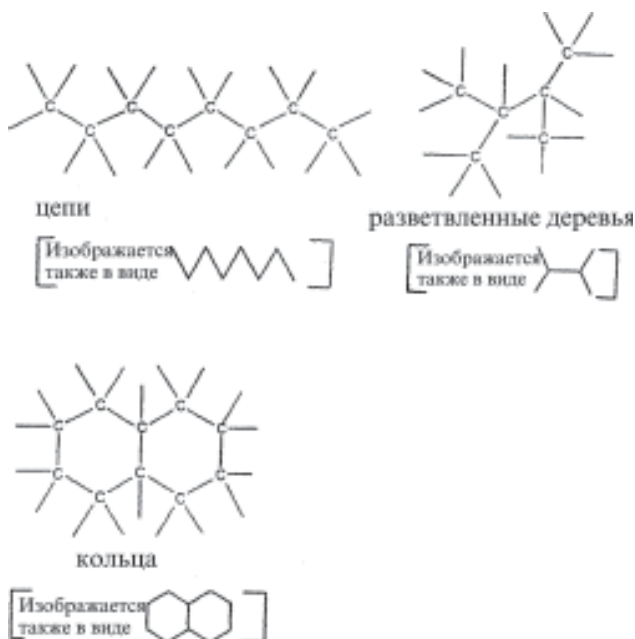


Рис.14. Схема соединения атомов углерода друг с другом в органических молекулах

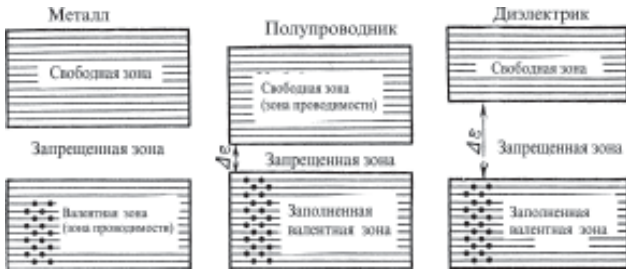


Рис.15. Ширина запрещенной зоны, определяющая электрические свойства кристалла

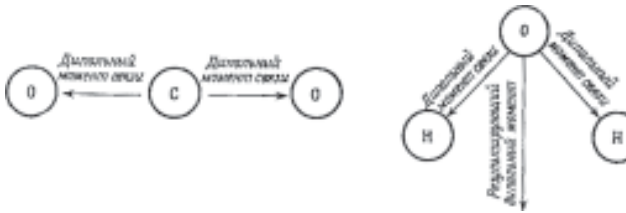


Рис.16. Строение молекулы воды: в линейной молекуле двуокиси углерода (слева) дипольные моменты связей взаимно компенсируются; в нелинейной молекуле H₂O (справа) дипольные моменты связей складываются и образуют результирующий дипольный момент молекулы

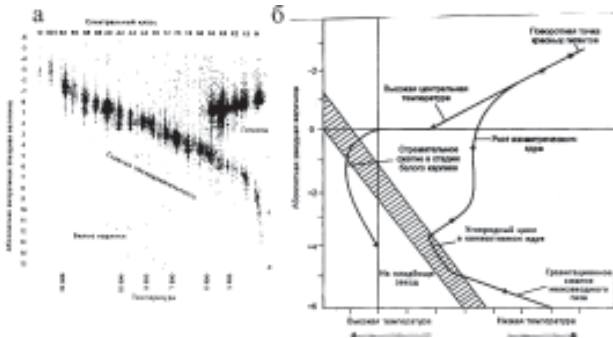


Рис.17. Распределение физических характеристик звезд и звездной эволюции: а — схема возможного эволюционного трека звезды с массой несколько больше солнечной; б — диаграмма Герцшпрунга-Ресселя («спектр — светимость»)

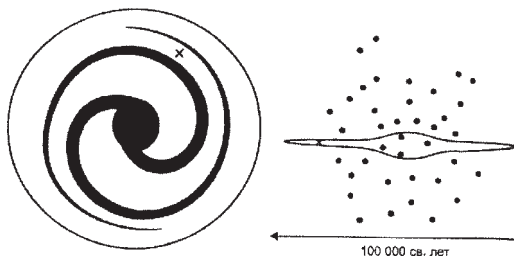


Рис.18. Схема положения Солнечной системы в Галактике (отмечено крестиком): а — вид сверху; б — вид сбоку

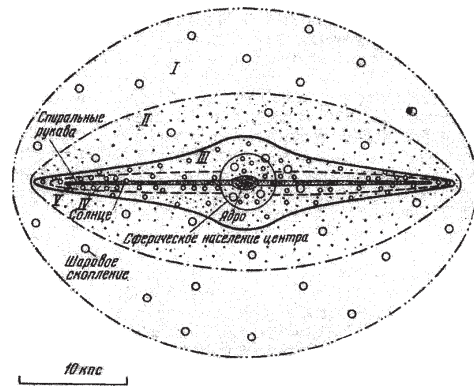


Рис.19. Подсистемы Галактики: I — сферическая подсистема (гало); II — промежуточная сферическая подсистема; III — диск; IV — старая плоская подсистема; V — молодая плоская подсистема

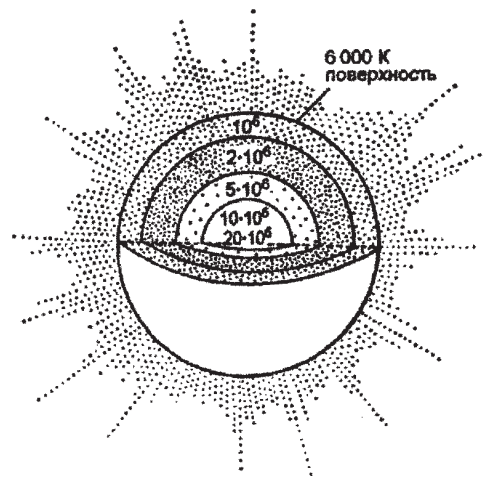


Рис.20. Схема внутреннего строения Солнца

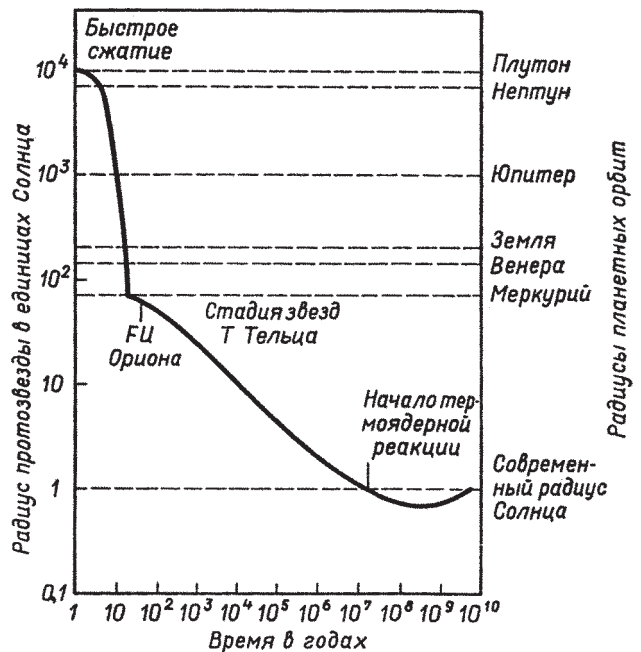


Рис.21. Схема изменения размеров Солнца в процессе эволюции

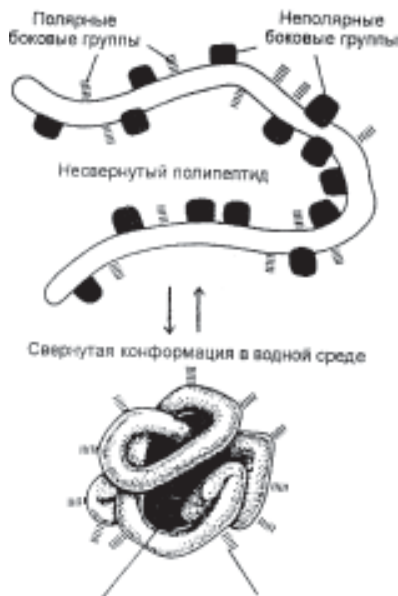


Рис.28. Структуры белка. Схематически показано, как белок свертывается в глобулу: полярные боковые группы аминокислот стремятся расположиться на наружной поверхности белка, где могут взаимодействовать с водой; неполярные боковые группы аминокислот расположены внутри, где образуют «спрятанное» от воды гидрофобное «ядро»



Рис.29. Репликация ДНК



Рис.30. Схема, поясняющая функции процесса дыхания: главные функции — высвобождение энергии, используемой в процессах метаболизма, и образование строительных блоков, из которых в клетке синтезируются многие другие соединения

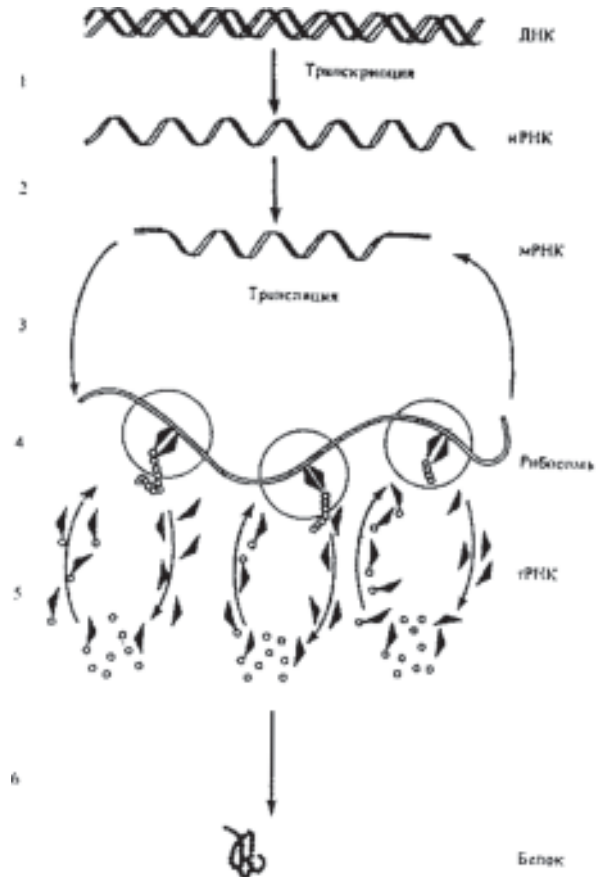


Рис.31. Схема биосинтеза белка: а — синтез иРНК (транскрипция); б, в — иРНК проходит через поры ядерной мембраны к рибосомам (трансляция); г — аминокислоты, соединяясь в определенной последовательности на РНК, образуют фермент; д, е — образование белка

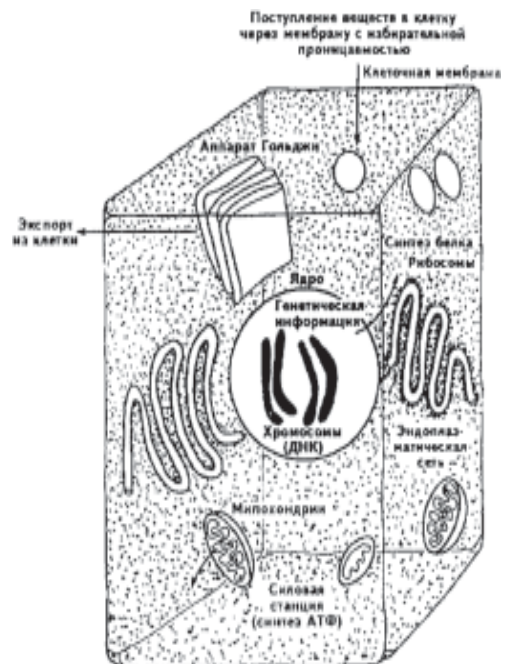


Рис.32. Схема деятельности основных структурных компонентов клетки

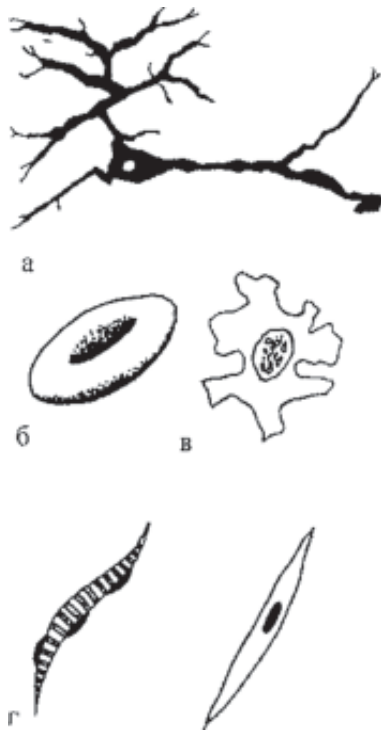


Рис.33. Специализация различных клеток: а — нейрон (передача информации); б — эритроциты (перенос O_2 и CO_2); в — лейкоциты (защитная функция); г — мышечные клетки, поперечно-полосатые и гладкие (сокращение)

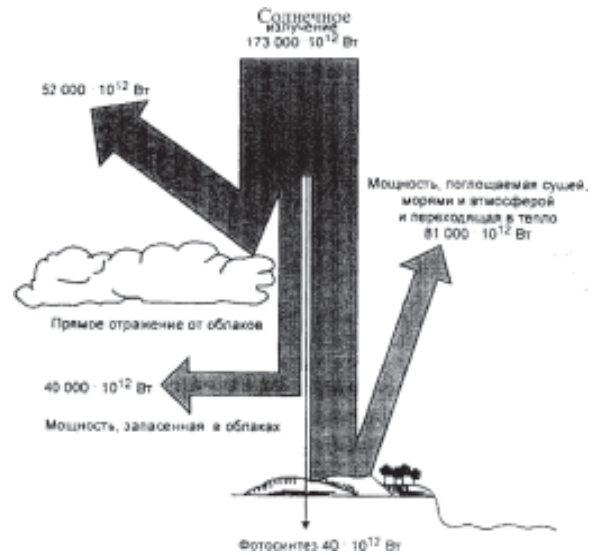


Рис.36. Распределение мощности солнечного излучения, падающего на Землю (толщина стрелок соответствует количеству поглощенной, отраженной или запасенной энергии за 1 с)

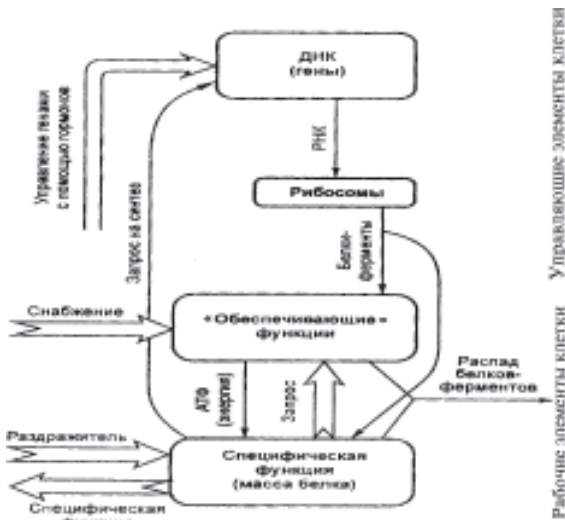


Рис.34. Схема управляющих механизмов клетки

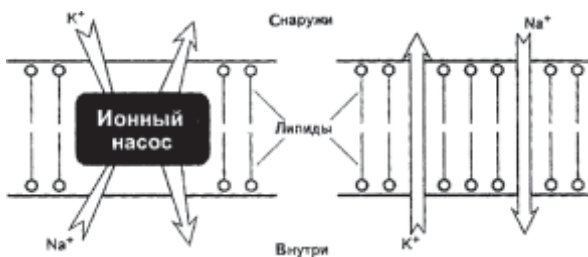


Рис.35. Схема работы ионного насоса через клеточные мембраны



Рис.37. Продукты световых и темновых реакций фотосинтеза

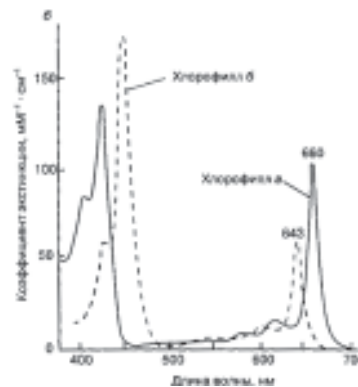
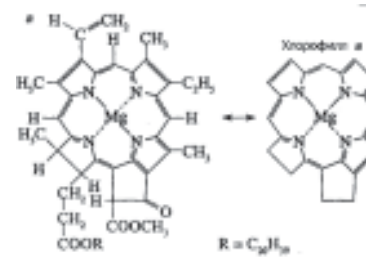


Рис.38. Характеристики хлорофилла: а — структурная химическая формула; б — спектр поглощения (зависимость поглощения от длины волны)

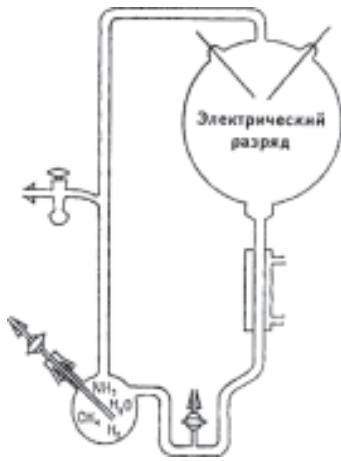


Рис.39. Аппарат Миллера, используемый для синтеза органических веществ из смеси метана, аммиака и воды при искровом разряде: разряд или ультрафиолетовое излучение обеспечивает энергией и стимулирует химические реакции, которые могли бы привести к возникновению жизни на Земле

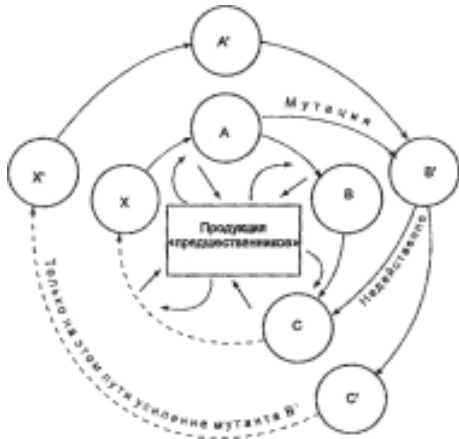


Рис.40. Каталитический цикл (по Эйгену)

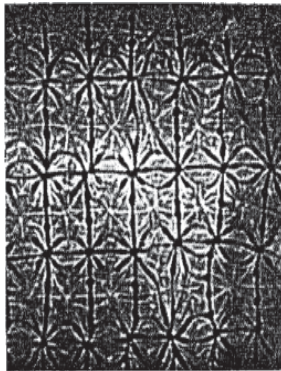


Рис.41. Образование структур в движении жидкости при больших числах Re

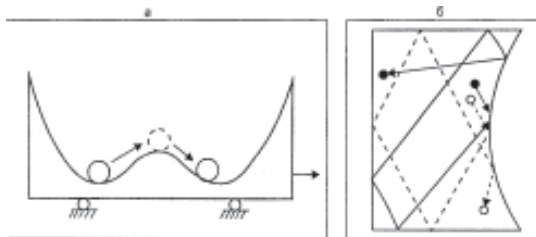


Рис.42. Пример хаотического движения: а — шарик в потенциальных ямах; б — шарик на плоскости со стенками (бильярд Синая)

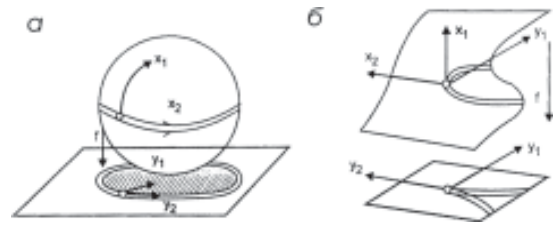


Рис.43. Примеры проектирования поверхностей на плоскость: а — складка проектирования сферы на плоскость; б — сборка проектирования поверхности на плоскость

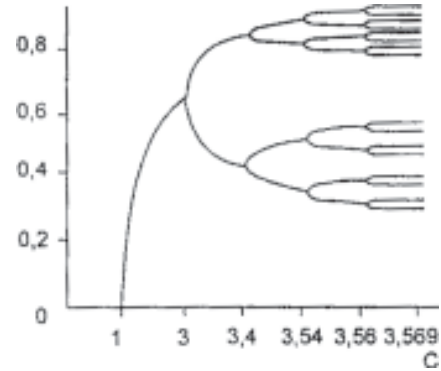


Рис.44. Зависимость стационарной численности популяции от параметра скорости роста

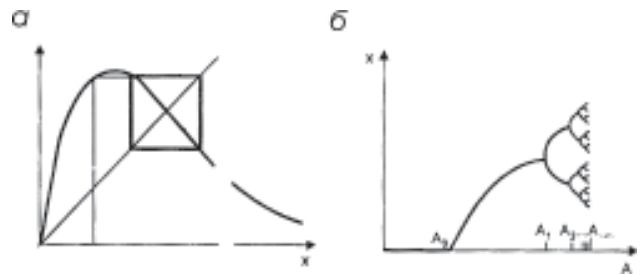


Рис.45. К законам Фейгенбаума: а — колебания численности популяции в простейшей мальтузианской модели с учетом конкуренции; б — каскад удвоений периода

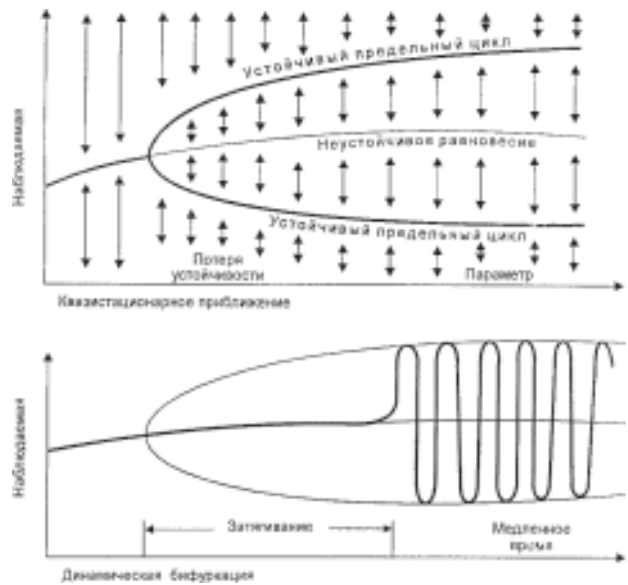


Рис.46. Затягивание потери устойчивости при динамической бифуркации

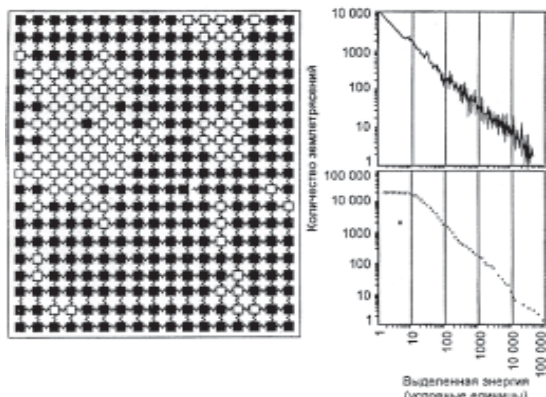


Рис.47. Модель землетрясения: справа сверху — график результатов расчетов модельных землетрясений; справа внизу — характеристики реальных землетрясений

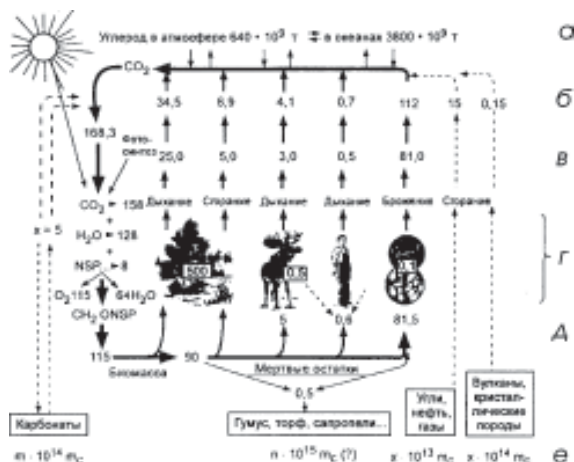


Рис.48. Круговорот органических веществ в биосфере (в млрд т) и фотосинтез:
 а — количество С в составе углекислоты в атмосфере и гидросфере; б — количество CO₂, выделяемое в атмосферу; в — количество окисляемых органических веществ; г — группы организмов и биомасса организмов каждой группы; д — вес пищи и субстратов, потребляемых организмами; е — количество С в компонентах литосферы; т_с — масса чистого углерода

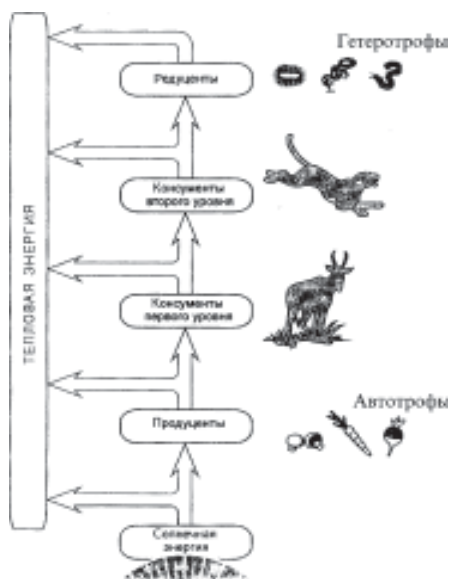


Рис.49. Передача энергии по трофическим уровням

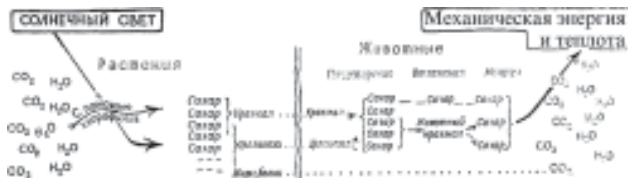


Рис.50. Схематическое изображение биотического цикла

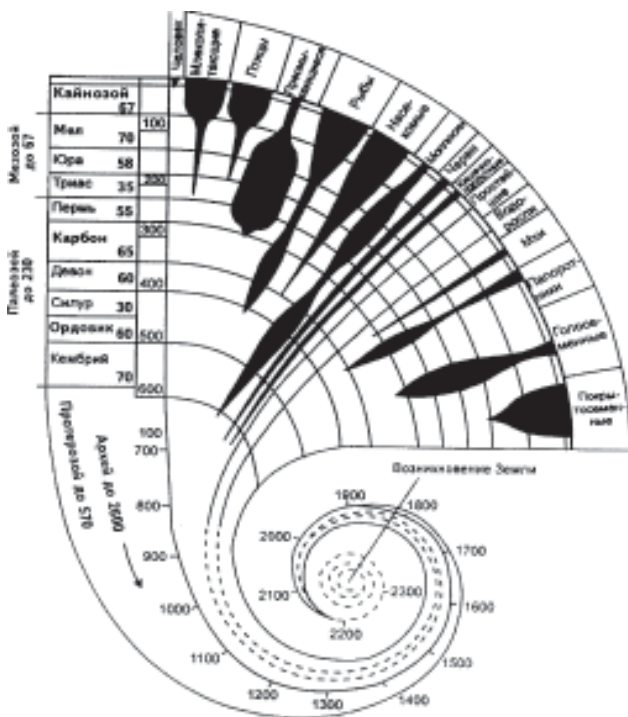


Рис.51. Биогеохимическая связь эволюции живого и планеты Земля, представленная в виде «спирали времени»: слева отмечены периоды и указана их длительность (в млн лет), рядом шкала времени от возникновения Земли до настоящего времени через эры катархея (5000–2600), протерозоя (2600–570), палеозоя (570–230), мезозоя (230–67), кайнозоя (67 до н.э.); справа — очередность появления на Земле различных групп организмов

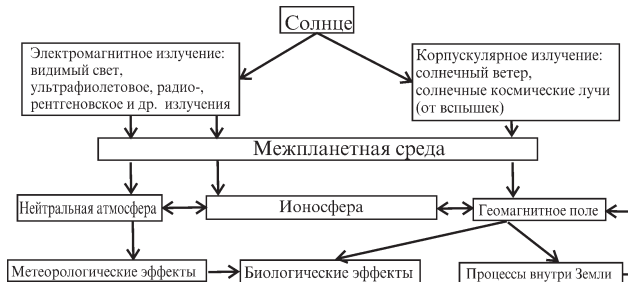


Рис.52. Схема солнечно-земных связей

СОДЕРЖАНИЕ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

Раздел 1. Организационно-методический	3
Раздел 2. Содержание дисциплины	5
Раздел 3. Учебно-методическое обеспечение	17

ТЕКСТЫ ЛЕКЦИЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

Глава 1. Логика познания и методология естественных наук	22
Глава 2. Развитие науки, панорама естествознания и тенденции развития	30
Глава 3. Концепции пространства–времени и материи. Фундаментальные взаимодействия	37
Глава 4. Мироздание в свете механистической парадигмы. Основные модели	47
Глава 5. Континуальная концепция описания природы	56
Глава 6. Концепция атомизма. Структурные формы организации материи в микромире	64
Глава 7. Мироздание в свете классической электромагнитной парадигмы	74
Глава 8. Динамические и статистические закономерности макромира	85
Глава 9. Концепции классической термодинамики	92
Глава 10. Корпускулярно-волновой дуализм материи	103
Глава 11. Концепции взаимодействий и структур в микромире	112
Глава 12. Концепции строения вещества (от микромира к макромиру)	121
Глава 13. Концепции химических процессов и возможности управления	131
Глава 14. Концепции строения мегамира	140
Глава 15. Эволюционные процессы в мегамире и зарождение структур	151
Глава 16. Концепции геологической и геохимической истории земли	157
Глава 17. Основные формы, свойства и уровни организации живой материи	168
Глава 18. Молекулярно-генетический уровень организации живой материи	174
Глава 19. Онтогенетический уровень организации жизни	187
Глава 20. Концепции эволюционной биологии	195
Глава 21. Концепции самоорганизации и моделирования процессов в сложных системах	208
Глава 22. Концепции строения и функционирования на биосферном уровне организации живой материи	223
Глава 23. Концепция коэволюции	233
Материалы для тестовой системы	240
Методические указания к выполнению контрольных работ	242
Краткий словарь терминов	247
Приложение	263

ДУБНИЦЕВА
Татьяна Яковлевна

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Учебно-методический комплекс
для всех специальностей

Корректор *Г.А.Есева*

Подписано в печать 01.09.2008. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Формат 60x84/8. Усл. п. л. 34. Доп. тираж 900 экз.

Новосибирский государственный университет экономики и управления
630099, Новосибирск, ул. Каменская, 56