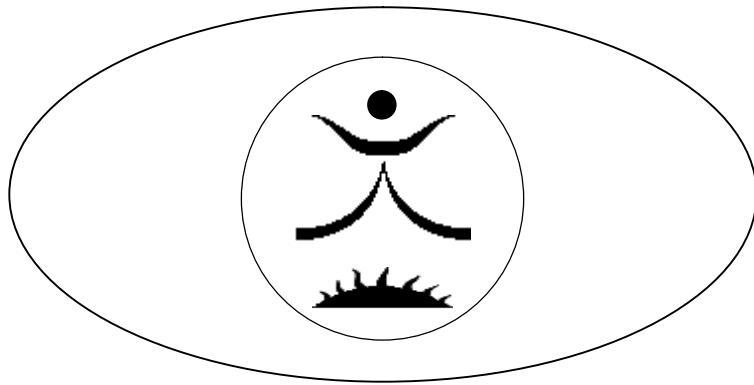


В.П.Романов

**КОНЦЕПЦИИ
СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

КУРС ЛЕКЦИЙ



Москва 2004

Министерство образования Российской Федерации
Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В.П. Романов

Концепции современного естествознания

Курс лекций

Утверждено редакционно-издательским советом института
в качестве учебного пособия

Москва 2004

ББК 20я73
Р69
УДК 50(076.1)

Рецензенты: докт. физ.-мат. наук, проф. *В.Н. Дацко*;
докт. физ.-мат. наук, проф. *А.Ф. Попков*

Романов В.П.

Р69 Концепции современного естествознания. Курс лекций. – М.: МИЭТ, 2004. – 272 с.: ил.

ISBN 5-7256-0371-7

В учебном пособии на концептуальном уровне рассмотрены достижения и тенденции развития современного естествознания. Это позволило интегрировать разрозненные знания о неживой и живой природе и человеческом обществе в целостную естественнонаучную картину мира. Большое внимание уделено мировоззренческим и методологическим аспектам естественнонаучного знания.

Книга предназначена для студентов высших учебных заведений. Она может быть интересна и полезна преподавателям, аспирантам и всем интересующимся проблемами естествознания.

Учебное пособие

Романов Валерий Павлович

Концепции современного естествознания. Курс лекций.

Текст печатается в авторской редакции.

Компьютерная верстка *В.П. Романов* и *М.А. Соколов*.

Подписано в печать с оригинал-макета 20.02.04. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 15,78. Уч.-изд. л. 13,6. Тираж 500 экз. Заказ 73.

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.
124498, Москва, МИЭТ.

ISBN 5-7256-0371-7

© Романов В.П., 2004
© МИЭТ, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время вследствие процесса дифференциации научного знания увеличивается количество научных дисциплин и сейчас их насчитывается уже несколько тысяч. Это ведёт к тому, что специалистам, решающим те или иные вопросы в рамках конкретных наук, становится всё труднее следить за достижениями не только науки в целом, но даже в смежных областях конкретных наук. В связи с этим большое значение приобретает систематизация научного знания на концептуальном уровне, позволяющем анализировать новые знания, добываемые в различных отраслях науки, на основе наиболее важных теоретических положений, идей, алгоритмов и т. п.

Создание такой дисциплины как «Концепции современной науки» будет способствовать формированию представлений о том, как устроен окружающий нас мир в целом, какие фундаментальные законы действуют в этом мире, как зародилась и развивается жизнь, что представляет собой человек и каково его предназначение, что такое разум и дух, как взаимодействуют материя, разум и дух и т. п. Первым шагом на пути в этом направлении является интенсивно идущий сейчас процесс формирования основ курса «Концепции современного естествознания». Это связано с введением данного курса в учебные программы социальных и гуманитарных специальностей высших учебных заведений России.

Предлагаемый курс лекций по дисциплине «Концепции современного естествознания» соответствует «Государственному образовательному стандарту высшего

профессионального образования» по циклу «Общие математические и естественнонаучные дисциплины» для подготовки бакалавров и дипломированных специалистов по направлениям «Лингвистика и межкультурная коммуникация», «Управление качеством», «Менеджмент», «Экономика», «Юриспруденция» и др.

В данном учебном пособии на концептуальном уровне рассмотрены достижения и тенденции развития современного естествознания. Это позволило интегрировать разрозненные знания о неживой и живой природе и человеческом обществе в целостную естественнонаучную картину мира. Большое внимание уделено мировоззренческим и методологическим аспектам естественнонаучного знания. В конце каждой главы приведён список литературы, использованной при её написании.

Автор благодарен проф. А.А.Абрамову, проф. Н.И.Боргардту, доц. А.С.Овчинникову и всем коллегам по кафедре общей физики МГИЭТ, чьи замечания и советы способствовали улучшению содержания данной книги.

Г Л А В А 1

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НАУКЕ И ЕЁ МЕТОДОЛОГИИ

Вопросы о том, что такое наука, как она объясняет окружающий человека мир, как с её помощью решаются важные для выживания человечества проблемы производства продуктов питания, энергетики, транспорта, средств коммуникаций, экологии, борьбы с опасными заболеваниями, разрешения социальных, межнациональных и межрелигиозных конфликтов и т. д., в настоящее время интересуют практически каждого здравомыслящего человека и особенно учёных, профессионально занимающихся научной работой. Последние пытаются понять сущность своей деятельности, определить границы дозволенного при проведении научных исследований с точки зрения существующих морально-этических норм и предсказать социальные последствия практического использования научных достижений. Эти вопросы в настоящее время становятся чрезвычайно актуальными в связи с необходимостью управления развитием науки в современном обществе, планирования и организации научной деятельности и т. п.

В данной главе рассматриваются вопросы становления науки, характеристики науки в целом, структурной организации науки, взаимодействия отдельных наук и пути преодоления существующих антагонистических противоречий при формулировании цели, разработке методологии, проведения исследований, анализа и рекомендаций по практическому использованию

результатов исследований в рамках естественных и гуманитарных наук.

1.1. Наука как рациональная сфера человеческой деятельности

Жизнь человека обусловлена его взаимодействием с окружающим миром. Поэтому, обладая высоким уровнем сознания, человек всегда стремился познать законы этого мира и использовать их для удовлетворения своих материальных и духовных потребностей. Принято считать, что зарождение научного знания начало происходить в VI – IV веках до н. э. и связано с появлением первых научных школ в Древней Греции. Первыми учёными-естествоиспытателями и философами были представители милетской школы Фалес (624–547 гг. до н. э.), Анаксимандр (610–546 гг. до н. э.) и Анаксимен (585–525 гг. до н. э.). Название школы произошло от имени города Милет, расположенного на полуострове Малая Азия.

Представители милетской школы впервые в истории поставили вопрос о материальном первоначале (субстрате, субстанции) всего сущего и, используя строгую систему логических доказательств, пытались разработать естественнонаучную картину мира. Так, родоначальник греческой науки Фалес (Фалес Милетский) субстанцией мира, его первоначалом считал воду, утверждая, что все вещи возникают из воды и, разрушаясь, вновь превращаются в воду. Вода вечна, образующиеся же из неё вещи и явления временны и преходящи. Фалес Милетский фактически высказал идею о материальном единстве мира и о превращении единой материи из одного состояния в другое.

В отличие от Фалеса его ученик Анаксимандр считал первоматерией не воду, а апейрон – неопределенную по отношению к любым из возможных своих состояний материю. Апейрон, учил Анаксимандр, – это вечное и бесконечное, находящееся в непрерывном движении единое материальное начало, источник конкретных вещей и явлений. Все вещи и явления возникают из апейрона и, прекращая своё существование, превращаются в апейрон же, то есть из качественно определённых становятся вновь материей как таковой.

Исторически ценной стороной в учении Анаксимандра является его высказывания о противоположностях и их роли в возникновении вещей из апейрона. Анаксимандр утверждал, что вещи возникают вследствие постоянного движения апейрона, приводящего к выделению из него таких противоположностей, как холодное и тёплое, влажное и сухое. Благодаря вечному движению апейрона и образованию противоположностей одни вещи и миры рождаются, другие уничтожаются, во Вселенной происходит бесконечный вечный круговорот вещей и миров.

Анаксимен вечной первоматерией считал воздух и видел в нём источник возникновения всего, что существовало, существует и будет существовать. При этом он утверждал, что все вещи и явления возникают из воздуха и затем снова в него превращаются. В вечном движении беспредельного воздуха Анаксимен видел главную причину изменения всего существующего. Одновременно он считал, что все различные состояния материальной субстанции зависят от той или иной степени разряжения или сгущения воздуха. Он учил, что беспредельный воздух, разряжаясь,

становится огнём, а сгущаясь, уплотняясь, последовательно превращается в ветер, облака, землю и, наконец, в камни. Все же другие вещи и явления мира образуются, согласно Анаксимену, из этих перечисленных выше состояний материи.

Наряду с научными школами материалистического направления в древней Греции существовали и школы идеалистического толка. Значительный вклад в развитие идеалистической философии внёс Платон (427–347 гг. до н. э.). За первичное Платон признавал мир вечных, самостоятельно существующих духовных сущностей, идей. Материальный же мир он считал миром вторичным, производным от мира идей. Так, например, дерево, по Платону, представляет собой не что иное, как отражение существующей в умопостигаемом мире идеи «дерева вообще». Исторически ценное в платоновском учение заключается в требовании точности определения понятий, в подчёркивании важности общих понятий для познания, в разработке основ активной, действенной стороны человеческого мышления.

Древнегреческая наука представляла собой единую, нерасчленённую науку, содержание которой складывалось из общефилософских положений о мире и высказываний о различных конкретных явлениях природы, т. е. она фактически являлась натурфилософией – философией природы, имеющей характер схоластических и умозрительных исследований, мало связанных с решением практических задач. Историческое значение древнегреческой науки состоит прежде всего в том, что она осуществила переход от мифологического, обыденного, эклектичного и неупорядоченного знания, характерного для

миропонимания Древнего Востока, к строгой системе логических доказательств, обоснованных выводов и аргументированной систематизации, использованных в дальнейшем при разработке новой, научной методологии познания.

Древнегреческую науку иногда называют *преднаукой*, имея в виду, что наука в её современном понимании приобрела присущие ей черты только в XVI – XVIII веках. В этот период идёт интенсивный процесс становления так называемой *классической науки*, социальным стимулом развития которой стало растущее капиталистическое производство. Происходит утверждение науки как производительной силы общества. основополагающим методом научных исследований становится *эксперимент*, позволяющий добывать новое знание и проверять на адекватность следствия теоретических построений. Наука начинает использоваться в качестве средства покорения человеком природы.

В настоящее время в литературе встречается большое количество определений термина «наука», обобщая которые можно сказать следующее. *Наука – это сфера человеческой деятельности, направленная на получение новых объективных знаний о природе, обществе и самом человеке и их систематизацию.* Непосредственные цели науки – описание, объяснение и предсказание процессов и явлений действительности, составляющих предмет её изучения, на основе открываемых ею законов.

1.2. Классификация наук

Современная наука представляет собой сложное и вместе с тем целостное системное образование. Система наук условно делится на *естественные, технические и общественные науки*. К естественным наукам (*естествознанию* – системе наук о природе) относят физику, астрономию, химию, биологию, медицину, геологию, географию и др., а также многочисленные смежные науки, такие как физическая химия, биофизика, биохимия и «синтетические» науки (информатика, кибернетика и др.). Технические науки (*техникосзнание* – система наук, наиболее тесно связанная с практической реализацией теоретического знания) включает такие науки, как металлургия, ядерная энергетика, сопротивление материалов, электротехника, радиотехника и др. К общественным наукам (*обществознанию* – системе наук об обществе и человеке) можно отнести социальные науки (право, экономику, социологию, философию, историю, этнографию, демографию, археологию и др.), а также гуманитарные науки (психологию, логику, лингвистику, филологию и др.).

Интенсивный процесс дифференциации науки на естественные и общественные науки начал происходить с XVI века, а технические науки стали формироваться начиная со второй половины XIX века. В настоящее время наряду с продолжающимся процессом дифференциации наук идёт и процесс их интеграции. Например, социальная экология является по сути дела междисциплинарной наукой, интегрирующей достижения естественных, технических и общественных наук. Имеется целый ряд наук, занимающих промежуточное положение между

естественными и техническими (биоэлектроника и др.), естественными и общественными (экономическая география и др.) науками. Следовательно, провести чёткую грань между естественными, техническими и общественными науками нельзя.

В настоящее время учёные насчитывают несколько тысяч научных дисциплин, которые в зависимости от цели каждой из них можно объединить в две группы: *фундаментальные и прикладные науки*. Фундаментальные науки, например, физика, химия, астрономия, биология, этнография, лингвистика нацелены на изучение базисных структур мира и познание его объективных законов безотносительно к возможности и потребности их практического применения. Прикладные науки такие, как технические науки, сельскохозяйственные науки, медицинские науки, педагогические науки и др., занимаются применением результатов фундаментальных исследований для решения практических задач, направленных на развитие производительных сил общества и на удовлетворение материальных и духовных потребностей человека.

1.3. Естествознание. Методы естественнонаучного познания мира

Естествознание, как уже отмечалось выше, – это совокупность наук о явлениях и законах природы. Само слово «естествознание» образовано из двух слов: «естество» (природа) и «знание», что означает буквально знание природы. В настоящее время в области естествознания накоплен огромный научный материал, изложить который в одной учебной дисциплине не

представляется возможным. В связи с этим ограничимся лишь рассмотрением концепций современного естествознания. Слово «концепция» (в переводе с латинского *понимание, система*) – определённый способ понимания, трактовки каких-либо явлений, основная точка зрения, руководящая идея для их освещения. Концептуальный подход позволяет с единых позиций интегрировать разрозненные знания о неживой и живой природе и человеческом обществе в целостную естественнонаучную картину мира. Он полезен не только для понимания истории развития естествознания, сути изучаемых им явлений и законов природы, но и для знакомства с важнейшими достижениями естествознания специалистами технических и общественных наук.

В процессе получения нового знания исследователь всегда пользуется определённой методологией. Слово *методология* происходит от греческих слов «*методос*» (путь познания) – метод и «*логос*» – учение и означает учение о методах. В современном понимании методология – учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности. *Метод* – это способ достижения какой-либо цели, включающий совокупность приёмов практической или теоретической деятельности. Метод вооружает человека наиболее рациональными способами проведения исследований и тем самым оптимизирует его деятельность. Один из основоположников научной методологии английский философ Ф.Бэкон (1561–1626) считал, что научный метод подобен фонарю, освещающему дорогу бредущему в темноте путнику.

Естественнонаучное познание мира, рассматриваемое как процесс постижения истины, протекает на двух

взаимосвязанных и дополняющих уровнях: эмпирическом (опытном) и теоретическом. В связи с этим и научные методы подразделяются на *эмпирические и теоретические*.

К научным методам эмпирического уровня исследований относят: 1) *наблюдение* – целенаправленное восприятие явлений объективной действительности для установления существенных свойств объекта познания; 2) *описание* – фиксация средствами естественного или искусственного языка сведений об объектах; 3) *измерение* – сравнение объектов по каким-либо сходным свойствам или сторонам; 4) *эксперимент* – наблюдение в специально создаваемых и контролируемых условиях с целью установления причинной зависимости между заданными условиями и характеристиками исследуемого объекта; 5) *моделирование* – воспроизведение свойств объекта на специально созданном его аналоге (модели), что позволяет исследовать процессы, характерные для оригинала, в отсутствии самого оригинала.

К научным методам теоретического уровня исследований относят: 1) *идеализацию* – мысленное выделение существенных и абстрагирование от несущественных свойств, черт, сторон и т. п. явлений или объектов; 2) *формализацию* – построение абстрактных математических моделей, раскрывающих сущность изучаемых процессов и явлений действительности; 3) *теоретизацию* – построение теорий на основе *аксиом* – утверждений, доказательства истинности которых не требуется; 4) *математическое моделирование* процессов или свойств объектов на основе исследования системы уравнений, описывающих изучаемый оригинал; 5) *гипотетико-дедуктивный (понятийно – дедуктивный)*

метод – получение необходимой информации, используя известные законы (гипотезы) и дедуктивный метод (движение от общего к частному); б) *метод проверки теории на адекватность (метод подтверждаемости)* – сопоставление следствий, вытекающих из теории, и результатов математического моделирования на соответствие эмпирическим фактам.

Методы классифицируют и по степени общности их применения, именно, на: 1) *конкретно-научные методы* – методы специфические для отдельных разделов науки, например, метод рентгеноструктурного анализа в кристаллографии, метод балльной оценки знаний учащихся в педагогике и др.; 2) *общенаучные методы* – методы, применяемые во всех областях науки, к которым относятся, например, рассмотренные выше эмпирические и теоретические методы; 3) *всеобщие методы* – методы, применяемые не только в науке, но и в других отраслях человеческой деятельности, основные из которых представлены в таблице 1.1.

1.4. Естественнонаучная и гуманитарная культуры

Слово «*культура*» в переводе с латинского означает возделывание, воспитание, образование, развитие, почитание. *Культура* – это исторически определённый уровень развития общества, творческих сил и способностей человека, выраженный в типах и формах организации жизни и деятельности людей, а также в создаваемых ими материальных и духовных ценностях. В связи с тем, что имеются специфические особенности производства материальных ценностей (одежды, пищи, зданий, заводов, транспорта, средств связи и т. п.) и духовных ценностей

(идей, научных гипотез, теорий, произведений литературы и искусства, морально-этические норм, правовых законов, политических взглядов, религиозных воззрений и др.), а также уклада жизни

Таблица 1.1.

Всеобщие методы человеческой деятельности

№№ п/п	Название метода	Содержание метода
1	Анализ	Расчленение целостного предмета на составные части (стороны, признаки, свойства или отношения) с целью их всестороннего изучения
2	Синтез	Соединение ранее выделенных частей предмета в единое целое
3	Абстрагирование	Отвлечение от ряда несущественных для данного исследования свойств и отношений изучаемого явления с одновременным выделением интересующих нас свойств и отношений
4	Сравнение	Метод установления сходства и различия свойств и параметров объектов

5	Обобщение	Приём мышления, в результате которого устанавливаются общие свойства и признаки объектов
6	Индукция	Метод исследования и способ рассуждения, в котором общий вывод строится на основе частных посылок
7	Дедукция	Способ рассуждения, посредством которого из общих посылок с необходимостью следует заключение частного характера
8	Аналогия	Приём познания, при котором на основе сходства объектов в одних признаках заключают об их сходстве и в других признаках
9	Моделирование	Изучение объекта (оригинала) путем создания и исследования его копии (модели), замещающей оригинал с определенных сторон, интересующих исследователя
10	Классификация	Разделение всех изучаемых предметов на отдельные группы в соответствии с каким-либо важным для исследования признаком

людей, создающих их, принято культуру подразделять на две взаимосвязанные области: *материальную культуру и духовную культуру*.

Одним из основных компонентов духовной культуры является наука. Совокупность идеалов, стилей мышления, методологических установок, систем ценностей, присущих науке, иногда называют *научной культурой*. Наряду с общими характеристиками, свойственными всем отраслям науки, каждая из конкретных наук характеризуется своими особенностями познавательной деятельности. Науки различаются методами познания, методологическими установками и специфическими средствами познания, а также стилями мышления, идеалами, системами ценностей, которые имеют место в данной науке и определяют отношение учёных как к процессу познания, так и к культурному фону науки. В связи с этим в сфере научной культуры выделяют культуру естественнонаучного познания, культуру технического знания, культуру гуманитарного познания и др.

В рамках каждой из областей научной культуры по-разному решаются вопросы организации науки, отношения науки и общества, науки и идеологии, науки и права и т. п. Наиболее сильно различия в решении данных вопросов проявляются между культурами естественнонаучного и гуманитарного познания. Это даёт основание считать, что в настоящее время существуют две основные научные культуры: *естественнонаучная и гуманитарная*.

Наиболее чётко различия между естественнонаучной и гуманитарной культурами сформулировал английский учёный и писатель Ч.Сноу (1905–1980) в своей работе «Две

культуры», написанной в 1959 году. Он писал о том, что между так называемыми естественнонаучной и гуманитарно-художественной культурами существует огромная пропасть, которая с каждым годом увеличивается. Учёные, изучающие естественные и гуманитарные науки, всё более и более не понимают друг друга и это негативно сказывается на развитии всей человеческой культуры.

В 60-х годах прошлого столетия в молодёжной среде нашей страны велись интенсивные дискуссии между «физиками», утверждавшим, что прогресс человечества целиком определяется лишь достижениями в области естественных наук («только физика – соль, остальное всё – ноль»), и «лириками», придерживавшихся мнения, что, только следуя гуманитарным ценностям, можно создать благоприятные условия для развития человека. В дальнейшем жизнь показала несостоятельность притязаний тех и других на монопольное обладание истиной.

Естественнонаучная культура базируется на знаниях, добытых человеком в процессе изучения природы и явлений, происходящих в ней, а гуманитарная культура опирается на знания о поступках людей, их ценностной и чувственной оценке, и ориентирована на гуманизм, нравственность, права человека, искусство, литературу, мифологию, религию и т. п. Таким образом, деление единой культуры на естественнонаучную и гуманитарную связано с различиями между естественным и гуманитарным знаниями. Основные различия между естественнонаучным и гуманитарным знаниями представлены в таблице 1.2.

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что различия между естественными и

гуманитарными науками носят фундаментальный характер, а следовательно, и формирующиеся на их основе естественнонаучная и гуманитарная культуры также имеют принципиальные отличия. Однако если рассматривать науку или культуру в целом, то можно видеть, что их естественные и гуманитарные компоненты являются взаимодополнительными. Единство и взаимосвязь естественных и гуманитарных наук и соответствующих им типов культур являются закономерным отражением единства и взаимосвязи природы и общества, с одной стороны, и человека, с другой стороны.

В настоящее время развитие каждой из рассматриваемых типов культур достигло такого высокого уровня, что начался интенсивный процесс их взаимного обогащения. Это находит проявление, например, в формировании так называемых «симбиотических» наук (социобиологии, экологии, биоэтики и др.); в гуманитаризации естественнонаучного и технического образования и

Таблица 1.2.

Отличительные особенности естественных и гуманитарных наук

Характеристик и различения	Естественные науки	Гуманитарные науки
Объект исследования	Природа	Человек
Исследуемые явления	Природные явления	Поступки людей

Взаимоотношения субъекта и объекта познания	Строго разделены	Частично совпадают
Основной теоретический концепт	Понятие	Ценность
Основная функция	Объяснение (истины доказываются)	Понимание (истины истолковываются)
Характер методологии	Генерализирующий (обобщающий)	Индивидуализирующий
Основной научный метод	Гипотетико-дедуктивный	Гипотетико-ценностный (прагматический)
Экспериментальные исследования	Составляют основу познания	Затруднены
Основной критерий научности	Подтверждаемость	Эффективность
Идеологическая нагрузка	Идеологический нейтралитет	Идеологическая нагруженность

в фундаментализации естествознанием гуманитарного образования; в проведении гуманитарных экспертиз естественнонаучных программ, затрагивающих жизненноважные интересы общества и отдельного человека и т. п.

Литература к главе 1

1. **Баженов Л.Б.** Строение и функции естественнонаучной теории. – М.: Наука, 1978. – 226 с.

2. **Горелов А.А.** Концепции современного естествознания. Курс лекций. – М.: ЦЕНТР, 2001. – 208 с.

3. **Канке В.А.** Концепции современного естествознания: Учебник для вузов. – М.: Логос, 2001. – 368 с.

4. Концепции современного естествознания: Учебник для вузов/ **В.Н.Лавриненко, В.П.Ратников, Г.В.Баранов и др.**; Под ред. **проф. В.Н.Лавриненко, В.П.Ратникова** – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 303 с.

5. **Найдыш В.М.** Концепции современного естествознания. Учебное пособие. – М.: Гардарики, 2002. – 476 с.

6. **Сноу Ч.** Две культуры. М., 1973.

7. **Фейнберг Е.Л.** Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. М., 1992.

Г Л А В А 2

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Согласно современным естественнонаучным представлениям все объекты неживой и живой природы представляют собой упорядоченные, структурированные, иерархически организованные и взаимосвязанные системы. На основе системного подхода, учитывающего фундаментальный характер взаимодействия объектов природы и отношения между ними, рассмотрим структурные уровни организации материи.

2.1. Современные представления об иерархических уровнях организации материи. Микро-, макро- и мегамиры

Основополагающую роль в развитии естествознания играет физика. Это связано с тем, что, во-первых, все области естествознания опираются на общие физические законы природы, а во-вторых, все явления природы имеют внутренние механизмы, познать которые можно только понимая их физическую сущность. Однако следует отметить, что здесь речь не идет о сведении всего научного познания только к физическому, поскольку каждая область реальности обладает своей спецификой и не может быть сведена ни к какой другой. Так, например, законы жизни биологических существ не могут быть сведены только к

физическим законам, хотя действие физических законов распространяется и на них.

Само слово «*физика*» в переводе с греческого означает «*природа*». Именно так называлось одно из сочинений древнегреческого философа и ученого Аристотеля (384–322 гг. до н. э.), ученика Платона и учителя Александра Македонского. Аристотель писал: «Наука о природе изучает преимущественно тела и величины, их свойства и виды движения, а кроме того, начала такого рода бытия».

Вследствие общности и широты своих законов физика всегда оказывала воздействие на развитие всех естественных наук, включая их теоретические основы, методологию, направления исследований, инструментарий, обработку и интерпретацию результатов. В своей основе *физика – экспериментальная наука*: её законы базируются на фактах, установленных опытным путём. Эти законы представляют собой количественные соотношения между физическими величинами и формулируются на математическом языке. Рассмотрим материальные объекты, изучаемые физикой, с точки зрения их структурной организации.

Все известные в настоящее время объекты материального мира в зависимости от их размеров условно относят к микро-, макро- или мегамирам.

Микромир (от греч. *mikros* – малый) в современном понимании – это мир элементарных частиц, атомов, молекул и некоторых надмолекулярных структур, типа клетки и т. п. Это мир предельно малых, непосредственно не наблюдаемых микрообъектов, пространственная

размерность которых исчисляется от 10^{-16} до 10^{-6} см, а время жизни – от 10^{-24} с до бесконечности.

Понятие «*макромир*» (от греч. makros – большой, крупный) в достаточной степени условное, обычно под ним понимают объекты, окружающие человека в повседневной жизни, соразмерные человеку: пространственные размеры – от 10^{-5} до 10^5 см, а время жизни – от 10^{-3} до 10^{10} с. Среди микроскопических и макроскопических структур есть объекты живой и неживой природы.

Мегами́р (от греч. megas – великий, грандиозный) – мир огромных космических масштабов и скоростей, расстояние в котором измеряется световыми годами, а время существования космических объектов (звёзд, галактик и т. д.) – миллионами и миллиардами лет.

В данной главе рассмотрим подробно свойства материальных объектов, относящихся к микромиру. Свойства макро- и мегамира и процессы, происходящие в них, будут рассмотрены в последующих главах.

2.2. Этапы развития атомистической концепции

В основе представлений о микромире лежит атомистическая концепция о строении материи, которая впервые была выдвинута древнегреческим философом Левкиппом (ок. 500–440 гг. до н. э.). Он ввёл такие понятия, как «*атом*» и «*пустота*». Атомистические представления Левкиппа были конкретизированы, дополнены и развиты другим великим древнегреческим философом Демокритом (ок. 460–370 гг. до н. э.). Согласно гипотезе Демокрита в абсолютной

пустоте окружающего пространства существует бесконечное число мельчайших неделимых частиц – атомов, которые имеют разнообразную форму и движутся в пустоте беспорядочно, иногда они сталкиваются и отскакивают друг от друга, но иногда сцепляются в разных положениях и сочетаниях, что означает образование вещей с разным качеством. Эпикур (341–270 гг. до н. э.) наделил атомы ещё свойством тяжести. Атомы вечны, а вещи, образованные из них, гибнут (разъединяются), но сами атомы остаются, они далее могут сцепляться в новых сочетаниях с образованием новых вещей и т. д. Так возникают из атомов не только обычные вещи, но и Земля, и звёзды, и космические миры в бесконечном пространстве.

Концепция атомизма получила дальнейшее развитие в XVIII веке в работах Дж. Дальтона (1766–1844), который принял атомный вес водорода за единицу и сопоставил с ним атомные веса других газов. Благодаря этому стали изучаться физико-химические свойства атомов. В XIX веке Д.И. Менделеев (1834–1907) построил систему химических элементов, основанную на их атомном весе.

Систематические исследования строения атомов начались в 1897 году благодаря открытию Дж. Томсоном (1856–1940) электрона – отрицательно заряженной частицы, входящей в состав всех атомов. В 1903 году Дж. Томсон, развивая идеи У. Томсона (лорда Кельвина) (1824–1907) о строении атома (У. Томсон в 1902 году предложил первую модель атома, согласно которой положительный заряд в атоме распределен в достаточно большой области, а электроны вкраплены в него, как «изюм в пудинг»), усовершенствовал модель атома. Атом по Дж. Томсону представлял собой положительно заряженный шар с

вкрапленными в него электронами, суммарный отрицательный заряд которых по модулю равен положительному заряду шара (модель атома Томсона). Поскольку масса электрона приблизительно в 2000 раз меньше массы атома водорода, то предполагалось, что почти вся масса атома определяется массой положительного заряда.

В 1908 году Х.Гейгер и Э.Марсден, сотрудники лаборатории Э.Резерфорда (1871–1937), провели опыты по прохождению альфа-частиц через тонкие фольги из золота и других металлов и обнаружили, что почти все они проходят через фольгу, будто нет препятствия, и только 1/10000 из них испытывает сильное отклонение. С помощью модели Дж.Томсон это объяснить не удалось, но Э.Резерфорд нашел выход. Он обратил внимание на то, что большая часть частиц отклоняется на малый угол, а малая – до 150° . Э.Резерфорд пришел к выводу, что они взаимодействуют с каким-то массивным объектом малого размера, этот объект представляет собой ядро атома – положительно заряженную микрочастицу, размер которой (10^{-12} см) очень мал по сравнению с размерами атома (10^{-8} см), но в нём почти полностью сосредоточена масса атома.

В 1911 году Э.Резерфорд предложил модель атома, которая напоминала солнечную систему: в центре находится атомное ядро, а вокруг него по своим орбитам движутся электроны. Однако эта модель содержала неразрешимое противоречие, заключающееся в том, что электроны по круговым орбитам движутся с ускорением, а следовательно, согласно законам электродинамики они обязаны излучать электромагнитную энергию. В этом случае электроны очень быстро потеряли бы свою энергию

и упали на ядро, но опыт показывает, что этого не происходит.

В 1913 году датскому физика Н.Бору (1885–1962) удалось усовершенствовать планетарную модель атома Э.Резерфорда и тем самым разрешить имеющиеся в ней противоречия. Для этого Н.Бору потребовалось ввести два постулата, совершенно несовместимые с классической физикой:

1) из бесчисленного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются в действительности только некоторые дискретные круговые орбиты, удовлетворяющие определенным квантовым условиям. Электрон, находящийся на одной из этих орбит, несмотря на то, что он движется с ускорением, обусловленным изменением направления вектора скорости, не излучает электромагнитных волн (света);

2) излучение испускается или поглощается атомом в виде порции (кванта) энергии при переходе электрона из одного стационарного (устойчивого) состояния в другое, т. е. при переходе с одной стационарной орбиты на другую (рис. 2.1).

Боровская модель атома смогла лишь в известной мере объяснить спектры атома водорода, имеющего всего один электрон. Свойства многоэлектронных атомов она объяснить не могла. Это удалось сделать после создания квантовой механики в 1926 году усилиями Э.Шрёдингера (1887–1961), В.Гейзенберга (1901–1976) и др.

Следующий шаг в развитии атомистической концепции был сделан в 1932 году в связи с открытием английским физиком Д.Чедвиком (1891–1974) электрически нейтральной частицы *нейтрона* (англ. neutron от лат. neuter – ни тот, ни другой). Было установлено, что все ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. *Протон* – ядро атома водорода, имеющее положительный заряд, равный по модулю заряду электрона. Термин «*протон*» (от греч. protos – первый) ввёл в 1914 году Марсден. Таким образом в начале 30-х годов XX века стало ясно, что роль первичных неделимых частиц, из которых состоит вся материя, перешла от атомов к электронам, протонам и нейтронам. Эти частицы получили названия элементарных. Понятие «*элементарные частицы*» отражает чаяния учёных найти первичные кирпичики мироздания.

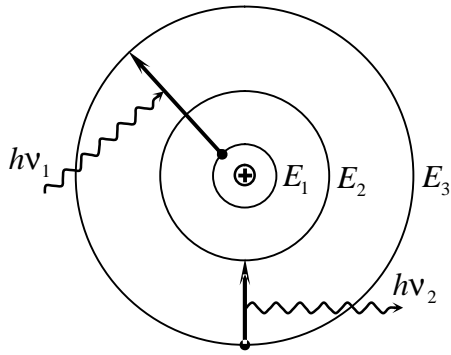


Рис. 2.1. Орбиты электрона в атоме водорода по Бору ($h\nu_1 = E_3 - E_1$ – энергия фотона, поглощённого электроном при переходе с первой орбиты на третью; $h\nu_2 = E_3 - E_2$ – энергия фотона, излучённого электроном при переходе с третьей орбиты на вторую; h – постоянная Планка; ν_1 и ν_2 – частоты излучения; E_1 , E_2 и E_3 – энергии электрона на первой, второй и третьей орбите соответственно).

В настоящее время открыто около 400 элементарных частиц. Открытие большого числа элементарных частиц вызвало потребность их классификации. В качестве существенного признака классификации был принят вид, или тип, взаимодействия – сильный или слабый. *Сильное взаимодействие* обуславливает очень сильное сцепление нуклонов (протонов и нейтронов) в атомных ядрах, а порожденные им процессы протекают с большой интенсивностью, т. е. «*сильно*». Частицы, обладающие сильным взаимодействием, назвали *адронами* (от греч. «hadros» – большой, сильный). Класс адронов делится на два семейства (барионы и мезоны). *Барионы* – это такие адроны, которые в реакциях между элементарными

частицами могут превращаться в протоны или получаться из них.

Частицы, участвующие в слабом или в слабом и электромагнитном взаимодействиях названы *лептонами* (от греч. «leptos» – лёгкий, тонкий). К лептонам относятся электроны, мюоны, тау-частицы и соответствующие им нейтрино (электронное, мюонное и тау-нейтрино). Мюон и тау-частица имеют заряд, равный заряду электрона, и участвуют в тех же взаимодействиях, что и электрон, но имеют значительно большие массы и нестабильны. Масса мюона в 206,7 раза, а масса тау-частицы в 3536 раз больше массы электрона. Нейтрино являются наиболее распространёнными частицами во Вселенной. Они электрически нейтральны и имеют очень малую массу, точное значение которой в настоящее время неизвестно. В связи с этим изучать свойства нейтрино чрезвычайно сложно, поскольку они не участвуют ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях и проходят через вещество, практически не взаимодействуя с ним.

Все элементарные частицы являются объектами исключительно малых масс и размеров. Массы частиц определяются по отношению к массе покоя электрона, равной $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Мезоны имеют массу от одной до тысячи масс электрона, а масса барионов превышает в тысячи раз массу электрона. Размеры электрона и мюона не определены, но они меньше 10^{-16} см, а размеры адронов порядка 10^{-13} см.

Изучая закономерности в спектроскопии и свойствах адронов, американские физики М.Гелл-Манн (род. 1929) и Дж.Цвейг (род. 1937) в 1964 году высказали гипотезу о

существовании прачастиц, из которых состоят все адроны. Эти материальные объекты были названы кварками. Название «кварк» заимствовано М.Гелл-Манном из фантастического романа Дж.Джойса «Поминки по Финнегану» и означает нечто пустяковое и странное. (В романе герою снится сон, в котором чайки, мечущиеся над бурным морем, кричат резкими голосами: «Три кварка для мистера Марка!». Это слово нигде дальше не встречается. Но его непонятность и акцент на число 3, по-видимому, и сыграли решающую роль в выборе названия для трёх необычных прачастиц. На тот момент предполагалось, что прачастиц всего 3.). Позже обнаружилось, что многие следствия из гипотезы кварков хорошо подтверждаются экспериментально. В конце 60-х годов проводился и прямой эксперимент, аналогичный тому, который проводил Э.Резерфорд, позволивший обнаружить ядро атома. На этот раз потоками электронов высоких энергий бомбардировали протоны. Эксперимент показал, что взаимодействие электронов с протонами не соответствовало априорному образу протона как целостного протяженного объекта размером 10^{-13} см. Рассеяние (взаимодействие) происходило так, как если бы электроны взаимодействовали с некими точечными объектами внутри протона, которые к тому же были почти независимы друг от друга.

К настоящему времени открыто 6 кварков, их обозначают буквами *u* (от *up* – верхний), *d* (от *down* – нижний), *c* (от *charm* – очарование), *s* (от *strange* – странный), *t* (от *top* – верхний, истинный), *b* (от *beauty* – красота или прелесть) и называют экзотическими именами соответственно «верхний», «нижний», «очарованный», «странный», «истинный», «прелестный». Эти 6 типов кварков именуют *ароматами*. Наряду с 6 кварками имеются

и 6 соответствующих им антикварков. Кварки имеют электрический заряд, дробный по отношению к заряду электрона, а именно, $(+2/3)e$ или $(-1/3)e$, где e – заряд электрона по модулю. Каждый кварк может находиться в трёх состояниях, для характеристики которых введено понятие *цвета*. Разумеется, к физиологии зрения это никакого отношения не имеет, но абстрактные утверждения и заключения в этом случае становятся наглядными. Таким образом, каждый кварк может иметь три цвета, в качестве которых часто выбирают *красный R (red)*, *зелёный G (green)* и *голубой B (blue)*. Антикваркам приписываются «*антицвета*», т. е. цвета дополнительные к своему цвету, например, дополнительным к голубому будет жёлтый цвет. Смешение основного и дополнительного цветов должно давать белый цвет.

Взаимодействие между кварками носит обменный характер. В качестве его переносчиков выступают так называемые *глюоны*, имеющие цвет и антицвет. Обмениваясь глюонами, кварки изменяют свой цвет, но не аромат.

Кварковая модель сравнительно просто объясняет строение адронов: барионы состоят из трёх кварков (антибарионы – из трёх антикварков), мезоны – из кварка и антикварка. Протон p и нейтрон n – строительный материал ядра – представляются следующими наборами кварков: $p = (uud)$ и $n = (udd)$. Заряд u -кварка равен $(+2/3)e$, а d -кварка – $(-1/3)e$. Цветовая гамма кварков и антикварков при построении адронов подбирается такой, чтобы все адроны были белыми.

Следует отметить, что поведение кварков несколько необычно, ибо они никогда не встречаются в свободном состоянии, а находятся в постоянном плену, заключены внутри адронов. В физике кварков сформулирована гипотеза *конфайнмента* (от английского confinement – пленение) кварков внутри адронов, согласно которой невозможно вылетание свободного кварка из адрона.

Таким образом, 6 кварков и 6 антикварков, каждый из которых может иметь любой из трёх возможных цветов, то есть 36 фундаментальных частиц призваны объяснить почти все многообразие микрочастиц, кроме лептонов. Лептоны так же, как и кварки, являются фундаментальными частицами, причём у каждого лептона есть свой антилептон. Предполагается, что из кварков и антикварков, лептонов и антилептонов (48 фундаментальных частиц) может быть построено и объяснено всё многообразие элементарных частиц.

Следуя концепции атомизма, некоторые физики считают, что даже кварки состоят из более мелких частиц – *прекварков*. Возможно, что и лептоны построены из прекварков. Можно предположить, что и прекварки построены из каких-то более мелких частиц и что этот процесс поиска неделимых частиц бесконечен. Это означает, что истинно элементарных частиц в природе не существует.

2.3. Фундаментальные взаимодействия в природе

В настоящее время известны четыре вида фундаментальных взаимодействий в природе: *сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное*.

Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре и определяет ядерные силы. Предполагается, что ядерные силы возникают при обмене между нуклонами кварками. Кварк, принадлежащий одному нуклону, переходит в другой нуклон, кварк которого в свою очередь переходит в первый нуклон. Этот обмен эквивалентен обмену между нуклонами виртуальной парой «кварк – антикварк», которую иногда называют *пионом*, и говорят, что сильное взаимодействие между нуклонами в ядре осуществляется за счёт обмена между ними виртуальными пионами. Виртуальными частицами называют такие частицы, экспериментально обнаружить которые в ходе обменного процесса невозможно. Сильное взаимодействие между нуклонами действует на расстоянии порядка 10^{-13} см, т. е. практически в пределах ядра. Энергия связи между нуклонами является чрезвычайно большой, например, для ядра гелия она равна 7,1 МэВ/нуклон, а для ядра цинка – 8,7 МэВ/нуклон. Это является причиной высокой устойчивости ядер.

Электромагнитное взаимодействие связано с электрическими и магнитными полями. Носителями электромагнитного взаимодействия являются *виртуальные фотоны* – кванты электромагнитного поля, которыми обмениваются заряды. Электрическое поле возникает при наличии электрических зарядов, а магнитное поле – при их движении. Электромагнитное взаимодействие описывается фундаментальными законами электростатики и электродинамики: законом Кулона, законом Ампера, законом Фарадея-Максвелла и др. Его более общее описание даёт электромагнитная теория Дж.Максвелла (1831–1879), основанная на фундаментальных уравнениях, связывающих электрическое и магнитное поля. В процессе

электромагнитного взаимодействия электроны и атомные ядра соединяются в атомы, атомы – в молекулы. Различные агрегатные состояния вещества (твердое, жидкое, газообразное), явление трения, упругие и другие свойства вещества определяются преимущественно силами межмолекулярного взаимодействия, которое по своей природе является электромагнитным.

Слабое взаимодействие несёт ответственность за некоторые виды ядерных процессов. Слабое взаимодействие между частицами осуществляется посредством обмена так называемыми *промежуточными бозонами*. Оно простирается на расстояние порядка 10^{-22} – 10^{-16} см и связано главным образом с распадом частиц, например, с происходящими в атомном ядре превращениями нейтрона в протон, электрон и антинейтрино. В соответствии с современным уровнем знаний большинство частиц нестабильны именно благодаря слабому взаимодействию.

Гравитационное взаимодействие характерно для всех материальных объектов вне зависимости от их природы. Оно заключается во взаимном притяжении тел и определяется фундаментальным законом всемирного тяготения: между двумя точечными телами действует сила притяжения, прямо пропорциональная произведению их масс и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними. Гравитационным взаимодействием определяется падение тел в поле сил тяготения Земли. Законом всемирного тяготения описывается, например, движение планет Солнечной системы, а также других макрообъектов. Предполагается, что гравитационное взаимодействие обуславливается некими элементарными

частицами – *гравитонами*, существование которых к настоящему времени экспериментально не подтверждено.

Гравитационное взаимодействие – самое слабое, не учитываемое в теории элементарных частиц, поскольку на характерных для них расстояниях порядка 10^{-13} см оно даёт чрезвычайно малые эффекты. Однако на ультра малых расстояниях (порядка 10^{-33} см) и при ультра больших энергиях гравитация приобретает существенное значение. Здесь начинают проявляться необычные свойства физического вакуума. Сверхтяжёлые виртуальные частицы создают вокруг себя заметное гравитационное поле, которое начинает искажать геометрию пространства. В космических масштабах гравитационное взаимодействие имеет решающее значение. Радиус его действия не ограничен.

От силы взаимодействия зависит время, в течение которого совершается превращение элементарных частиц. Ядерные реакции, связанные с сильными взаимодействиями, осуществляются в течение $10^{-24} - 10^{-23}$ с. Это приблизительно тот кратчайший интервал времени, за который частица, ускоренная до высоких энергий, когда её скорость близка к скорости света, пролетает расстояние порядка 10^{-13} см. Изменения, обусловленные электромагнитными взаимодействиями, осуществляются в течение $10^{-21} - 10^{-19}$ с, а слабыми (например, распад элементарных частиц) – в основном в течение 10^{-10} с. По времени различных превращений можно судить о силе связанных с ним взаимодействий.

В совокупности эти четыре взаимодействия необходимы и достаточны для построения разнообразного

мира. Без сильных взаимодействий не существовали бы атомные ядра, а звёзды и Солнце не могли бы генерировать за счет ядерной энергии теплоту и свет. Без электромагнитных взаимодействий не было бы ни атомов, ни молекул, ни макроскопических объектов, а также тепла и света. Без слабых взаимодействий не были бы возможны ядерные реакции в недрах Солнца и звёзд, не происходили бы вспышки сверхновых звёзд и необходимые для жизни тяжёлые элементы не могли бы распространяться во Вселенной. Без гравитационного взаимодействия не только не было бы галактик, звёзд, планет, но и вся Вселенная не могла бы эволюционировать, поскольку гравитация является объединяющим фактором, обеспечивающим единство Вселенной как целого и её эволюцию.

Современная физика пришла к выводу, что все четыре фундаментальных взаимодействия, необходимые для создания из элементарных частиц сложного и разнообразного материального мира, можно получить из одного фундаментального взаимодействия – *суперсилы*.

При энергиях больше 100 ГэВ (100 млрд электрон-вольт) объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Температура, соответствующая такой энергии, равна температуре Вселенной через 10^{-10} с после Большого взрыва. Теория *электрослабого взаимодействия*, объединяющего электромагнитное и слабое взаимодействия, была создана в 1967–1968 годах двумя независимо работавшими физиками-теоретиками – американцем С.Вайнбергом (род. 1933) и пакистанцем А.Саламом (род. 1926) (теория Вайнберга – Салама). Эта теория в 1983 году получила экспериментальное подтверждение. В 1973–1974 годах А.Салам выдвинул

гипотезу о *Великом объединении*, включающем сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия, которое может иметь место при энергиях больше 10^{14} ГэВ и на расстояниях 10^{-29} см. В этом случае кварки и лептоны становятся неразличимыми, поскольку сильное и слабое взаимодействия при этих условиях протекают совершенно одинаково, что следует из их общей природы.

Предполагается, что при энергиях больше 10^{19} ГэВ происходит объединение всех четырех взаимодействий. Модели, в рамках которых объединяются сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействия, носят название моделей *супергравитации*. Это предположение носит чисто теоретический характер, поскольку в настоящее время экспериментальным путём его проверить невозможно. Косвенно эти идеи подтверждаются астрофизическими данными, которые можно рассматривать как экспериментальный материал, накопленный Вселенной.

Литература к главе 2

1. *Карпенков С.Х.* Концепции современного естествознания: Учебник – М.: Высшая школа, 2000. – 334 с.

2. Концепции современного естествознания: Учебник для вузов / *В.Н.Лавриненко, В.П.Ратников, Г.В.Баранов и др.*; Под ред. *проф. В.Н.Лавриненко, В.П.Ратникова* – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 303 с.

3. Концепции современного естествознания: Под ред. **проф. С.И. Самыгина** – Ростов н/Д: Просвещение, 2001. – 576 с.

4. **Мотылева Л.С., Скоробогатов В.А., Судариков В.М.** Концепции современного естествознания: Учебник для вузов/ Под ред. **проф. В.А. Скоробогатова**. – СПб.: Союз, 2000. – 320 с.

5. **Найдыш В.М.** Концепции современного естествознания: Учебное пособие. – М.: Гардарики, 2002. – 476 с.

6. **Наумов А.И.** Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учебное пособие – М.: Просвещение, 1984. – 384 с.

Г Л А В А 3

КОНЦЕПЦИИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Пространство и время как всеобщие и необходимые формы бытия материи являются фундаментальными категориями в современной физике и других науках. Физические, химические, биологические и другие величины непосредственно или опосредованно связаны с измерением длин и длительностей, т. е. пространственно-временных

характеристик объектов. Поэтому расширение и углубление знаний о мире связано с соответствующими учениями о пространстве и времени. Сделаем краткий экскурс в историю вопроса.

3.1. Основные этапы развития представлений о пространстве и времени.

В доньютоновский период развитие представлений о пространстве и времени носило преимущественно стихийный и противоречивый характер. Выдающийся английский учёный И.Ньютон (1643–1727) создал физическую картину мира, которая на протяжении двух с половиной столетий господствовала в науке (ньютоновская теория пространства и времени). Основные положения теории пространства и времени изложены Ньютоном в работе «Математические начала натуральной философии» («Начала»). По Ньютону пространство и время абсолютны. Абсолютное пространство существует независимо от времени и независимо от наполняющей его материи. Ньютон писал: «Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остаётся всегда одинаковым и неподвижным». В пространстве нет ни выделенных точек, ни выделенных направлений, т. е. оно однородно и изотропно.

Ньютон дал следующее определение времени: «Абсолютное, истинное математическое время, само по себе и по своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью». Абсолютное время – идеальная мера длительности всех механических процессов. Как мы не наблюдаем истинно равномерного движения из-за трения

или других причин, так и измерить время можно только приближаясь к истинному, математическому, входящему в уравнения. Абсолютное время однородно, это означает симметрию относительно сдвигов, и в частности, что точка отсчёта начала времени не имеет значения. Длительность процессов от этого не меняется.

Положение материальной точки в пространстве определяется заданием трёх координат, например, широты, долготы и высоты. Это означает, что пространство трёхмерно. Древнегреческий учёный Евклид (ок. 330–275 до н.э.) в работе «Начала» построил геометрию трёхмерного пространства, известную в научном мире как *евклидова геометрия*. Древнегреческий учёный К.Птолемей (ок. 90 – ок. 160) в своём главном труде «Альмагест» уделил особое внимание трёхмерности пространства, утверждая, что в природе не может быть более трёх пространственных измерений. Для определения положения тел в пространстве французский учёный Р.Декарт (1596–1650) ввёл прямоугольную систему координат («*декартовы координаты*») – x , y , z .

Вопрос о том, почему мы способны воспринимать только пространство трёх измерений, интересовал многих учёных. Австрийский физик П.Эренфест (1880–1933) в 1917 году исследовал этот вопрос специально и показал, что «закон обратных квадратов», по которому действуют друг на друга точечные гравитационные массы и электрические заряды, обусловлен трёхмерностью пространства. В пространстве n измерений точечные частицы взаимодействовали бы по закону обратной степени $(n - 1)$. Поэтому для $n = 3$ справедлив закон обратных квадратов. Он показал, что при $n = 4$, что соответствует закону

обратных кубов, планеты двигались бы по спиральям и быстро бы упали на Солнце. В атомах при числе измерений, большем трёх, также не существовало бы устойчивых орбит, т. е. не было бы химических процессов и жизни. На связь трёхмерности пространства с законом тяготения указывал ещё и И.Кант (1724–1804).

Принятие абсолютного времени и постулирование абсолютной и универсальной одновременности во всей Вселенной явилось основой для теории дальнего действия – мгновенной передачи действия от одного тела к другому на расстояние через пустое пространство без помощи материи. В качестве дальнедействующей силы выступало тяготение, которое с бесконечной скоростью, мгновенно и прямолинейно распространяло силы на бесконечные расстояния. Эти мгновенные, вневременные взаимодействия объектов и послужили обоснованием абсолютности пространства, существующего независимо от времени.

Ньютоновская теория дальнего действия и его схема мира господствовала до начала XX века. Впервые её ограниченность обнаружили английские физики М.Фарадей (1791–1867) и Дж.Максвелл ещё в XIX веке, показав неприменимость её к электромагнитным явлениям. Ими было установлено, что распространение взаимодействия происходит не мгновенно, а с конечной скоростью. Как отмечал А.Эйнштейн (1879–1955), с развитием электродинамики и оптики становилось всё очевиднее, что «недостаточно одной классической механики для полного описания явлений природы». Из электромагнитной теории Максвелла вытекал вывод о конечной скорости распространения электромагнитных взаимодействий и

существования электромагнитных волн. Свет, магнетизм, электричество стали рассматриваться как проявление единого электромагнитного поля. Таким образом, Максвеллу удалось подтвердить действие законов сохранения и принципа близкодействия благодаря введению понятия электромагнитного поля.

Итак, в физике XIX века появляется новое понятие – «поле», что, по словам Эйнштейна, явилось «самым важным достижением со времени Ньютона». Открытие существования поля в пространстве между зарядами и частицами было очень существенно для описания физических свойств пространства и времени. Структура электромагнитного поля описывается с помощью четырёх уравнений Максвелла, устанавливающих связь величин, характеризующих электрические и магнитные поля с распределением в пространстве зарядов и токов (подробно об этом сказано в разделе данного пособия, посвящённом электромагнитной теории Максвелла).

В 1905 году Эйнштейн в работе «К электродинамике движущихся тел» изложил основы теории, впоследствии получившей название специальной теории относительности, в которой показано, что пространство и время взаимосвязаны. В 1907 году немецкий математик Г. Минковский (1864–1909) высказал предположение о тесной связи трёх пространственных и одной временной координат. По его мнению, все события во Вселенной происходят в четырёхмерном пространственно-временном континууме. Он писал: «Отныне пространство само по себе и время само по себе должны обратиться в фикции, и лишь некоторый вид соединения обоих должен ещё сохранить самостоятельность». Итак, пространство и время тесным

образом связаны между собой и их нужно рассматривать как взаимосвязанные элементы. Сумма всех событий названа Минковским понятием «мир», а путь какой-либо частицы в пространстве-времени – её «мировой линией». По выражению В.И.Вернадского (1863–1945), теория относительности «отрицала только независимое от пространства, абсолютное время, но не придала ему новых свойств – принимая его тем же изотропным, аморфным временем, каким понимал его Ньютон».

Следующий важный шаг в понимании свойств пространственно-временного континуума был сделан в 1915 году Эйнштейном в общей теории относительности, в которой было показано, что между пространством-временем и материей существует связь. Материальные объекты создают поле тяготения, которое приводит к искривлению четырёхмерного пространства-времени.

Рассмотрим подробно вопрос о связи свойств пространства и времени с законами материального мира.

3.2. Основы классической механики и их связь со свойствами пространства и времени

В основе классической механики лежат три закона Ньютона, являющиеся обобщением опытных фактов. На них следует смотреть не как на изолированные независимые утверждения, а как на систему взаимосвязанных законов. Опытной проверке подвергается не каждый закон в отдельности, а вся система законов в целом.

В качестве первого закона движения Ньютон принял закон инерции, открытый ещё Г.Галилеем (1564–1642). Согласно этому закону тело (материальная точка), не подверженное внешним воздействиям, либо находится в покое, либо движется прямолинейно и равномерно. Такое тело называется свободным, а его движение – свободным или движением по инерции. Первый закон Ньютона-Галилея фактически постулирует, что существует система отсчёта, в которой все свободные тела движутся прямолинейно и равномерно. Такая система называется инерциальной системой отсчёта. Под системой отсчёта понимается совокупность тела отсчёта, системы координат и часов. Содержание закона инерции, в сущности, сводится к утверждению, что существует по крайней мере одна инерциальная система отсчёта. На самом деле, инерциальных систем отсчёта бесчисленное множество, так как любая система отсчёта, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы отсчёта, также является инерциальной.

Второй закон Ньютона устанавливает связь между ускорением тела, его массой и действующей на него силой, а именно, ускорение движущегося тела прямо пропорционально действующей на него силе, обратно пропорционально массе тела и направлено по прямой, по которой эта сила действует:

$$\mathbf{\ddot{a}} = \frac{1}{m} \mathbf{\ddot{F}}, \quad (3.1)$$

где $\mathbf{\ddot{a}}$ – ускорение тела; $\mathbf{\ddot{F}}$ – сила; m – масса тела.

Сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения. Масса тела выступает как коэффициент пропорциональности между силой действующей на тело и ускорением ($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$) и характеризует инертность тела, т. е. степень неподатливости изменению состояния движения.

Третий закон Ньютона утверждает, что силы взаимодействия двух материальных точек равны по величине, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти материальные точки (рис. 3.1), т. е.

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}, \quad (3.2)$$

где \mathbf{F}_{12} – сила, действующая на первое тело со стороны второго; \mathbf{F}_{21} – сила, действующая на второе тело со стороны первого.

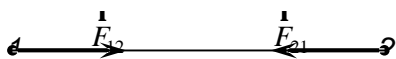


Рис. 3.1. Геометрическое представление взаимодействия двух

Выдающейся заслугой Ньютона было открытие закона всемирного тяготения, в соответствии с которым два точечных тела притягивают друг друга с силой прямо

пропорциональной произведению их масс, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и направленной вдоль соединяющей их прямой:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (3.3)$$

где m_1 и m_2 – массы тел; r – расстояние между телами; $\gamma = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ – гравитационная постоянная.

Во всех инерциальных системах отсчёта законы классической динамики (законы Ньютона) имеют одинаковую форму; в этом сущность механического принципа относительности – *принципа относительности Галилея*. Он означает, что уравнения динамики при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой не изменяются, т. е. инвариантны по отношению к преобразованиям координат.

Рассмотрим преобразование координат при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Пусть движущаяся система координат (рис. 3.2) в каждый момент времени занимает определенное положение относительно неподвижной на оси x . Если начала обеих систем координат совпадают в момент времени $t = 0$, то в момент времени t начало движущейся системы координат находится в точке $x = vt$ неподвижной системы (v – скорость движения подвижной системы относительно неподвижной). Предполагая, что время в обеих системах отсчёта в любой точке пространства одно и тоже и, что относительное положение систем координат определяется мгновенно, можно записать выражения, связывающие координаты и

время подвижной системы отсчёта с неподвижной, а именно:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad (3.4)$$

Эти формулы называются преобразованиями Галилея.

Легко показать, что *законы динамики Ньютона инвариантны относительно преобразований Галилея*. Это объясняется тем, что силы и массы тел одинаковые во всех инерциальных системах отсчета и, как следует из формулы (3.4), ускорения тел, которые определяются двойным дифференцированием координат по времени, также одинаковые ($a = d^2x/dt^2 = d^2x'/dt^2 = a'$).

Инвариантами, т. е. величинами, численное значение которых не изменяется при преобразовании координат по Галилею, являются длины и интервалы времён. Покажем это.

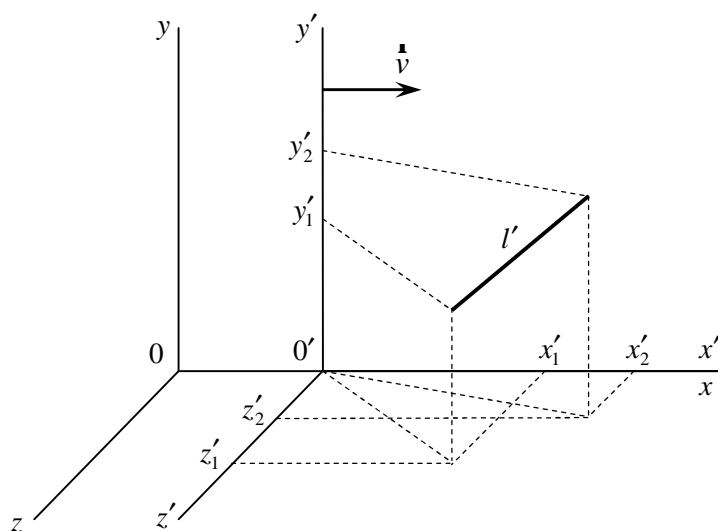


Рис. 3.2. Неподвижная (x, y, z) и подвижная (x', y', z') системы координат.

Пусть в подвижной системе координат находится неподвижный стержень, координаты концов которого (x'_1, y'_1, z'_1) и (x'_2, y'_2, z'_2) . Это означает, что длина стержня в подвижной системе равна $l' = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2}$. Тогда относительно неподвижной системы отсчёта стержень движется поступательно и все его точки имеют скорость v . Длиной движущегося стержня, по определению, называется расстояние между координатами его концов в некоторый момент времени. Таким образом, для измерения длины движущегося стержня необходимо одновременно, т. е. при одинаковых показаниях часов неподвижной системы отсчёта, расположенных в соответствующих точках, отметить положение концов стержня. Пусть засечки

положения концов движущегося стержня сделаны в неподвижной системе координат в момент времени t и характеризуются координатами (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) . Тогда для длины стержня в неподвижной системе отсчёта с учетом (3.4) будем иметь

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} = l',$$

т. е. длина стержня в обеих системах координат одинакова. Это позволяет утверждать, что *длина является инвариантом преобразований Галилея.*

Отметим, что, если два события одновременны в одной инерциальной системе отсчёта, то из преобразований Галилея (3.4) непосредственно следует одновременность этих событий и в другой инерциальной системе отсчёта, т. к. $t' = t$. Это означает, что одновременность двух событий имеет абсолютный характер, независимый от системы отсчёта.

Инвариантность интервала времени является следствием формулы преобразования времени $t' = t$, а именно:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1 = \Delta t'.$$

Таким образом, можно сказать, что *интервал времени является инвариантом преобразований Галилея.*

Как отмечалось выше, электромагнитная теория Максвелла не укладывается в рамки ньютоновской картины

мира. Она отрицает принцип дальнего действия и абсолютность пространства и времени. Анализ показал, что уравнения Максвелла неинвариантны относительно галилеевых преобразований. Это значит, что при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой форма уравнений оказалась разной. Это равносильно тому, что в разных системах отсчёта один и тот же физический процесс осуществлялся по разным законам, что противоречит науке. Противоречия между классической механикой Галилея-Ньютона и электродинамикой Максвелла были устранены Эйнштейном, благодаря разработанной им в 1905 году специальной теории относительности.

3.3. Пространство и время в специальной и общей теории относительности

В 1904 году голландский физик Х.Лоренц (1853–1928) предложил формулы для преобразования координат, которые обеспечивают инвариантность уравнений Максвелла при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (3.5)$$

где c – скорость света в вакууме.

Из сравнения формул (3.4) и (3.5) следует, что преобразования Лоренца существенно отличаются от преобразований Галилея. Однако в предельном случае малых скоростей ($v \ll c$) отношением v^2/c^2 по сравнению с единицей можно пренебречь. Тогда преобразования

Лоренца сводятся к преобразованиям Галилея. При малых скоростях различие между преобразованиями Лоренца и Галилея незначительно и поэтому неточность преобразований Галилея долго оставалась незамеченной.

Из преобразований Лоренца следует, что события, происходящие одновременно в разных точках пространства в одной системе отсчёта, не являются одновременными в другой системе отсчёта. Это означает, что одновременность событий имеет относительный характер.

Выше отмечалось, что инвариантами преобразований Галилея являются длина тел и промежутки времени между событиями. Именно поэтому понятия длины и промежутка времени играют такую большую роль в классической физике. Однако ни длина тел, ни промежутки времени между событиями не являются инвариантами преобразований Лоренца. Это означает, что они зависят от системы отсчёта.

Инвариантным относительно преобразований Лоренца является так называемый пространственно-временной интервал или просто интервал. Пусть события произошли в точке x_1, y_1, z_1 в момент времени t_1 и в точке x_2, y_2, z_2 в момент времени t_2 . Интервалом между этими событиями, или, как говорят, интервалом между точками x_1, y_1, z_1, t_1 и x_2, y_2, z_2, t_2 , называется величина s , квадрат которой определяется формулой

$$s^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2. \quad (3.6)$$

В подвижной системе отсчёта квадрат интервала s' записывается в виде

$$s'^2 = c^2(t'_2 - t'_1)^2 - (x'_2 - x'_1)^2 - (y'_2 - y'_1)^2 - (z'_2 - z'_1)^2. \quad (3.7)$$

Подставляя (3.5) в (3.7), убедимся, что $s^2 = s'^2 = \text{inv}$. Впервые понятие интервала ввёл А.Пуанкаре (1854–1912) и он же показал, что интервал является инвариантом при преобразованиях Лоренца.

Из преобразований Лоренца следует сокращение длины движущегося стержня, а именно $l = l' \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где $l = x_2 - x_1$ и $l' = x'_2 - x'_1$, и замедление хода движущихся часов, а именно $\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где $\Delta t = t_2 - t_1$ и $\Delta t' = t'_2 - t'_1$.

Лоренц, получив новые правила перехода от одной инерциальной системы отсчёта к другой, обеспечивающие инвариантность уравнениям Максвелла, не смог в полной мере объяснить их физический смысл. Эйнштейн, основываясь на факте хорошей согласованности лоренцевых преобразований с теорией Максвелла, придал этим преобразованиям определённый физический смысл. Опираясь на преобразования Лоренца, на работы Пуанкаре, который распространил принцип относительности на все электромагнитные процессы, и на экспериментальное доказательство одинаковости значения скорости света во всех инерциальных системах отсчёта, Эйнштейн в 1905 году создал так называемую *специальную теорию относительности* (СТО), представляющую собой *физическую теорию пространства и времени*. В основе

СТО лежат два постулата: принцип относительности Эйнштейна и принцип постоянства скорости света.

Принцип относительности Эйнштейна утверждает, что *все тождественные физические явления в любых инерциальных системах отсчёта при одинаковых начальных и граничных условиях протекают одинаково.* Другими словами, все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчёта к другой, т.е. уравнения, выражающие законы природы, имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчёта.

Этот постулат распространяет принцип относительности Галилея на все физические явления природы. Это означает, что все инерциальные системы отсчёта равноправны и никакие опыты (механические, электромагнитные и т.п.), проведённые в данной инерциальной системе отсчёта, не дают возможности обнаружить, покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно.

Принцип постоянства скорости света гласит, что *скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта и не зависит от движения источников и приёмников света.*

Специальная теория относительности объединила пространство и время в единый континуум пространство-время, причём она, как и классическая ньютоновская механика, предполагает, что время однородно, а пространство однородно и изотропно. СТО часто называют релятивистской теорией.

Дальнейшее развитие представлений о пространстве и времени было сделано Эйнштейном в 1915 году в *общей теории относительности* (ОТО), называемой иногда теорией тяготения. В ней Эйнштейн расширил принцип относительности, распространив его на неинерциальные системы отсчёта, и использовал принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс (отношение инертной массы к гравитационной одинаково для всех тел), который непосредственно следует из установленного ещё Галилеем факта одинаковости ускорения различных тел при их свободном падении.

Используя законы классической механики, покажем, что отношение инертной $m_{ин}$ и гравитационной $m_{гр}$ масс одинаково для всех тел. Предположим, что вниз одновременно начинают падать два разных тела. На каждое из тел действует сила тяжести. На первое тело действует сила тяжести, равная $F_1 = m_{гр1}g$, а на второе – $F_2 = m_{гр2}g$. Согласно второму закону Ньютона, под действием этих сил тела будут двигаться с ускорениями соответственно a_1 и a_2 , причём в качестве коэффициентов пропорциональностей между силами и ускорениями будут выступать их инертные массы $m_{ин1}$ и $m_{ин2}$: $F_1 = m_{ин1}a_1$ и $F_2 = m_{ин2}a_2$. Из этих рассуждений непосредственно следует, что $m_{гр1}g = m_{ин1}a_1$ и $m_{гр2}g = m_{ин2}a_2$. Галилей экспериментально показал, что все тела при отсутствии сопротивления падают с одинаковым ускорением, т. е. отношение ускорений равно единице, или $(a_1/a_2) = (m_{гр1}/m_{ин1})(m_{ин2}/m_{гр2}) = 1$. Это возможно только при пропорциональности инертной и гравитационной масс.

Последние эксперименты подтверждают равенство $m_{\text{ин}} = m_{\text{гр}}$ с высокой точностью (относительная ошибка измерений не превышает 10^{-11}).

Общая теория относительности объяснила сущность тяготения, состоящую в изменении геометрических свойств, искривлении четырёхмерного пространства-времени вокруг тел, которые образуют поле тяготения. В рамках общей теории относительности Эйнштейну удалось получить уравнение, описывающее поле тяготения.

Для проверки своей теории Эйнштейн предложил три эффекта: искривление светового луча в поле тяготения Солнца, смещение перигелия Меркурия и гравитационное красное смещение. Эти эффекты, как показали последующие эксперименты, действительно существуют и количественно с приемлемой на тот исторический момент времени погрешностью правильно предсказывались ОТО.

Искривление светового луча в поле тяготения Солнца.

Предположим вслед за Эйнштейном, что свет от звезды S проходит непосредственно вблизи поверхности Солнца. Тогда солнечное тяготение наиболее сильно искривляет его траекторию (рис. 3.3). Земному наблюдателю будет казаться, что звезда находится в направлении S' . В соответствии с общей теорией относительности угол, на который отклоняется луч света, можно рассчитать по формуле:

$$\varphi = \frac{4\gamma M_{\text{с}}}{c^2 R_{\text{с}}}, \quad (3.8)$$

где φ – угол отклонения луча света; M_c – масса Солнца; R_c – радиус Солнца.

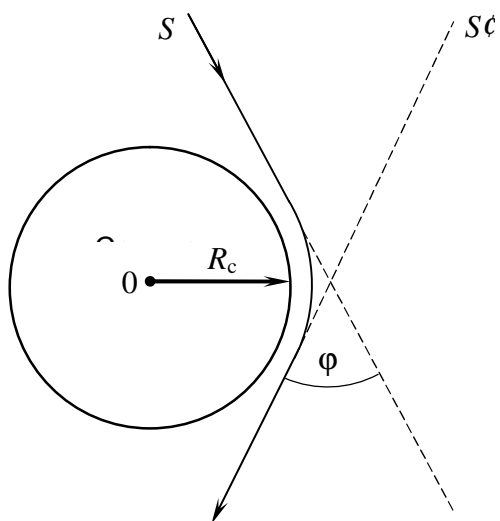


Рис. 3.3. Отклонение луча света гравитационным полем Солнца.

Угол отклонения луча света полем тяготения Солнца, рассчитанный по (3.8), равен $1,75''$. Значение угла φ экспериментально определяют сравнивая, положения звёзд близких к Солнцу во время полного солнечного затмения и во время, когда Солнце находится далеко от данного участка звёздного неба. Многократно проведённые измерения показали, что экспериментальные значения угла отклонения луча света полем тяготения Солнца в пределах 10% совпадают с его теоретическим значением.

Смещение перигелия Меркурия.

В соответствии с классической механикой Ньютона эллиптическая орбита планеты Меркурий не должна изменять своего положения в пространстве. Это связано с тем, что взаимодействие Меркурия и Солнца в ньютоновской теории осуществляется в соответствии с законом всемирного тяготения (3.3), в котором сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами. Все рассуждения проводятся при условии пренебрежения взаимодействием Меркурия и Солнца с другими космическими объектами.

В общей теории относительности показано, что гравитационное взаимодействие тел отличается от ньютоновского закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Это можно объяснить следующим образом. В нулевом приближении можно считать, что Солнце создаёт гравитационное поле, убывающее обратно пропорционально квадрату расстояния от него. Но это поле обладает потенциальной энергией, которая сама по себе, обладая массой, является источником тяготения. Это дополнительное поле тяготения в свою очередь действует как дополнительный источник тяготения и т. д. Следует отметить, что отклонение от ньютоновского закона обратных квадратов (3.3) мало и заметить его на практике чрезвычайно трудно. Это удаётся сделать, например, наблюдая в течение многих лет за движением планет солнечной системы, особенно за движением Меркурия – ближайшей к Солнцу планеты.

Рассмотрим влияние дополнительного поля тяготения на орбиты планет солнечной системы. Суть дела состоит в

том, что источник дополнительного поля тяготения распределён по всему пространству, а не сосредоточен в одной точке, удалённой от планеты. Если бы планета двигалась точно по круговой орбите, то она подвергалась бы действию несколько более сильного поля, которое было бы одним и тем же во всех точках орбиты. Если бы мы не знали о теории Эйнштейна, то просто предположили бы, что масса Солнца чуть больше, чем мы считали. Однако если планета движется по эллиптической орбите, то часть времени она будет находиться в более сильном поле тяготения, а часть – в более слабом. Существенно, что эти изменения величины поля не будут соответствовать закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Эти отклонения от закона обратных квадратов как раз и сказываются на реальной орбите.

Общая теория относительности предсказала, что эллиптическая орбита Меркурия, как впрочем, и других планет должна медленно смещаться в пространстве в том же направлении, что и сама планета (рис. 3.4).

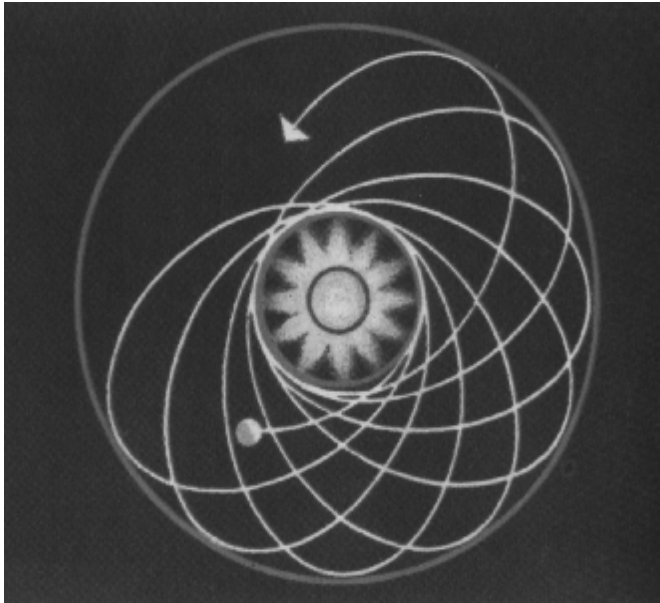


Рис. 3.4. Смещение перигелия

Можно определить скорость смещения эллипса по движению перигелия – точки орбиты, в которой планета находится ближе всего к Солнцу. Многолетние наблюдения за смещением перигелия Меркурия показали, что угловая скорость этого смещения под действием гравитационного поля Солнца составила около $0,43''$ в столетие и в пределах погрешности совпала со значением, предсказанным общей теорией относительности.

Гравитационное красное смещение.

Предположим, что фотон с энергией $\epsilon = h\nu$ (h – постоянная Планка; ν – частота) покидает поверхность

звезды (рис. 3.5). Такой фотон имеет инертную массу, равную $m_{\phi} = \epsilon/c^2 = h\nu/c^2$. В связи с этим, покидая поверхность звезды, фотон будет совершать работу, связанную с преодолением действия гравитационного поля звезды. Эта работа будет совершена за счёт убыли потенциальной энергии фотона. Потенциальная энергия фотона на поверхности звезды равна

$$m_{\phi} g_{3B} R_{3B} = \frac{h\nu}{c^2} \frac{\gamma M_{3B}}{R_{3B}^2} R_{3B} = h\nu \frac{\gamma M_{3B}}{c^2 R_{3B}},$$

где M_{3B} и R_{3B} – масса и радиус звезды соответственно; $g_{3B} = \frac{\gamma M_{3B}}{R_{3B}^2}$ – ускорение

свободного падения вблизи поверхности звезды. Потенциальная энергия фотона на достаточно большом удалении от звезды, когда гравитационное взаимодействие становится ничтожно малым, может считаться равной нулю. В этом случае уменьшение потенциальной энергии фотона равно $h\nu \frac{\gamma M_{3B}}{c^2 R_{3B}}$ и полная энергия фотона становится равной

$$h\nu' = h\nu \left(1 - \frac{\gamma M_{3B}}{c^2 R_{3B}} \right).$$

Это означает, что фотон частоты ν , покидающий звезду и уходящий в бесконечность, будет восприниматься в бесконечности с частотой

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{\gamma M_{3B}}{c^2 R_{3B}} \right).$$

Уменьшение частоты фотона означает, что если фотон принадлежит голубой области спектра, то он испытывает смещение по частоте в сторону красной границы видимого спектра, вследствие чего этот эффект и известен под

названием «гравитационное красное смещение». Его не следует смешивать с доплеровским красным смещением далёких звёзд, приписываемым их кажущемуся радиальному движению в направлении от Земли. Гравитационное красное смещение хорошо подтверждается экспериментально. Так, для звезды Сириус В вычисленное относительное смещение составляет

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n' - n}{n} \cong -5,9 \cdot 10^{-5},$$

а измеренное равно $-6,6 \cdot 10^{-5}$. Расхождение не выходит за пределы возможной ошибки, связанной с неопределённостью значений $M_{зв}$ и $R_{зв}$.

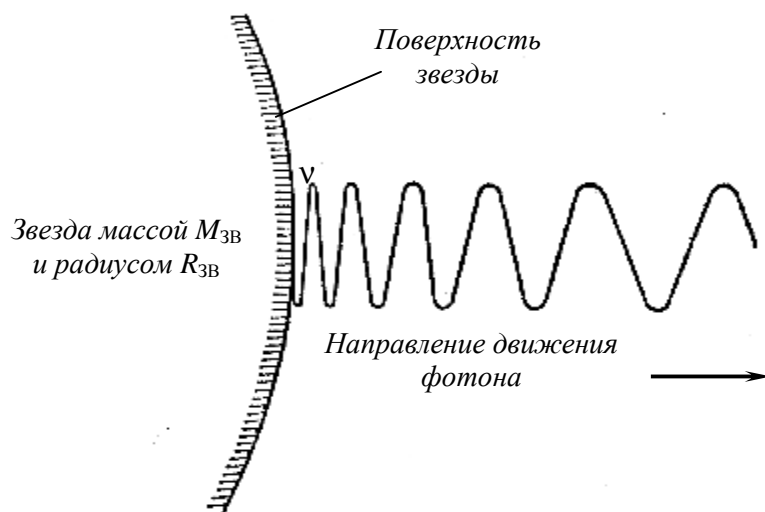


Рис. 3.5. Уменьшение частоты фотона, покидающего поверхность звезды.

В настоящее время рядом учёных подвергается сомнению истинность специальной и общей теории относительности Эйнштейна. Принцип постоянства скорости света в СТО предполагает отсутствие эфира. Однако к моменту создания специальной теории относительности не существовало надёжных экспериментальных данных, подтверждающих или отвергающих существование эфира. В 1925 году американским физиком Д.Миллером (1866–1941) с сотрудниками в обсерватории Маунт Вилсон в США на высоте около 1800 м удалось измерить скорость эфирного ветра относительно Земли, которая составила около ~ 10 км/с, а в 1929 году там же аналогичные опыты выполнил А.Майкельсон (1852–1931) с сотрудниками и получил

значение скорости эфирного ветра, равное ~ 6 км/с. Однако эти результаты не были признаны основной научной общественностью. Несмотря на это, представления об эфире получили дальнейшее развитие. В настоящее время существует целое научное направление, получившее название эфиродинамики. Основы эфиродинамики изложены, например, в работе В.А.Ацюковского [1]. Сейчас активно разрабатываются эфиродинамические модели электромагнетизма, гравитации, вещества и др. Можно надеяться, что со временем эфиродинамика углубит и расширит наши представления об окружающем мире.

В работах российского физика А.А.Логунова (род. 1926) с соавторами показано, что в общей теории относительности отсутствуют фундаментальные законы сохранения энергии-импульса и момента импульса вещества и гравитационного поля, вместе взятых, а поэтому инертная масса, определённая в ней, не равна гравитационной массе [4]. В ОТО отсутствует понятие гравитационного поля как физического поля, обладающего плотностью энергии-импульса.

Определяя физическую геометрию пространства-времени на основе изучения движения света и пробных тел, Эйнштейн установил, что структура пространства подчиняется геометрии Римана, и это было положено в основу общей теории относительности. Именно это автоматически лишило ОТО фундаментальных законов сохранения энергии-импульса и момента импульса, поскольку риманова структура геометрии имеет ограниченные возможности.

При создании ОТО Эйнштейн исходил из принципа эквивалентности сил инерции и тяготения, который сформулирован им следующим образом: «... для бесконечно малой области координаты всегда можно выбрать таким образом, что гравитационное поле будет отсутствовать в ней». *В формулировке принципа эквивалентности Эйнштейн сознательно отошёл от концепции гравитационного поля как физического поля типа электромагнитного поля Фарадея – Максвелла, которое как материальную субстанцию в принципе нельзя устранить выбором системы координат.*

Следует отметить, что ОТО не имеет классического ньютонова предела, а следовательно, она не удовлетворяет одному из наиболее фундаментальных принципов физики – принципу соответствия.

Всё это свидетельствует о том, что ОТО нельзя считать удовлетворительной теорией. Поэтому задача построения классической теории гравитации, которая удовлетворяла бы всем требованиям, предъявляемым к физической теории, представляет собой важную задачу.

Основываясь на представлении о гравитационном поле как о физическом поле типа поля Фарадея–Максвелла, используя принцип относительности и другие положения, Логунову с соавторами удалось создать так называемую *релятивистскую теорию гравитации (РТГ)*, свободную от рассмотренных недостатков общей теории относительности. *В теории РТГ физическая геометрия пространства-времени определяется не на основе изучения движения света и пробных тел, а на основе общих динамических свойств материи – её законов сохранения,*

которые не только имеют фундаментальное значение, но и экспериментально проверяемы.

Несмотря на бóльшие возможности релятивистской теории гравитации по сравнению с возможностями общей теории относительности в изучении свойств гравитационного поля, научных работ, основанных на использовании РТГ, сравнительно мало. Это связано, вероятно, с двумя причинами: во-первых, сейчас ещё мало учёных, в совершенстве владеющих РТГ, и, во-вторых, время изучения тонких гравитационных эффектов, которые принципиально не могут быть объяснены в рамках ОТО, ещё не наступило.

Литература к главе 3

1. **Ацюковский В.А.** Концепции современного естествознания. История. Современность. Проблемы. Перспектива: Курс лекций. – М.: МСЭУ, 2000. – 448 с.

2. **Дубнищева Т.Я.** Концепции современного естествознания: Учебник. – М.: ИКЦ «Маркетинг», Новосибирск: ООО «Издательство «ЮКЭА», 2001. – 832 с.

3. **Киттель Ч., Найт У., Рудерман М.** Механика: Берклевский курс физики. Том 1. – М.: Наука, 1975. – 498 с.

4. **Логунов А.А., Мествиришвили М.А.** Релятивистская теория гравитации. – М.: Наука, 1989. – 304 с.

5. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Том 1. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

6. **Угаров В.А.** Специальная теория относительности. – М.: Наука, 1977. – 384 с.

7. **Эйнштейн А., Инфельд Л.** Эволюция физики: Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. – М., 1965.

Г Л А В А 4

СИММЕТРИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Симметрия (от греч. *simmetria* – соразмерность) – это свойство тел, явлений и процессов, отражающее состояние их внутреннего равновесия и устойчивости и проявляющееся внешне в их инвариантности (неизменности) относительно некоторых преобразований. Немецкий математик Г.Вейль (1885–1955) писал: «Симметричное означает нечто, обладающее хорошим соотношением пропорций, а симметрия – тот вид согласованности отдельных частей, который объединяет их в целое. Красота тесно связана с симметрией». Мы восхищаемся проявлениями симметрии в природе, например в кристаллах, снежинках, живых организмах или в творениях рук человеческих, скажем в архитектуре зданий, орнаментах персидских ковров и т. п. На рис. 4.1 представлены зарисовки различных форм диатомовых водорослей, выполненные немецким биологом Э.Геккелем (1834–1919) и представленных среди других в его альбоме «Красота форм в природе». Видно, что диатомовые водоросли обладают поразительно чёткой симметрией. Согласно Вейлю, объект является симметричным, если над ним можно произвести некоторые операции, в результате которых объект будет выглядеть точно так же, как и прежде. Например, если снежинки повернуть на 60° , то они будут выглядеть точно так же, как и до поворота.

Симметрией обладают не только объекты, но и законы природы. Если законы, устанавливающие соотношения между вели-

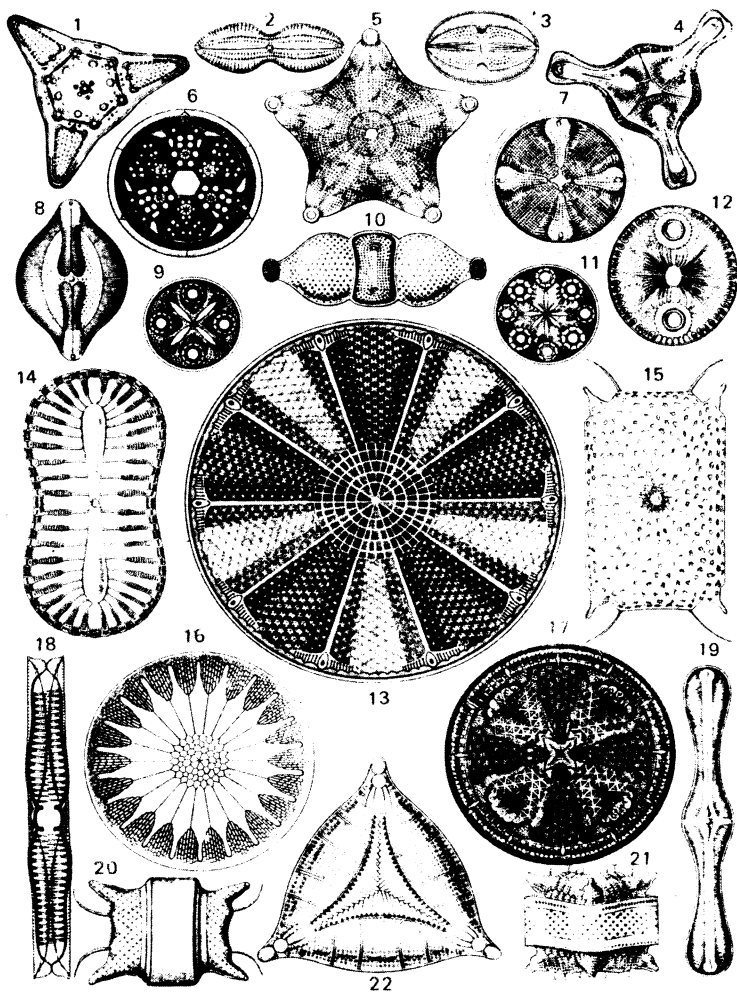


Рис. 4.1 Диатомовые водоросли.

чинами, характеризующими физическую систему, или определяющие изменение этих величин со временем, не

меняются при определенных операциях (преобразованиях), которым может быть подвергнута система, то говорят, что эти законы обладают симметрией (или инвариантны) относительно данных преобразований. Симметрия пространственно-временных преобразований выявляет законы сохранения.

4.1. Связь законов сохранения с пространственно-временными преобразованиями

Согласно теореме Э.Нётер, установленной ею в 1918 году, каждому преобразованию симметрии, характеризуемому одним непрерывно изменяющимся параметром, соответствует величина, которая сохраняется (не меняется со временем) для системы, обладающей этой симметрией. Рассмотрим непрерывные преобразования пространства и времени и связанные с этими преобразованиями законы сохранения.

1. Перенос (сдвиг) системы как целого в пространстве.

Это и последующие пространственно-временные преобразования можно понимать в двух смыслах: как активное преобразование – реальный перенос физической системы относительно выбранной системы отсчёта или как пассивное преобразование – параллельный перенос системы отсчёта. *Симметрия физических законов относительно сдвигов в пространстве означает эквивалентность всех точек пространства*, т. е. отсутствие в нём выделенных точек (однородность пространства). Другими словами, физические свойства системы тел и законы движения не изменяются, не зависят от выбора начала координат инерциальной системы отсчёта. Из свойства переносной

симметрии пространства – его однородности следует *закон сохранения импульса*: импульс замкнутой (изолированной) системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени.

2. Поворот системы как целого в пространстве.

Симметрия физических законов относительно этого преобразования означает эквивалентность всех направлений в пространстве (изотропию пространства). Из поворотной симметрии (отсутствия в пространстве выделенных направлений) следует *закон сохранения момента импульса*.

3. Изменение начала отсчёта времени (сдвиг во времени).

Симметрия физических законов относительно этого преобразования означает, что *физические законы не меняются во времени*. Другими словами, время однородно, а это является условием инвариантности физических законов относительно выбора начала отсчёта времени. Из однородности времени следует *закон сохранения механической энергии*.

4. Переход к системе отсчёта, движущейся относительно данной с постоянной по величине и направлению скоростью.

Симметрия физических законов относительно этого преобразования означает *эквивалентность всех инерциальных систем отсчёта*, т. е. все физические законы инвариантны во всех инерциальных системах отсчёта.

Все указанные симметрии физических законов отражают псевдоевклидову геометрию четырёхмерного пространства-времени Минковского.

4.2. Закон сохранения импульса

Импульс частицы (прежнее название этой величины – количество движения), по определению, есть $\dot{\mathbf{p}} = m\dot{\mathbf{v}}$, где m – масса частицы, $\dot{\mathbf{v}}$ – её скорость в рассматриваемой системе отсчёта. Выясним, какая физическая величина ответственна за изменение импульса частицы. Пусть за бесконечно малый промежуток времени dt скорость частицы изменилась на величину $d\dot{\mathbf{v}}$, следовательно, изменение импульса составило $d\dot{\mathbf{p}} = m d\dot{\mathbf{v}}$. Тогда изменение импульса за единицу времени можно записать в виде $d\dot{\mathbf{p}}/dt = m d\dot{\mathbf{v}}/dt = m\dot{\mathbf{a}}$, где $\dot{\mathbf{a}} = d\dot{\mathbf{v}}/dt$ – ускорение частицы. Согласно второму закону Ньютона, правая часть этого выражения равна результирующей силе $\dot{\mathbf{F}}$, действующей на частицу, поэтому

$$d\dot{\mathbf{p}}/dt = \dot{\mathbf{F}}. \quad (4.1)$$

Это уравнение представляет собой другую форму записи второго закона Ньютона; оно означает, что производная по времени от импульса частицы равна действующей силе. В частности, если $\dot{\mathbf{F}} \equiv 0$, то $\dot{\mathbf{p}} = \text{const}$.

Уравнение (4.1) позволяет найти приращение импульса частицы за любой промежуток времени, если известна зависимость силы $\dot{\mathbf{F}}$ от времени. Действительно, из (4.1) следует, что элементарное приращение импульса

частицы за промежуток времени dt есть $d\mathbf{p} = \mathbf{F}dt$. Проинтегрировав это выражение по времени, найдём приращение импульса частицы за конечный промежуток времени t :

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = \int_0^t \mathbf{F}dt. \quad (4.2)$$

Величину, стоящую в правой части этого равенства, называют *импульсом силы*. Таким образом, *приращение импульса частицы за любой промежуток времени равно импульсу силы за то же время*. Если сила $\mathbf{F} = \text{const}$, то вектор \mathbf{F} можно вынести из-под знака интеграла тогда $\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = \mathbf{F}t$.

Пока речь идет об одной частице, понятие импульса ничего нового не вносит. Иначе обстоит дело при переходе к системе частиц. Введём понятие импульса системы как векторную сумму импульсов её отдельных частиц:

$$\mathbf{p} = \sum_i \mathbf{p}_i, \quad (4.3)$$

где \mathbf{p}_i – импульс i -й частицы. Заметим, что импульс системы – величина аддитивная, т. е. импульс системы равен сумме импульсов её отдельных частей независимо от того, взаимодействуют они между собой или нет.

Найдём физическую величину, которая определяет изменение импульса системы. Для этого продифференцируем (4.3) по времени:

$$\dot{\mathbf{p}} / dt = \sum_i \dot{\mathbf{p}}_i / dt .$$

Согласно (4.1),

$$\dot{\mathbf{p}}_i / dt = \sum_k \dot{\mathbf{F}}_{ik} + \dot{\mathbf{F}}_i ,$$

где $\dot{\mathbf{F}}_{ik}$ – силы, действующие на i -ю частицу со стороны других частиц системы (внутренние силы); $\dot{\mathbf{F}}_i$ – сила, действующая на эту же частицу со стороны других тел, не входящих в рассматриваемую систему (внешние силы). После подстановки последнего выражения в предыдущее получим

$$\dot{\mathbf{p}} / dt = \sum_i \sum_k \dot{\mathbf{F}}_{ik} + \sum_i \dot{\mathbf{F}}_i .$$

Двойная сумма справа – это сумма всех внутренних сил. В соответствии с третьим законом Ньютона силы взаимодействия между частицами системы попарно одинаковы по величине и противоположны по направлению. Поэтому сумма всех внутренних сил равна нулю. В результате

$$\dot{\mathbf{p}} / dt = \dot{\mathbf{F}} , \quad (4.4)$$

где $\dot{\mathbf{F}} = \sum_i \dot{\mathbf{F}}_i$ – результирующая всех внешних сил.

Формула (4.4) выражает *закон изменения импульса системы*: производная по времени от импульса системы равна векторной сумме всех внешних сил, действующих на

частицы системы. Как и в случае одной частицы, из формулы (4.4) следует, что приращение импульса системы за конечный промежуток времени t есть

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \int_0^t \vec{F} dt, \quad (4.5)$$

т. е. приращение импульса системы равно импульсу результирующей всех внешних сил за тот же промежуток времени.

Итак, импульс системы могут изменить только внешние силы. В частности, если результирующая всех внешних сил $\vec{F} \equiv 0$, то импульс системы

$$\vec{p} = \sum_i \vec{p}_i(t) = \text{const}. \quad (4.6)$$

Это уравнение выражает *закон сохранения импульса системы*: импульс системы остаётся постоянным, если результирующая всех внешних сил равна нулю.

Отсюда, в частности, следует, что *импульс замкнутой системы есть величина постоянная*. При этом импульсы отдельных частиц (частей) системы могут меняться во времени (что и подчёркнуто в последнем уравнении), однако эти изменения происходят так, что приращение импульса одной части системы в точности равно его убыли в другой части системы.

Закон сохранения импульса (4.6) инвариантен относительно переноса начала координат. Это связано с однородностью свойств пространства, все точки

пространства обладают одинаковыми свойствами. Перенос начала координат изменяет лишь координаты тел, но не изменяет массы тел и их скорости, произведение которых и определяет импульсы тел.

4.3. Закон сохранения энергии

Энергия (от греч. *energeia* – действие, деятельность) – общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Различают *кинетическую энергию* (энергию движения) и *потенциальную энергию* (энергию положения или энергию взаимодействия) частиц. Рассмотрим сначала каждый из видов энергии отдельно.

4.3.1. Работа и кинетическая энергия

Работой силы \vec{F} на бесконечно малом (элементарном) перемещении $d\vec{s}$ называется проекция F_s этой силы на направление перемещения, умноженная на величину самого перемещения:

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha, \quad (4.7)$$

где α – угол между векторами \vec{F} и $d\vec{s}$ (рис. 4.2). Поскольку перемещение $d\vec{s}$ предполагается бесконечно малым, величина dA называется также элементарной работой в отличие от работы на конечном перемещении. Если воспользоваться понятием скалярного произведения, то можно сказать, что *элементарная работа* dA есть скалярное произведение силы \vec{F} на перемещение $d\vec{s}$:

$$dA = \vec{F} d\vec{s}. \quad (4.8)$$

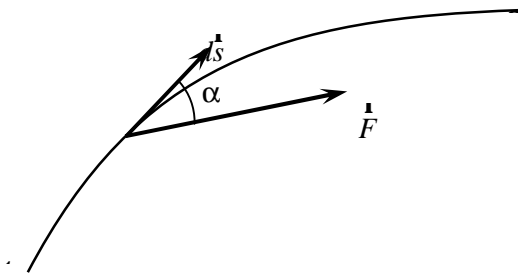


Рис. 4.2. Схематическое изображение вектора силы, действующей на тело, и вектора перемещения на

В общем случае, когда материальная точка, двигаясь по криволинейной траектории, проходит путь конечной длины, можно мысленно разбить этот путь на бесконечно малые элементы, на каждом из которых сила \vec{F} может считаться постоянной, а элементарная работа может быть вычислена по формуле (4.7) или (4.8). Если сложить все эти элементарные работы и перейти к пределу, устремив к нулю длины всех элементарных перемещений, а число их – к бесконечности, то такой предел обозначается символом

$$A = \lim_{ds \rightarrow 0} \sum_i \vec{F}_i d\vec{s}_i = \int_L \vec{F} d\vec{s} \quad (4.9)$$

и называется криволинейным интегралом вектора \vec{F} вдоль траектории L . Этот интеграл, по определению, и даёт работу силы \vec{F} вдоль кривой L .

Подставив в формулу (4.9) $\dot{\mathbf{F}} = d\dot{\mathbf{p}}/dt = m d\dot{\mathbf{v}}/dt$ и $d\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{v}}dt$, придадим этой формуле вид

$$A_{12} = m \int_{v_1}^{v_2} \dot{\mathbf{v}} d\dot{\mathbf{v}} = m \int_{v_1}^{v_2} v dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

где $\dot{\mathbf{v}} d\dot{\mathbf{v}} = v |d\dot{\mathbf{v}}| \cos \gamma = v dv$; $dv = |d\dot{\mathbf{v}}| \cos \gamma$ – проекция приращения скорости $d\dot{\mathbf{v}}$ на направление скорости $\dot{\mathbf{v}}$; γ – угол между векторами $\dot{\mathbf{v}}$ и $d\dot{\mathbf{v}}$; v_1 – начальная, а v_2 – конечная скорости точки. Буква A снабжена индексами 1 и 2, чтобы подчеркнуть, что речь идёт о работе по перемещению материальной точки из начального положения 1 в конечное положение 2 (рис. 4.3). Величина

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} \quad (4.10)$$

называется *кинетической энергией* материальной точки. Учитывая это, работу можно записать в виде

$$A_{12} = K_2 - K_1 = \Delta K. \quad (4.11)$$

Таким образом, работа силы при перемещении материальной точки равна приращению кинетической энергии ΔK этой точки.

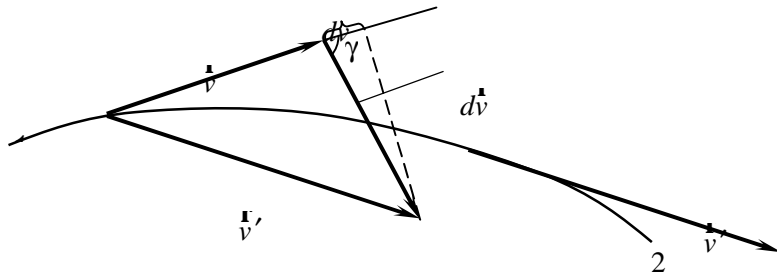


Рис. 4.3. Векторная диаграмма, иллюстрирующая изменение скорости движения тела.

Полученный результат можно обобщить на случай произвольной системы материальных точек. Кинетической энергией системы называется сумма кинетических энергий материальных точек, из которых эта система состоит. Если написать соотношение (4.11) для каждой материальной точки системы, а затем все такие соотношения сложить, то в результате снова получится формула (4.11), но уже не для одной материальной точки, а для системы материальных точек. Под A_{12} надо понимать сумму работ всех сил, как внутренних, так и внешних, действующих на материальные точки системы. Таким образом, *работа всех сил, действующих на систему материальных точек, равна приращению кинетической энергии этой системы.*

4.3.2. Потенциальная энергия

Все силы, встречающиеся в макроскопической механике, принято разделять на консервативные и неконсервативные. *Консервативными* называют такие силы, работа которых на пути между двумя точками не зависит от формы пути, а зависит только от положения этих

точек. Поле сил (область пространства, в каждой точке которого на помещенную туда частицу действует сила, закономерно меняющаяся от точки к точке) в этом случае называют *потенциальным*. К потенциальным полям относятся, например, поля центральных сил. *Центральными силами* называются силы, зависящие только от расстояния между взаимодействующими частицами и направленные по прямой, соединяющей эти частицы. Центральными силами являются гравитационные, кулоновские и упругие силы.

В качестве примера работы консервативной силы рассмотрим работу силы тяжести при переходе материальной точки из положения 1 в положение 2 вдоль произвольной траектории (рис. 4.4):

$$\begin{aligned}
 A_{12} &= \int_1^2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{F} = m \int_1^2 g ds \cos \alpha = -mg \int_{h_1}^{h_2} dh = \\
 &= (mgh_1 - mgh_2) = U_1 - U_2 = -\Delta U, \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

где $dh = -ds \cos \alpha$; $U_1 = mgh_1$ и $U_2 = mgh_2$ – потенциальные энергии частицы на высотах h_1 и h_2 над поверхностью Земли соответственно; $\Delta U = U_2 - U_1$ – изменение (приращение) потенциальной энергии частицы. Знак «-» перед ΔU означает, что работа A_{12} силы тяжести $m\mathbf{g}$ совершена за счет убыли потенциальной энергии частицы. Из формулы (4.12) следует, что работа силы тяжести, являющейся консервативной силой, не зависит от формы пути, а определяется только начальным и конечным положением частицы. Эта работа определяется убылью

потенциальной энергии частицы в поле силы тяжести Земли.

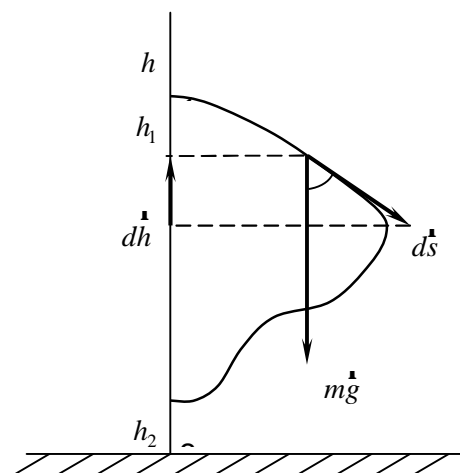


Рис. 4.4. Движение тела в потенциальном поле Земли.

В общем случае, если на систему частиц действуют только консервативные силы, можно для неё ввести понятие потенциальной энергии. Какое-либо произвольное положение системы, характеризующееся заданием координат её материальных точек, условно примем за нулевое. Работа, совершаемая консервативными силами при переходе системы из рассматриваемого положения в нулевое, равна потенциальной энергии системы в первом положении. Работа консервативных сил не зависит от пути перехода, а потому потенциальная энергия системы при фиксированном нулевом положении зависит только от координат материальных точек системы в рассматриваемом

положении. Иными словами, потенциальная энергия системы U является функцией только её координат. В нашем конкретном случае поля силы тяжести Земли потенциальная энергия частицы, находящейся на высоте h над поверхностью Земли, может быть найдена следующим образом (за нулевое значение потенциальной энергии частицы принята энергия частицы при её нахождении на поверхности Земли):

$$U = A_{h0} = -\int_h^0 mgdh = mgh.$$

Можно показать, что работа любых консервативных сил $A_{\text{конс}}$ всегда происходит за счёт *убыли потенциальной энергии*, т. е. $A_{\text{конс}} = U_1 - U_2 = -\Delta U$.

Неконсервативные силы могут совершать как положительную, так и отрицательную работу. К неконсервативным силам, совершающим отрицательную работу, относятся, например, силы трения и сопротивления при движении тела в жидкости или газе. Это обусловлено тем, что направление действия этих сил и направление перемещения тела противоположны ($dA_{\text{неконс}} = \mathbf{F}_{\text{неконс}} \cdot d\mathbf{s} = F_{\text{неконс}} ds \cos 180^\circ = -F_{\text{неконс}} ds$).

4.3.3. Полная механическая энергия

Изменение кинетической энергии частицы будет определяться работой консервативных и неконсервативных сил

$$A_{\text{конс}} + A_{\text{неконс}} = K_2 - K_1 = \Delta K, \quad (4.13)$$

а изменение потенциальной энергии будет обусловлено только работой консервативных сил

$$A_{\text{конс}} = U_1 - U_2 = -\Delta U. \quad (4.14)$$

Тогда, подставляя (4.14) в (4.13), получим

$$\Delta K + \Delta U = \Delta(K + U) = A_{\text{неконс}}. \quad (4.15)$$

Из анализа (4.15) следует, что работа неконсервативных сил идёт на приращение суммы кинетической и потенциальной энергии частицы, которую называют *полной механической энергией* и обозначают буквой E , т. е.

$$E = K + U. \quad (4.16)$$

Итак, из (4.15) и (4.16) следует, что приращение полной механической энергии частицы на конечном перемещении из точки 1 в точку 2 равно работе неконсервативных сил

$$\Delta E = E_2 - E_1 = A_{\text{неконс}}, \quad (4.17)$$

где E_1 и E_2 – полные механические энергии частицы в точках 1 и 2 соответственно.

Формула (4.17) выражает *закон изменения полной механической энергии частицы*: приращение полной механической энергии частицы на некотором пути равно алгебраической сумме работ всех неконсервативных сил, действующих на частицу на том же пути. Если $A_{\text{неконс}} > 0$, то

полная механическая энергия частицы увеличивается, если же $A_{\text{неконс}} < 0$, то уменьшается.

Из закона изменения полной механической энергии частицы следует закон сохранения этой величины. Если на частицу не действуют неконсервативные силы или работа неконсервативных сил на любом перемещении при переходе частицы из точки 1 в точку 2 равна нулю, то полная механическая энергия частицы сохраняется ($E_1 = E_2 = E = \text{const}$), т. е.

$$E = K + U = \text{const} . \quad (4.18)$$

Выражение (4.18), в частности означает, что если на частицу действуют только консервативные силы, то сохраняется сумма кинетической и потенциальной энергии, однако при этом может происходить превращение потенциальной энергии в кинетическую и наоборот.

Закон сохранения полной механической энергии в форме (4.18) может быть записан и для системы частиц, являющейся изолированной, т. е. не взаимодействующей с телами не входящими в систему, при условии, что в системе действуют только консервативные силы.

Закон сохранения энергии остаётся инвариантным (форма его записи остаётся той же самой) при изменении начала отсчёта времени. Это является следствием однородности времени.

Литература к главе 4

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Учебник. – М.: ИКЦ «Маркетинг», Новосибирск: ООО «Издательство «ЮКЭА», 2001. – 832 с.

2. *Савельев И.В.* Курс общей физики: Том 1. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

3. *Сонин А.С.* Постигание совершенства: (Симметрия, асимметрия, диссимметрия, антисимметрия). – М.: Знание, 1987. – 208 с.

4. *Урманцев Ю.А.* Симметрия природы и природа симметрии. – М.: Мысль, 1974. – 229 с.

5. Физический энциклопедический словарь / Гл. редактор *А.М.Прохоров*. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.

Г Л А В А 5

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Термодинамика, являющаяся одним из разделов физики, возникла в первой половине XIX века как теоретическая основа начавшей развиваться в то время теплотехники. В своей основе *термодинамика – это наука о температуре, теплоте и о превращениях теплоты и работы друг в друга*. Термин «термодинамика» впервые в 1854 году ввёл У.Томсон, который это слово писал как «термо-динамика», что в переводе означает «теплота-работа». Термодинамика изучает закономерности теплового движения в равновесных системах и медленные процессы, которые могут рассматриваться как квазиравновесные (как бы равновесные, т. е. сколь угодно близкие к равновесным) состояния, непрерывно следующие друг за другом (классическая или равновесная термодинамика), а также обобщает эти закономерности на неравновесные системы (неравновесная термодинамика или термодинамика необратимых процессов). Рассмотрим основные законы термодинамики.

5.1. Уравнение состояния. Нулевое начало термодинамики

Законы термодинамики описывают поведение так называемых *макроскопических систем*, т. е. тел (твёрдых, жидких или газообразных), состоящих из большого числа

частиц. Равновесное состояние макроскопической системы полностью характеризуется небольшим числом физических параметров. Состояние однородных тел полностью фиксируется заданием любых двух из трёх величин: давления p , объёма V и температуры T . Связь между p , V и T характерна для каждого твёрдого тела, жидкости или газа, она называется *уравнением состояния*. Например, для идеального газа массы m уравнением состояния является уравнение Клапейрона – Менделеева

$$pV = \nu RT ,$$

где $\nu = m/\mu$ – число молей газа массой m ; μ – молярная масса; $R = 8,31$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная.

В основе термодинамики лежат фундаментальные законы (начала), которые являются обобщением многочисленных наблюдений и выполняются независимо от конкретной природы образующих систему тел. Поэтому закономерности в соотношениях между физическими величинами, к которым приводит термодинамика, носят универсальный характер. Обоснование законов термодинамики, их связь с законами движения частиц, из которых построены тела, даётся статистической физикой, задачей которой является выражение свойств макроскопических тел, т. е. систем, состоящих из большого количества частиц (молекул, атомов, электронов и т. п.), через свойства этих частиц и взаимодействие между ними.

Необходимым условием термодинамического равновесия в системе является равенство значений

температуры для всех частей системы. Существование температуры – параметра, единого для всех частей системы, находящейся в термодинамическом равновесии, иногда называют *нулевым началом термодинамики*.

5.2. Первое начало термодинамики

Всякая термодинамическая система состоит из огромного количества частиц. Энергия этих непрерывно движущихся и взаимодействующих между собой частиц называется *внутренней энергией системы*, причем энергия движения системы как целого и потенциальная энергия системы в поле внешних сил во внутреннюю энергию не входят. Существуют два принципиально различающихся способа изменения внутренней энергии системы: первый связан с работой системы по перемещению окружающих тел (или работой этих тел над системой), второй – с сообщением системе теплоты (или с отводом её) при неизменном расположении окружающих тел (или с работой на микро уровне, совершаемой молекулами одного тела над молекулами другого тела при их соприкосновении).

Первое начало термодинамики утверждает, что количество теплоты (тепла) dQ , сообщённое системе, идёт на увеличение её внутренней энергии dU и на совершение системой работы dA , т. е.

$$dQ = dU + dA . \quad (5.1)$$

Если система совершает термодинамический цикл, т. е. в конечном счёте возвращается в исходное состояние, то изменения внутренней энергии не произойдёт и полное

количество тепла, сообщенное системе на протяжении цикла, будет равно совершённой ею работе.

Первое начало термодинамики представляет собой по существу закон сохранения энергии для систем, в которых существенную роль играют тепловые процессы. Это утверждение эквивалентно утверждению о невозможности создания вечного двигателя 1-го рода. Вечный двигатель 1-го рода – это такая машина, которая, будучи однажды запущена в ход, способна работать неопределённо долго и совершать полезную работу, не потребляя энергии извне. Поскольку ни при каком преобразовании энергии нельзя увеличить её количество, а полезная работа в этом случае может совершаться, только расходуя внутреннюю энергию системы, то отсюда и следует невозможность создания такого двигателя.

Первое начало термодинамики позволяет определить энергетический баланс любого процесса, но не указывает на направление протекания этого процесса.

Многочисленные опыты показывают, что в отличие от механического движения все тепловые процессы необратимы. Это означает, что, если реализуется какой-либо термодинамический процесс, то обратный процесс, при котором система проходит те же термодинамические состояния, но в обратном порядке, практически невозможен. Однако, если создать условия, при которых система будет переходить из состояния 1 в состояние 2 бесконечно медленно через последовательность квазиравновесных (почти равновесных) состояний, то такой квазистатический процесс можно считать обратимым. В этом случае при обратном квазистатическом процессе

перехода системы из состояния 2 в состояние 1 система пройдёт в обратном порядке через квазиравновесные состояния, бесконечно близкие к квазиравновесным состояниям при прямом процессе.

5.3. Второе начало термодинамики. Энтропия и её статистический смысл

Запрещая вечный двигатель первого рода, первое начало термодинамики не исключает возможности создания такой машины непрерывного действия, которая была бы способна превращать в полезную работу практически всю подводимую к ней теплоту (так называемый вечный двигатель второго рода). Однако весь опыт по конструированию тепловых машин, имевшийся в начале XIX века, указывал на то, что коэффициент полезного действия (КПД) этих машин (отношение произведённой работы к затраченной теплоте) всегда существенно меньше единицы: часть теплоты неизбежно рассеивается в окружающую среду. Французский учёный С.Карно (1796–1832) в 1824 году показал, что любая тепловая машина должна содержать помимо источника теплоты (нагревателя) и рабочего тела, совершающего термодинамический цикл (например, пара), ещё и холодильник, имеющий температуру более низкую, чем температура нагревателя (рис. 5.1). Максимальное значение КПД идеальной тепловой машины, как показал Карно, определяется температурой нагревателя T_1 и температурой холодильника T_2 , а именно

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где η – коэффициент полезного действия; A – полезная работа, совершённая тепловой машиной за цикл; Q_1 – количество теплоты, взятое у нагревателя; Q_2 – количество теплоты, отданное холодильнику. Из анализа этой формулы следует, что для увеличения КПД тепловой машины необходимо увеличивать температуру нагревателя и уменьшать температуру холодильника.

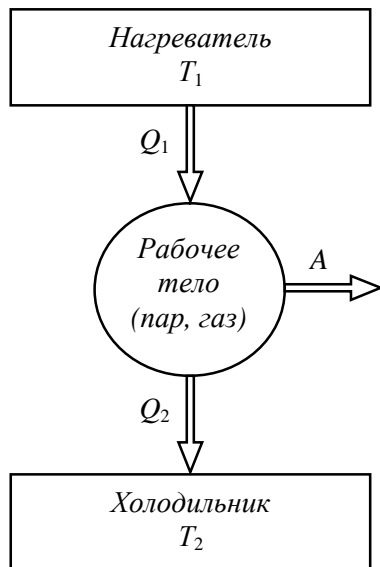


Рис. 5.1. Схема действия тепловой

Обобщение вывода Карно на произвольные термодинамические системы позволило немецкому физiku Р.Клаузиусу (1822–1888) сформулировать в 1850 году второе начало термодинамики в следующем виде: *невозможен процесс, при котором теплота переходила бы*

самопроизвольно от тел более холодных к телам более нагретым. Независимо от Клаузиуса в несколько иной форме этот принцип высказал в 1851 году У.Томсон (лорд Кельвин): *невозможно построить периодически действующую машину, вся деятельность которой сводилась бы к совершению механической работы и соответствующему охлаждению теплового резервуара.* Обе приведенные формулировки второго начала термодинамики, являясь эквивалентными, подчёркивают существенное различие в возможностях реализации энергии, полученной за счёт внешних источников и энергии беспорядочного (теплового) движения частиц тела.

В 1865 году Клаузиус для определения меры необратимого рассеяния энергии ввёл в термодинамику понятие «энтропия» (от греч. entropia – поворот, превращение). Согласно Клаузиусу приращение энтропии dS при квазистатическом процессе (бесконечно медленном процессе, когда система переходит из одного состояния в другое последовательно через цепочку квазиравновесных состояний) определяется так называемой приведённой теплотой dQ/T (dQ – малое количество теплоты, полученное системой; T – абсолютная температура):

$$dS = dQ/T . \quad (5.2)$$

Важность понятия энтропии для анализа необратимых (неравновесных) процессов также была показана впервые Клаузиусом. Для необратимых процессов приращение энтропии больше приведённой теплоты, т. е.

$$dS > dQ/T . \quad (5.3)$$

Из (5.2) и (5.3) непосредственно следует закон *возрастания энтропии*, определяющий направление тепловых процессов: для всех происходящих в замкнутой системе тепловых процессов энтропия системы возрастает; максимально возможное значение энтропии замкнутой системы достигается в тепловом равновесии: $\Delta S \geq 0$ ($\Delta S = S_2 - S_1$ – приращение энтропии при переходе системы из состояния 1 в состояние 2; S_1 и S_2 – значения энтропии в состояниях 1 и 2 соответственно). Данное утверждение принято считать количественной формулировкой *второго начала термодинамики*.

Все естественные процессы происходят так, что вероятность состояния возрастает, это означает переход от порядка к хаосу. Например, если на движущееся тело действуют силы трения, то работа сил трения приведёт к остановке тела, при этом температура тела увеличится. Это означает, что энергия упорядоченного механического движения перешла в энергию хаотического теплового движения. Такой переход сопровождается увеличением энтропии ($\Delta S > 0$). Следовательно, энтропия определяется степенью хаоса в термодинамической системе.

Энтропия связана с «направлением времени». Время несимметрично. Можно вспоминать прошлое, но ничего нельзя сказать о будущем. Эта асимметрия проявляется в классической физике как необратимость, например, тепло перетекает от горячих тел к холодным, но не наоборот; газ, вытекший из сосуда в пустоту, не соберётся самопроизвольно в прежний объём. Возрастание энтропии можно понять как потерю информации о внутренней структуре системы при её эволюции во времени. Эту

потерю информации можно связать с увеличением степени беспорядка в системе, т. е. с необратимостью.

В 1878 году австрийский физик Л.Больцман (1844–1906) истолковал тепловые процессы с позиций молекулярно-кинетической теории и дал их статистическое описание. Он принял, что с ростом температуры системы хаотичность движения её частиц (атомов и молекул) возрастает и, наоборот, с понижением температуры их хаотичность снижается. Так, при увеличении температуры кристаллическое вещество превращается в жидкость и это приводит к увеличению степени хаотичности координат и скоростей атомов. Это означает, что макросостояние системы с повышением температуры может быть реализовано бóльшим числом микросостояний системы. Следовательно, за количественную характеристику теплового состояния системы может быть принято число микроскопических способов, с помощью которых это состояние может быть реализовано. Это число реализаций называется *статистическим весом* или *термодинамической вероятностью состояния*. Обозначим статистический вес греческой буквой Ω .


Поясним смысл понятия статистический вес на следующем примере. Пусть имеется сосуд, в котором находятся всего четыре молекулы, пронумерованные цифрами 1, 2, 3 и 4. Мысленно разделим сосуд на две равные части (левую и правую). Каждая молекула с равной вероятностью может находиться как в левой, так и в правой половине сосуда не зависимо от того пребывают там другие молекулы или нет. Макросостояния данной системы могут быть реализованы рядом различных микросостояний, представленных в таблице 5.1. Макросостояния

различаются числом молекул, находящихся в левой и правой половинах сосуда и не зависят от номера молекул. Микросостояния различаются как числом молекул, находящихся в левой и правой половинах сосуда, так и их номером.

Анализ таблицы, показывает, что данная система может находиться в пяти макросостояниях. Макросостояния, характеризуемые тем, что все молекулы соберутся в левой или в правой половине сосуда, реализуются лишь одним способом на микроуровне. Наибольшее число микросостояний (6) соответствует макросостоянию, у которого в левой и в правой половинах сосуда находятся по две молекулы. Макросостояния, у которых в одной из половинок сосуда находятся по одной молекуле, реализуются четырьмя способами на микроуровне.

В соответствии с *эргодической гипотезой*, лежащей в основе статистической физики, все микросостояния являются равновероятными. Учитывая эргодическую гипотезу, можно утверждать, что классическая вероятность реализации любого макросостояния прямо пропорциональна его статистическому весу, а именно, она определяется отношением числа микросостояний, характеризующих данное макросостояние к полному числу возможных микросостояний. В нашем случае классические вероятности реализации макросостояний, когда в левой половине сосуда будут находиться 4, 3, 2, 1 и 0 молекул, будут равны $1/16$, $4/16$, $6/16$, $4/16$ и $1/16$ соответственно. Из этих данных следует, что наиболее вероятным является макросостояние, когда в левой и в правой половинах сосуда будут находиться по две молекулы.

Таблица 5.1
Способы реализации макросостояния на микроуровне

Макросостояние		Микросостояния, соответствующие конкретному макросостоянию	Статистический вес (Ω)
Число молекул слева	Число молекул справа		
4	0		1
3	1	   	4
2	2	     	6
1	3	   	4
0	4		1

Всего способов реализации макросостояний на микроуровне	$2^4 = 16$
---	------------

Система, предоставленная самой себе, стремится перейти в состояние с бóльшим статистическим весом. Это позволило Больцману дать статистическую трактовку энтропии, а именно, им было установлено, что *энтропия пропорциональна логарифму термодинамической вероятности состояния системы*, т. е.

$$S \sim \ln \Omega . \quad (5.4)$$

Логарифмическая связь между энтропией системы и статистическим весом (термодинамической вероятностью) состояния обеспечивает условие аддитивности энтропии, что легко понять на примере системы, состоящей из двух частей. Энтропия системы в силу аддитивности должна быть равна сумме энтропий её частей: $S = S_1 + S_2$, где S_1 и S_2 – энтропия первой и второй частей системы соответственно. В то же время термодинамическая вероятность системы, состоящей из двух частей с термодинамическими вероятностями Ω_1 и Ω_2 соответственно, равна произведению термодинамических вероятностей частей системы: $\Omega = \Omega_1 \Omega_2$. Тогда из сказанного выше непосредственно следует формула (5.4), а именно, $S = S_1 + S_2 \sim \ln \Omega_1 + \ln \Omega_2 = \ln \Omega$.

В 1906 году М.Планк (1858–1947), основываясь на идеях Больцмана о связи энтропии с термодинамической вероятностью, получил для энтропии следующее выражение

$$S = k \ln \Omega, \quad (5.5)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – коэффициент пропорциональности, который был рассчитан Планком и назван им постоянной Больцмана. Формула « $S = k \ln \Omega$ » выгравирована на памятнике Больцману на его могиле в Вене.

Формула (5.5) является основанием статистического толкования второго начала термодинамики, она помогает предсказать направление эволюции изолированной системы. Согласно Больцману природа стремится перейти из менее вероятных состояний в состояния более вероятные, т. е. фактически из состояний с малыми значениями статистического веса в состояния с большими его значениями, а следовательно, из состояний с малыми значениями энтропии в состояния с её большими значениями.

5.4. Третье начало термодинамики

В 1906 году термодинамика обогатилась новым фундаментальным законом, открытым немецким физиком В.Нернстом (1864–1941) эмпирическим путём. Этот закон получил название тепловой теоремы Нернста, которая не может быть логически выведена из остальных начал термодинамики, а потому её часто называют третьим началом термодинамики. Теореме Нернста можно дать следующую формулировку: при приближении к абсолютному нулю приращение энтропии ΔS стремится к вполне определённом конечному пределу, не зависящему от значений, которые принимают все параметры, характеризующие состояние системы (например, от объёма,

давления, агрегатного состояния и пр.). Теорема Нернста относится только к термодинамически равновесным состояниям систем.

Если условиться энтропию всякой равновесной системы при абсолютном нуле температур считать равной нулю, то всякая неоднозначность в определении энтропии исчезнет. Энтропия, определенная таким образом, называется абсолютной энтропией. Теорема Нернста может быть, следовательно, сформулирована следующим образом. *При приближении к абсолютному нулю абсолютная энтропия системы стремится также к нулю независимо от того, какие значения принимают при этом все параметры, характеризующие состояние системы.*

Понять суть теоремы Нернста можно на следующем примере. При уменьшении температуры газа будет происходить его конденсация и энтропия системы будет убывать, так как молекулы размещаются более упорядоченно. При дальнейшем уменьшении температуры будет происходить кристаллизация жидкости, сопровождающаяся ещё большей упорядоченностью расположения молекул и, следовательно, ещё большим убыванием энтропии. При абсолютном нуле температур всякое тепловое движение прекращается, неупорядоченность исчезает, число возможных микросостояний уменьшается до одного и энтропия приближается к нулю.

5.5. Гипотеза «тепловой смерти» Вселенной

Первое и второе начала термодинамики справедливы для изолированных систем, к числу которых Клаузиус и Томсон относили и Вселенную. Отсюда они пришли к выводу, что все виды энергий во Вселенной «высокого» качества должны перейти в энергию теплового движения (энергию «низкого» качества), которая равномерно распределится по веществу Вселенной, после чего в ней прекратятся все макроскопические процессы и, следовательно, наступит её «тепловая смерть». Этот вывод непосредственно следует из второго начала термодинамики, согласно которому любая физическая система (в том числе и Вселенная), не обменивающаяся энергией, веществом и информацией с другими системами, стремится к наиболее вероятному состоянию – к состоянию с максимумом энтропии.

Проблему будущего развития Вселенной пытался разрешить Больцман, применивший к замкнутой Вселенной понятие флуктуации. Под флуктуацией физической величины понимается случайное отклонение значения этой величины от её среднего значения, обусловленное хаотическим тепловым движением частиц системы. Согласно флуктуационной гипотезе Больцмана Вселенная извечно пребывает в равновесном состоянии, но по закону случая то в одном, то в другом её месте иногда происходят отклонения от этого состояния; они происходят тем реже, чем бóльшую область захватывают и чем значительнее степень отклонения. Флуктуационные отклонения от равновесия, по мнению Больцмана, должны снять проблему необратимой эволюции Вселенной в направлении к хаосу. Однако в связи с ранним уходом Больцмана из жизни

флуктуационная модель развития Вселенной осталась незавершённой.

В настоящее время учёные склоняются к тому, что Вселенная не является замкнутой системой и поэтому применение к ней второго начала термодинамики бессмысленно. Решение проблемы тепловой смерти Вселенной лежит, вероятно, в рамках термодинамики открытых систем. Обмен веществом, энергией и информацией между Вселенной и остальной частью Космоса может замедлить рост энтропии Вселенной или даже привести к её уменьшению, что сделает проблему тепловой смерти Вселенной менее актуальной.

5.6. Термодинамика открытых систем

Первое и второе начала термодинамики, рассмотренные выше, были сформулированы применительно к изолированным системам, т. е. к системам, не взаимодействующим с окружающей средой. Теперь обратимся к неизолрированным системам, обменивающимся с внешней средой веществом, энергией и информацией. Будем исходить из того, что любая неизолрированная система и среда, её окружающая, вместе образуют квазиизолрированную Вселенную. Тогда для Вселенной можно применить второе начало термодинамики, в соответствии с которым изменение энтропии Вселенной не может быть отрицательным, а именно

$$dS_{\text{Всел}} = dS_{\text{сист}} + dS_{\text{сред}} \geq 0, \quad (5.5)$$

где $dS_{\text{Всел}}$ – изменение энтропии Вселенной; $dS_{\text{сист}}$ – изменение энтропии системы; $dS_{\text{сред}}$ – изменение энтропии окружающей среды.

Из (5.5) непосредственно следует, что изменение энтропии системы должно быть больше или равно изменению энтропии окружающей среды с обратным знаком, т. е.

$$dS_{\text{сист}} \geq -dS_{\text{сред}}. \quad (5.6)$$

Анализ (5.6) показывает, что при определённых условиях энтропия системы может, увеличиваться, оставаться неизменной или в отличие от изолированных систем даже уменьшаться. Рассмотрим эти ситуации. Пусть изменение энтропии окружающей среды будет отрицательным ($dS_{\text{сред}} < 0$). Тогда изменение энтропии системы будет положительным ($dS_{\text{сист}} > 0$). Это означает «перетекание» энтропии из окружающей среды в систему, в результате которого в системе имеют место диссипативные процессы, увеличивающие степень хаоса, а в окружающей среде происходит её структурирование.

В случае, когда изменение энтропии окружающей среды равно нулю ($dS_{\text{сред}} = 0$), то возможны два решения: 1) $dS_{\text{сист}} = 0$ – система и среда находятся в равновесном состоянии, что, как следует из (5.5), соответствует равновесному состоянию Вселенной в целом; 2) $dS_{\text{сист}} > 0$ – это решение, по видимому, не имеет физического смысла, так как в этом случае система не находится в равновесном состоянии и, являясь открытой системой, неизбежно должна

обмениваться веществом и/или энергией с окружающей средой, что должно привести к нарушению равновесия в окружающей среде и, следовательно, к изменению её энтропии.

И, наконец, изменение энтропии внешней среды может быть положительным ($dS_{\text{сред}} > 0$), что соответствует преобладанию диссипативных процессов в ней. В этом случае возможны три решения: 1) $dS_{\text{сист}} < 0$ – в системе протекают процессы упорядочения (структурирования); 2) $dS_{\text{сист}} > 0$ – в системе, как и в окружающей среде, преобладают диссипативные процессы; 3) $dS_{\text{сист}} = 0$ – решение не имеет физического смысла, так как система, являясь открытой системой, неизбежно должна обмениваться веществом и/или энергией с окружающей средой, находящейся в неравновесном состоянии, что будет изменять энтропию системы.

Проведённый анализ поведения энтропии в открытой системе показал, что в отличие от изолированной системы, энтропия неизолированной системы может уменьшаться. Это означает, что структура системы становится более совершенной, более упорядоченной. Примером открытой системы, в которой имеет место уменьшение энтропии, может служить система, состоящая из вещества, находящегося в стадии кристаллизации. В процессе кристаллизации происходит структурирование вещества, что и приводит к уменьшению энтропии, так как число реализаций макросостояния на микроуровне уменьшается. Процесс кристаллизации вещества сопровождается передачей тепла в окружающую среду. Это ведёт к

усилению хаотизации в окружающей среде и, следовательно, к увеличению её энтропии.

Другим примером открытых систем, в которых имеет место уменьшение энтропии, являются биологические системы. Например, синтез генетического материала в клетках, который характеризуется очень высоким уровнем молекулярной организации, сопровождается соответствующим уменьшением энтропии системы. Платой за синтез генетического материала, да и за рост и развитие организмов, является увеличение энтропии окружающей среды.

Подробно процессы самоорганизации, происходящие в открытых системах и приводящие к уменьшению энтропии, рассмотрены в главе 11 данной книги.

Литература к главе 5

1. **Ансельм А.И.** Основы статистической физики и термодинамики: Учебное пособие. – М.: Наука, 1973. – 424 с.
2. **Базаров И.П.** Термодинамика: Учебник. – М.: Высшая школа, 1983. – 344 с.
3. **Дубнищева Т.Я.** Концепции современного естествознания: Учебник. – М.: ИКЦ «Маркетинг», Новосибирск: ООО «Издательство «ЮКЭА», 2001. – 832 с.
4. **Кричевский И.Р.** Понятия и основы термодинамики. – М.: Химия, 1970. – 440 с.
5. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Том 1. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
6. Физический энциклопедический словарь / Гл. редактор **А.М.Прохоров**. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.

Г Л А В А 6

КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Электромагнитные взаимодействия играют чрезвычайно важную роль в природе. Благодаря электрическим взаимодействиям ядер и электронов образуются атомы, электрические взаимодействия электронных оболочек атомов приводят к образованию молекул и всего многообразия вещества. Без действия сил электромагнитной природы немислима и жизнедеятельность биологических систем. В развитии представлений об электромагнитных явлениях можно выделить ряд этапов, среди которых открытие существования электрических зарядов и особенностей их взаимодействия; обнаружение магнитного поля движущихся зарядов; создание электромагнитной теории, описывающей с единых позиций как электрические, так и магнитные явления. Рассмотрение концепции электромагнетизма начнём с анализа взаимодействия неподвижных зарядов.

6.1. Взаимодействие зарядов. Основы электростатики

В VII веке до н. э. древнегреческий философ Фалес Милетский описал замеченную ткачихами способность янтаря, потёртого о шерстяную материю, притягивать к себе некоторые лёгкие предметы. Это открытие было расширено лишь две с лишним тысячи лет спустя, в 1600 году, английским врачом В.Гильбертом (1540–1603), который нашёл, что аналогичное свойство приобретают стекло и ряд других веществ, если их потереть о шёлк. Тела,

приведённые в такое состояние, были названы наэлектризованными или дословно «наянтаренными», так как по-гречески «электрон» означает янтарь.

В процессе электризации происходит перераспределение электрических зарядов, которым присущи следующие фундаментальные свойства:

1) электрический заряд существует в двух видах: положительный заряд и отрицательный заряд;

2) электрический заряд квантован. Минимальная порция заряда равна заряду электрона по абсолютной величине. Следовательно, произвольный заряд q определяется как $q = \pm Ne$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; N – целое число;

3) электрический заряд является релятивистски инвариантным: его величина одинакова во всех инерциальных системах отсчета;

4) в любой электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов не изменяется. Это утверждение выражает закон сохранения электрического заряда.

Закон, которому подчиняется сила взаимодействия точечных зарядов, был установлен экспериментально в 1785 году французским учёным Ш.Кулоном (1736–1806). Точечным зарядом называется заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других тел, несущих электрический заряд.

В соответствии с законом Кулона сила взаимодействия между двумя точечными зарядами пропорциональна произведению величин зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{r}_{21}^0, \quad (6.1)$$

где \mathbf{F}_{21} – сила, действующая на заряд q_2 со стороны заряда q_1 (рис. 6.1); r_{21} – расстояние между зарядами; $\mathbf{r}_{21}^0 = \mathbf{r}_{21} / r_{21}$ – единичный вектор ($|\mathbf{r}_{21}^0| = 1$); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

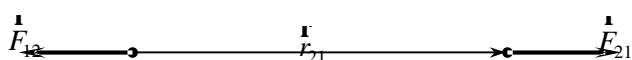


Рис. 6.1. Геометрическое представление взаимодействия двух одноимённо заряженных

Взаимодействие между покоящимися зарядами осуществляется через *электрическое поле*. Всякий заряд изменяет свойства окружающего его пространства – создаёт в нём электрическое поле. Это поле проявляет себя в том, что помещённый в какую-либо его точку электрический заряд оказывается под действием силы. По величине силы, действующей на данный заряд, можно судить об «интенсивности» поля.

Для исследования электрического поля заряда q воспользуемся пробным зарядом $q_{\text{пр}}$. Тогда сила, действующая на заряд, может быть записана в виде

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_{\text{пр}}}{r^2} \mathbf{r}^0, \quad (6.2)$$

где \mathbf{r}^0 – единичный вектор, направленный от заряда q к заряду $q_{\text{пр}}$; r – расстояние между зарядами.

Из формулы (6.2) следует, что отношение силы \mathbf{F} к величине пробного заряда $q_{\text{пр}}$ не зависит от пробного заряда и характеризуется целиком зарядом q :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_{\text{пр}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}^0. \quad (6.3)$$

Эту векторную величину \mathbf{E} называют *напряжённостью электрического поля точечного заряда*. Напряжённость – силовая характеристика электрического поля. Она численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд, находящийся в данной точке. Направление вектора \mathbf{E} совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд. В системе СИ напряжённость электрического поля имеет размерность ньютон/кулон (Н/Кл) или вольт/метр (В/м). Очевидно, что на всякий точечный заряд q в точке поля с напряжённостью \mathbf{E} будет действовать сила $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$.

Напряжённость поля системы зарядов равна векторной сумме напряжённостей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности. Это утверждение носит название *принципа суперпозиции* (наложения) электрических полей.

Кроме силовой характеристики электрического поля существует ещё и энергетическая характеристика, называемая потенциалом. *Потенциал – это скалярная величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, находящегося в данной точке поля:*

$$\varphi = \frac{W_{\text{пот}}}{q}, \quad (6.4)$$

где φ – потенциал электрического поля; $W_{\text{пот}}$ – потенциальная энергия заряда q в конкретной точке пространства.

Потенциал численно равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки на бесконечность. Такую же по величине работу необходимо совершить против сил поля для того, чтобы переместить единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку поля. В системе СИ за единицу потенциала, называемую вольт (В), принимается потенциал в такой точке, для перемещения в которую из бесконечности заряда, равного 1 кулону, нужно совершить работу в 1 джоуль: $1\text{Дж} = 1\text{Кл} \cdot 1\text{В}$ ($1\text{В} = 1\text{Дж}/1\text{Кл}$). Потенциал точечного заряда записывается в виде

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}.$$

Если электрическое поле создаётся несколькими точечными зарядами, то потенциал в любой точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым зарядом в отдельности, как если бы другие заряды отсутствовали.

6.2. Электрический ток. Закон Ома

Прохождение носителей заряда через любую воображаемую поверхность называют электрическим током. Электрический ток может течь в твёрдых телах (металлах, полупроводниках), жидкостях (электролитах) и газах. *Электрический ток обусловлен упорядоченным движением заряженных частиц.* За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов. Электрический ток характеризуется силой тока. *Сила тока есть скалярная величина, численно равная количеству электричества, переносимого через поперечное сечение проводника за единицу времени:*

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (6.5)$$

где I – сила тока; dq – бесконечно малый заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за бесконечно малый промежуток времени dt .

Если за любые равные промежутки времени через любое сечение проводника проходят одинаковые

количества электричества и направление движения зарядов не изменяется, то такой ток называется постоянным и тогда

$$I = \frac{q}{\tau}, \quad (6.6)$$

где τ – промежуток времени, за который через поперечное сечение проводника прошёл заряд q .

В системе СИ единица силы тока является основной. Она носит название ампера (А) и определяется из взаимодействия двух токов. Из равенства (6.6) следует определение единицы заряда

$$[q] = [I] \cdot [\tau] = \text{А} \cdot \text{с} = \text{Кл}.$$

В металлах электрический ток определяется движением электронов, обусловленным действием на них сил со стороны электрического поля. В 1826 году Г.Ом (1787–1854) экспериментально установил закон, связывающий между собой силу тока, напряжение и сопротивление участка цепи. В соответствии с законом Ома *сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению R проводника:*

$$I = \frac{U}{R}. \quad (6.7)$$

Для однородного проводника (проводника, в котором на заряды действуют только электростатические силы) напряжение равно разности потенциалов на концах проводника, а именно, $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Напряжение в данном

случае численно равно работе по перемещению единичного положительного заряда силами электростатического происхождения от точки с потенциалом φ_1 к точке с потенциалом φ_2 .

В случае неоднородного проводника, когда в проводнике на электрические заряды кроме электростатических сил действуют сторонние силы (силы не электростатического происхождения), то напряжение на проводнике кроме разности потенциалов включает ещё и электродвижущую силу (ЭДС): $U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$, где ε_{12} – электродвижущая сила, действующая в проводнике между точками 1 и 2. ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по данному проводнику. Сторонние силы могут иметь различное происхождение, например, в генераторах напряжения – это силы со стороны вихревого электрического (но не электростатического) поля, возникающего при изменении магнитного поля со временем, или это сила Лоренца, действующая со стороны магнитного поля на электроны в движущемся металлическом проводнике; в гальванических элементах и аккумуляторах – это называемые условно «химические» силы и т. д.

Электрическое сопротивление R является по сути дела коэффициентом пропорциональности между напряжением на проводнике и током, протекающим через него. В СИ оно измеряется в омах (Ом). Из уравнения (6.7) следует, что размерность ома будет

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

6.3. Магнитное поле движущихся зарядов

В 1820 году датский физик Х.Эрстед (1777–1851) экспериментально обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку. Было установлено, что когда по проводнику протекает электрический ток, то расположенная поблизости магнитная стрелка поворачивается вокруг своей оси, ориентируясь в направлении перпендикулярном току. Это открытие привело к возникновению новой области физики – электромагнетизма.

Научный мир был вполне готов к восприятию этого открытия. Прошло немного времени и в том же 1820 году французский физик А.Ампер (1775–1836) установил закон взаимодействия токов (закон Ампера). Экспериментально было установлено, что два тонких прямолинейных параллельных проводника, по которым текут токи, притягивают друг друга, если токи в них имеют одинаковые направления, и отталкивают, если токи противоположны (рис. 6.2). *Сила взаимодействия, приходящаяся на единицу длины каждого из параллельных проводников, пропорциональна величинам токов в них I_1 и I_2 и обратно пропорциональна расстоянию b между ними:*

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}, \quad (6.8)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$ – магнитная постоянная.

Выражение (6.8) используется для установления единицы силы тока в международной системе СИ. Единица силы тока в СИ – ампер (А) – определяется как сила неизменяющегося тока, который протекая по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

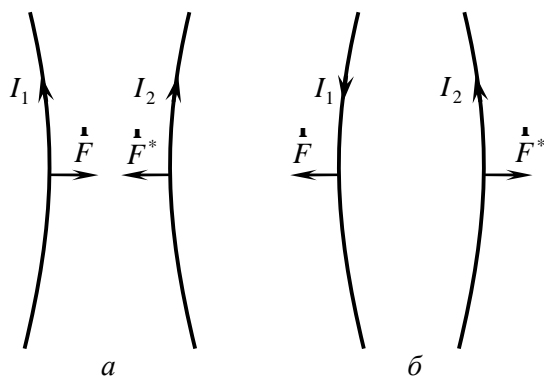


Рис. 6.2. Взаимодействие одинаково направленных (а) и противоположно направленных (б)

В том же 1820 году Ампер разработал основы магнетизма. Согласно теории Ампера магнитные взаимодействия тел сводятся к взаимодействию скрытых в телах так называемых круговых электрических молекулярных токов (рис. 6.3), каждый из которых эквивалентен плоскому магниту – магнитному листку (теорема Ампера). По Амперу, большой магнит состоит из

огромного количества таких элементарных плоских магнитов. Таким образом, взаимодействие между магнитами осуществляется через взаимодействие молекулярных токов, а действие проводника с током на магнитную стрелку обусловлено взаимодействием молекулярных токов внутри магнитной стрелки с током, текущим по проводнику.

Анализируя результаты опытов Эрстеда и Ампера, Фарадей пришёл к выводу, что действие тока на магнитную стрелку и взаимодействие токов осуществляются через *поле*, которое в 1845 году он назвал *магнитным полем*. По Фарадею, магнитное поле, как впрочем и электрическое, представляет собой систему физических силовых линий. Сила передаётся через поле, она является результатом определённого физического процесса, происходящего в среде, разделяющей взаимодействующие объекты. Фарадеевская концепция взаимодействия токов, опирающаяся на представление о существовании в пространстве материального магнитного поля, фактически отрицала господствующий в это время принцип дальнего действия, которого к стати придерживался Ампер, и утверждала принцип ближнего действия. Дальнейшие исследования в этой области подтвердили правоту концепции Фарадея.

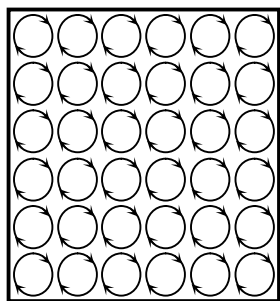


Рис. 6.3. Молекулярные

Экспериментальные исследования поведения электрического заряда в магнитном поле показали, что на заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила, которую назвали магнитной силой или силой Лоренца $\vec{F}_л$. Она определяется зарядом q , его скоростью движения \vec{v} и силовой характеристикой магнитного поля, называемой магнитной индукцией \vec{B} в точке, где находится заряд в рассматриваемый момент времени. Оказывается, что

$$F_л = qvB \sin \alpha , \quad (6.9)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Формула (6.9) может быть использована для определения модуля и размерности индукции магнитного поля, а именно:

$$B = F_л / (qv \sin \alpha) . \quad (6.10)$$

Из (6.10) непосредственно следует, что величина B измеряется в Н/(А·м). Этой единице присвоено наименование тесла, которая в СИ обозначается буквой Т.

С учетом векторного характера величин, входящих в формулу (6.9), будем иметь

$$\vec{F}_л = q[\vec{v} \vec{B}].$$

Сила $\vec{F}_л$ направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} .

Если имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то сила, действующая на движущуюся заряженную частицу, равна сумме силы Кулона $\vec{F}_{кул}$ и силы Лоренца $\vec{F}_л$:

$$\vec{F} = \vec{F}_{кул} + \vec{F}_л = q\vec{E} + q[\vec{v} \vec{B}].$$

Это выражение было получено из опыта Лоренцем и носит название обобщённой силы Лоренца.

Между электричеством и магнетизмом имеется глубокая связь, суть которой раскрывает теория относительности. Деление на электрическое и магнитное поля носит лишь относительный характер. Проиллюстрируем это следующим примером. Пусть в некоторой инерциальной системе отсчёта К заряд q неподвижен. Тогда он создаёт электрическое поле, а магнитное поле будет отсутствовать. В другой инерциальной системе отсчёта К', движущейся относительно К-системы со скоростью \vec{v} , заряд q движется со скоростью $\vec{v}' = -\vec{v}$ и, следовательно, наряду с электрическим полем создаёт и магнитное поле индукции \vec{B} .

6.4. Электромагнитная теория Максвелла

Огромное влияние на формирование научных взглядов Максвелла в процессе создания им электромагнитной теории оказали работы Фарадея. В 1831 году Фарадей обнаружил явление электромагнитной индукции. Суть явления электромагнитной индукции состоит в том, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего поверхность, натянутую на какой-либо контур, независимо от того, чем вызвано изменение потока, в контуре наводится электродвижущая сила, и, как следствие, возникает электрический ток, называемый индукционным током.

Анализируя результаты опытов Фарадея, Максвелл установил, что во всех случаях ЭДС электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадку, ограниченную контуром, т. е. $\epsilon_{\text{инд}} \sim d\Phi/dt$, где $d\Phi$ – приращение потока вектора магнитной индукции через поверхность, натянутую на контур, за бесконечно малое время dt . Магнитный поток Φ через всю поверхность S определяется суммированием элементарных потоков вектора магнитной индукции $\vec{B}d\vec{S} = B dS \cos \alpha$ по этой поверхности (рис. 6.4), т. е. интегрированием:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S},$$

где $d\vec{S}$ – вектор элемента поверхности площадью dS ;
 α – угол между векторами \vec{B} и $d\vec{S}$.

К середине XIX века были уже открыты основные законы электрических и магнитных явлений, и была выдвинута Фарадеем полевая концепция их природы, которая позволила объединить электрическое и магнитное поля в единое электромагнитное поле. Однако концепция электромагнитного поля не была оформлена математически, а это означало, что стройной теории электромагнетизма, которая могла бы с единых позиций объяснять весь круг накопленных к этому времени экспериментальных данных, ещё не существовало. Создать теорию электромагнитного поля удалось Максвеллу, при этом ему пришлось предположить, что не только переменное магнитное поле рождает электрическое поле, но и переменное электрическое поле, в свою очередь, рождает магнитное поле. В завершённом виде теория электромагнитного поля была изложена Максвеллом в работе «Трактат об электричестве и магнетизме», опубликованной в 1873 году.

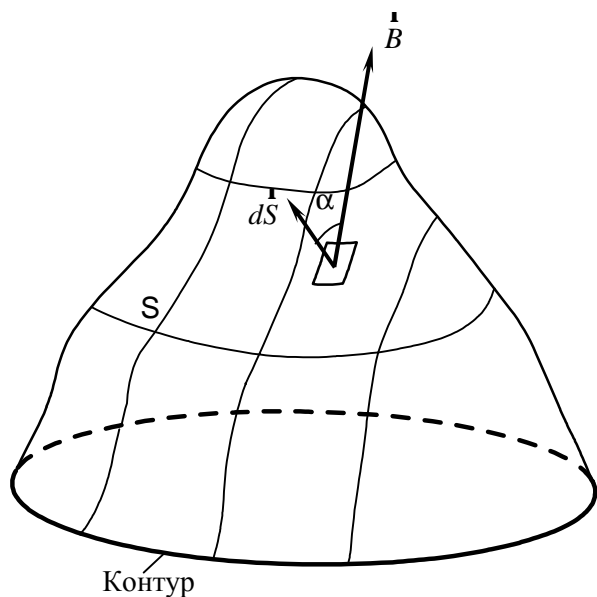


Рис. 6.4. Изображение вектора магнитной индукции \vec{B} в месте расположения элемента $d\vec{S}$ произвольной поверхности S , опирающейся на контур.

Основу электромагнитной теории Максвелла образуют четыре уравнения, которые в интегральной форме имеют следующий вид

$$\oint_{\vec{l}} \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (6.11)$$

$$\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad (6.12)$$

$$\oint_S \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{j} dS + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dS, \quad (6.13)$$

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV, \quad (6.14)$$

где $\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$ – электрическая индукция; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\mathbf{H} = \mathbf{B}/(\mu \mu_0)$ – напряжённость магнитного поля; μ – относительная магнитная проницаемость среды; $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ – плотность электрического тока; σ – удельная электропроводность среды; ρ – объёмная плотность заряда.

Уравнение (6.11) связывает напряжённость электрического поля \mathbf{E} с временным изменением магнитной индукции \mathbf{B} и является по существу выражением закона электромагнитной индукции. Это означает, что изменяющееся во времени магнитное поле рождает вихревое электрическое поле.

Уравнение (6.12) говорит о том, что магнитные заряды не существуют и, следовательно, отражает то свойство вектора магнитной индукции, что его линии замкнуты или приходят из бесконечности и уходят в бесконечность.

Уравнение (6.13) устанавливает связь между плотностью тока проводимости \mathbf{j} и изменяющимся во времени вектором электрической индукции \mathbf{D} с порождаемым ими магнитным полем напряженности \mathbf{H} . Это означает, что не только ток проводимости рождает

магнитное поле, но и изменяющееся во времени электрическое поле.

Уравнение (6.14) говорит о том, что электрические заряды являются источником электрического поля, а это означает, что линии вектора \vec{D} могут начинаться и оканчиваться на зарядах.

Уравнения Максвелла отражают тот факт, что в природе существует единое электромагнитное поле. Деление электромагнитного поля на электрическое и магнитное поле носит относительный характер.

При построении теории электромагнетизма Максвелл полагал, что все электрические и магнитные явления, в том числе и распространение электромагнитных волн, происходят в особой среде, называемой мировым эфиром. Однако модель электромагнитного эфира, используемая Максвеллом, была несовершенна и противоречива, поскольку базировалась на представлении об эфире как о некотором аналоге механической среды. Считалось, что протекание электромагнитных процессов сопровождается механическими изменениями в состоянии эфира (натяжениями, давлением и т. п.). В дальнейшем выяснилось, что для описания различных свойств электромагнитного поля требуются разные модели, противоречащие друг другу. Многие учёные пытались построить непротиворечивую механическую теорию электрических и магнитных явлений. Однако все такие попытки оказались безуспешными. Несостоятельность механических моделей электромагнитных явлений, по видимому, осознал и Максвелл, который в завершённом варианте электромагнитной теории, опубликованном им в

«Трактате по электричеству и магнетизму», уже не использовал механические модели.

Детальные исследования уравнений Максвелла показали, что с их помощью можно объяснить любые известные классические электромагнитные явления, вообще не прибегая к использованию эфира. Например, для распространения электромагнитных волн в пространстве в принципе не требуется никакой среды. Это связано с тем, что если в какой-либо области пространства возникло, например, переменное электрическое поле, то оно создаст в этой области переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, создаст переменное электрическое поле и т. д. Эти переменные и связанные между собой электрическое и магнитное поля как раз и образуют электромагнитную волну, распространяющуюся в пространстве со скоростью света.

6.5. Электромагнитные волны

В случае непроводящей среды ($\dot{j}=0$) систему уравнений (6.11)–(6.14) можно решить относительно векторов напряжённости электрического поля \dot{E} и магнитного поля \dot{H} . Анализ решений показывает, что векторы \dot{E} и \dot{H} являются функциями координат и времени. В случае, когда \dot{E} и \dot{H} зависят только от координаты x , они имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{E}_m \cos(\omega t - kx), \\ \dot{H} &= \dot{H}_m \cos(\omega t - kx),\end{aligned}\quad (6.15)$$

где \dot{E}_m и \dot{H}_m – амплитуды напряжённостей электрического и магнитного полей соответственно, причём модули этих векторов связаны между собой соотношением $\sqrt{\epsilon\epsilon_0}E_m = \sqrt{\mu\mu_0}H_m$; $\omega = 2\pi/T$ – частота колебаний; T – период колебаний; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны (рис. 6.5).

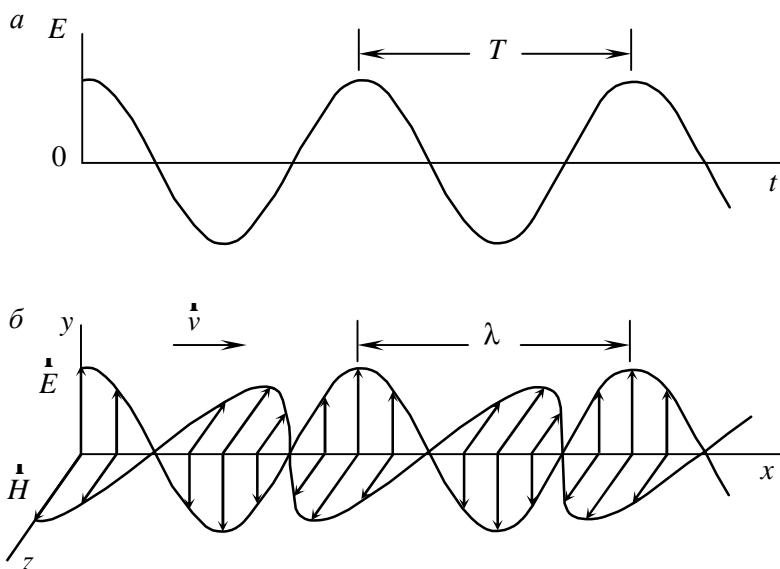


Рис. 6.5. Временная зависимость напряжённости электрического поля (а) и координатная зависимость векторов напряжённостей электрического и

Из (6.15) непосредственно следует, что имеет место распространение электромагнитной волны, так как изменения векторов \dot{E} и \dot{H} происходит по закону

косинуса, аргумент которого зависит линейно от времени и координаты. Если зафиксировать координату и посмотреть как изменяются \vec{E} и \vec{H} со временем, то можно убедиться, что эти изменения происходят по закону косинуса с периодом T (рис. 6.5 а). А если мгновенно сфотографировать в момент времени t распределение векторов \vec{E} и \vec{H} вдоль координаты x , то можно будет убедиться, что эти векторы меняются по координате по закону косинуса с периодом равным длине волны λ (рис. 6.5 б).

Электромагнитная волна является поперечной, так как колебания векторов \vec{E} и \vec{H} происходят в направлениях перпендикулярных направлению распространения, причём эти векторы перпендикулярны друг другу и образуют с вектором скорости \vec{v} распространения волны правую винтовую тройку.

В 1865 году Максвелл выдвинул идею об электромагнитной природе света. Он считал, что свет является одним из видов электромагнитного излучения, которому соответствуют определённый диапазон частот и длин волн. Дальнейшие исследования свойств света подтвердили эту идею Максвелла.

6.6. Волновая оптика

Волновая оптика – это раздел физики, изучающий совокупность явлений, в которых проявляется волновая природа света, а именно, когда свет рассматривается как электромагнитная волна. Вопрос о том, что такое свет интересовал человека издревле и, по мере накопления

экспериментальных данных о его свойствах, менялись и представления о нём. Рассмотрим эволюцию представлений о природе света.

1. Пифагор (~ 580–500 гг. до н. э.) считал, что предметы становятся видимыми благодаря мельчайшим частицам, испускаемым ими и попадающим в глаз наблюдателя.

2. Декарт (1596–1650) полагал, что свет – это сжатие, распространяющееся в идеальной упругой среде (эфире), заполняющей мировое пространство и промежутки между частицами тел.

3. Ньютон (~ 1670 г.) высказал предположение о том, что свет имеет корпускулярную природу.

4. Гюйгенс (~ 1678 г.) сделал попытку объяснить распространение, отражение и преломление света с волновой точки зрения.

5. В период 1807 – 1850 гг. благодаря работам Юнга, Френеля и др. по интерференции и дифракции света, а также опытам Физо и Фуко (1850 г.) по измерению скорости света в веществе ($v < c$), чаша весов склонилась в пользу волновой природы света.

6. Максвелл в 60-е годы XIX века пришёл к заключению, что свет – это электромагнитные волны.

7. Планк в 1900 году, изучая излучение абсолютно чёрного тела, выдвинул гипотезу о том, что свет излучается порциями – квантами, а объяснение фотоэффекта,

сделанное Эйнштейном в 1905 году, было основано на том, что свет не только излучается, но и распространяется, и поглощается также квантами. Частицы света, энергия которых квантована позднее были названы фотонами.

Следовательно, свет, с одной стороны, проявляет волновые свойства (интерференция и дифракция), а с другой – корпускулярные (излучение, фотоэффект и др.), т. е. существует корпускулярно-волновой дуализм природы света. Сначала приступим к изучению волновых свойств света.

Световая волна, как мы уже знаем, представляет собой электромагнитную волну. Длины волн видимого света заключены в пределах 0,40 – 0,76 мкм. Эти значения относятся к световым волнам в вакууме. В световой волне, как и в любой электромагнитной волне, колеблются два вектора – напряженности электрического и напряженности магнитного полей.

Как показывает опыт, физиологическое, фотоэлектрическое, фотохимическое и другие действия вызываются колебаниями электрического вектора. В соответствии с этим в дальнейшем будем рассматривать поведение только вектора напряженности электрического поля. Если будет необходимо иметь информацию о векторе напряженности магнитного поля, то её всегда можно получить, используя систему уравнений (6.15).

Несмотря на то, что световые волны поперечны, они обычно не обнаруживают асимметрии относительно луча (луч – линия вдоль которой распространяется световая энергия). Это обусловлено тем, что в естественном свете

(т. е. свете, испускаемом обычными тепловыми источниками) имеются колебания, совершающиеся в самых различных направлениях, перпендикулярных к лучу. Излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых его атомами. Процесс излучения отдельного атома продолжается около 10^{-8} с. За это время успевает образоваться последовательность горбов и впадин (или, как говорят, цуг волн) протяжённостью примерно 3 м (рис. 6.6 а). «Погаснув», атом через некоторое время «вспыхивает» вновь. Одновременно излучает много атомов. Излучённые ими цуги волн, налагаясь друг на друга, образуют испускаемую телом световую волну. Плоскость колебаний вектора напряжённости в каждом цуге ориентирована случайным образом. Поэтому в результирующей волне колебания различных направлений представлены с равной вероятностью (рис. 6.6 б). Это говорит о том, что в естественном свете колебания вектора напряжённости электрического поля не упорядочены, т. е. отсутствует поляризация волны.

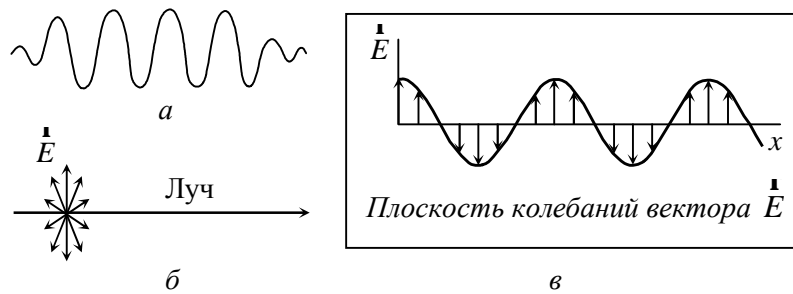


Рис. 6.6. Схематическое изображение цуга волн (а), естественного (б) и плоскополяризованного света (в).

Существуют приборы, называемые поляризаторами, при прохождении через которые световая волна становится поляризованной, т. е. колебания вектора напряжённости электрического поля становятся упорядоченными. В дальнейшем будем рассматривать только так называемые плоскополяризованные волны, у которых колебания вектора напряжённости электрического поля происходят в одной плоскости (рис. 6.6 в).

6.7. Интерференция света

В природе монохроматических волн (волн, имеющих строго фиксированную частоту) не существует. Монохроматические волны – это такие волны, которые должны занимать всё пространство от минус бесконечности до плюс бесконечности и колебания физических величин в них должны длиться бесконечно долго. Однако мы знаем, что излучение волн всегда длится конечное время, т. е. излучаются так называемые *цуги* (отрезки) волн. Это и объясняет отсутствие в природе монохроматических волн.

Вместе с тем любой цуг волн можно представить как суперпозицию монохроматических волн. Это позволяет реальную волну представить в виде суммы некоторого количества монохроматических волн, изучить влияние среды на их поведение, а затем, сложив изменённые взаимодействием со средой монохроматические волны, получить волну, свойства которой будут аналогичны свойствам волны реально взаимодействующей со средой. Таким образом, монохроматические волны являются по сути дела модельными волнами, с которыми удобно работать.

Пусть в некоторую область экрана приходят несколько электромагнитных волн. В этом случае при определённых условиях можно наблюдать устойчивое чередование светлых и тёмных полос, если свет монохроматический, или цветных полос, если свет белый или состоит из волн, имеющих различные частоты. Это имеет место, когда разность фаз колебаний в световых волнах за время наблюдения меняется незначительно (изменение разности фаз гораздо меньше 180°). Такие колебания являются *когерентными* (согласованными). *Явление наложения волн с образованием устойчивой картины максимумов и минимумов называется интерференцией света.*

Первый демонстрационный эксперимент по наблюдению интерференции света был поставлен в 1802 году английским физиком Т.Юнгом (1773–1829). Опыт Юнга выполняется следующим образом (рис. 6.7). Сначала свет направляется на непрозрачную преграду P_1 с узкой щелью, затем свет, прошедший через эту щель, падает на вторую непрозрачную преграду P_2 уже с двумя узкими

близко расположенными щелями, которые фактически являются источниками света с высокой степенью когерентности. Свет от этих двух щелей попадает на экран (Э), на котором и наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся полос различной интенсивности.

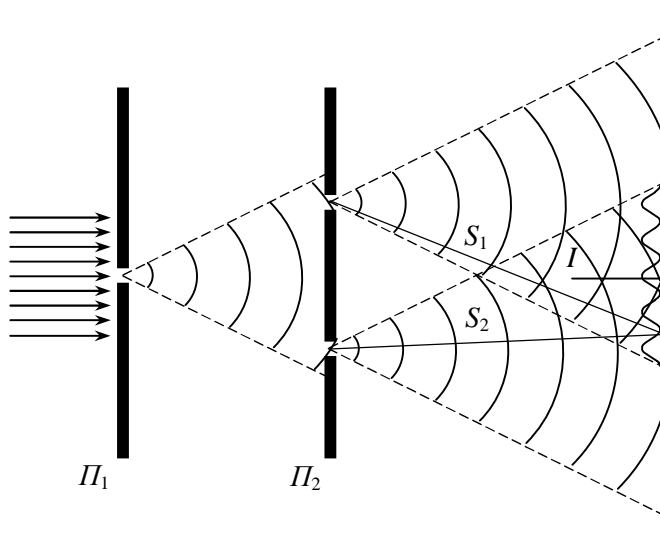


Рис. 6.7. Схематическое изображение установки для проведения опыта Юнга по интерференции света и распределение

Максимумы интенсивности находятся в тех областях экрана, для которых оптическая разность хода кратна целому числу длин волн, а именно, $\Delta = S_2 - S_1 = \pm m\lambda$, где S_1 и S_2 – оптический путь первой и второй волны соответственно, λ – длина волны света, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Это означает, что колебания векторов напряжённости электрического поля в данной области экрана синфазны и, следовательно, интенсивность света будет иметь максимальное значение. Минимумы интенсивности имеются там, где оптическая разность хода кратна полуцелому числу длин волн, т. е. $\Delta = \pm(m + 1/2)\lambda$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). В этом случае колебания векторов напряжённости электрического поля происходят в противофазе и волны гасят друг друга.

6.8. Дифракция света

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых в среде с резкими неоднородностями (границы непрозрачных или прозрачных тел) и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция, в частности, приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени. Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции (наложения) волн. По историческим причинам перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным числом дискретных когерентных источников, принято называть интерференцией волн. Перераспределение интенсивности, возникающее

вследствие суперпозиции волн, возбуждаемых когерентными источниками, расположенными непрерывно, принято называть дифракцией волн.

Наблюдение дифракции осуществляется обычно по следующей схеме. На пути световой волны, распространяющейся от некоторого источника, помещается непрозрачная преграда, закрывающая часть волновой поверхности световой волны. За преградой располагается экран, на котором при определённых условиях возникает дифракционная картина. Рассмотрим в качестве примера дифракцию от щели, когда волновая поверхность ограничена двумя полуплоскостями, расположенными на расстоянии b друг от друга (рис. 6.8). Если экран располагается близко от щели, то, как показывает опыт и теоретические расчёты при выполнении условия $b^2/(l\lambda) \gg 1$ (l – расстояние от щели до экрана; λ – длина волны света), на экране будет наблюдаться чёткое изображение щели, т. е. в этом случае будет выполняться закон прямолинейного распространения света (рис. 6.8 а).

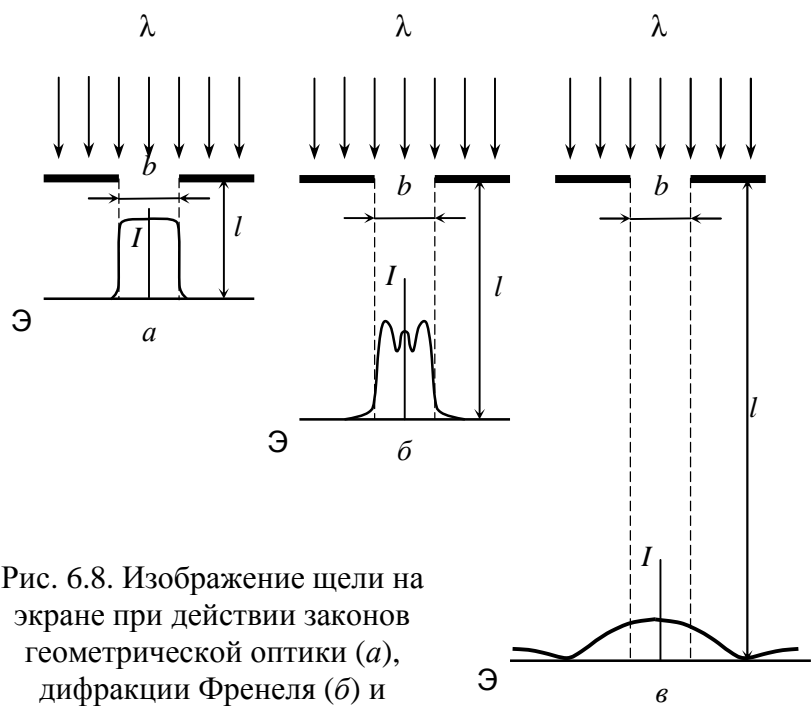


Рис. 6.8. Изображение щели на экране при действии законов геометрической оптики (а), дифракции Френеля (б) и дифракции Фраунгофера (в).

При увеличении расстояния от щели до экрана, когда начинает выполняться условие $b^2/(l\lambda) \sim 1$, граница света и тени на изображении щели становится размытой, а распределение интенсивности света в центральной части изображения щели становится неоднородным, а именно, появляются минимумы и максимумы интенсивности (рис. 6.8 б). Это означает, что дифракция света начинает играть существенную роль, и законы геометрической оптики перестают работать. Дифракция света, имеющая

место при выполнении указанного выше условия, носит название дифракции Френеля.

При дальнейшем увеличении l , когда начинает выполняться условие $b^2/(l\lambda) \ll 1$, в каждую точку на экране приходят почти параллельные лучи от волновой поверхности в области щели и дифракционная картина приобретает иной вид (рис. 6.8 в), она имеет чётко выраженную систему максимумов и минимумов, глубоко заходящих в область геометрической тени. Дифракцию, возникающую при этом условии, называют дифракцией Фраунгофера.

Дифракция ограничивает технические возможности получения геометрически подобных изображений малых объектов. Однако дифракция имеет для практики и полезные свойства. Так, тот факт, что положение дифракционных максимумов на экране зависит от длины волны света, широко используется для анализа его спектрального состава.

Литература к главе 6

1. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики: Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
3. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: Том III. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 688 с.

Г Л А В А 7

КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИИ

Современный прогресс в области естественных и технических наук основан на использовании достижений квантовой теории материи. Квантовая теория является сравнительно молодой наукой, её возраст чуть более ста лет. За столь малый промежуток времени были созданы квантовые теории излучения, элементарных частиц, атомного ядра, атома, молекул, газообразных, жидких и твёрдых веществ. Это в свою очередь создало условия для появления таких новых отраслей промышленности как атомная энергетика, микроэлектроника и др. Рассмотрение квантовой концепции начнём с анализа квантовой природы излучения.

7.1. Корпускулярно-волновой дуализм света и микрочастиц

Изучение явлений интерференции, дифракции, поляризации электромагнитных волн (упорядочения колебаний векторов напряжённостей электрического и магнитного полей) и дисперсии света (круга явлений, в которых важную роль играет зависимость показателя преломления среды от длины волны) привело, как это могло показаться, к окончательному утверждению волновой теории света. Однако при исследовании теплового излучения энергии нагретыми телами, фотоэлектрического эффекта (испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения), рассеяния рентгеновского излучения веществом было установлено, что объяснить эти

явления в рамках электромагнитной теории Максвелла не удаётся.

Разрешить эти противоречия удалось благодаря смелой гипотезе, высказанной в 1900 году немецким физиком М.Планком (1858–1947), согласно которой *излучение света происходит не непрерывно, а дискретно*, т. е. определёнными порциями (квантами), энергия которых определяется частотой ν :

$$\varepsilon = h\nu, \quad (7.1)$$

где ε – энергия кванта; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (квант действия), являющаяся одной из универсальных постоянных в физике.

Гипотеза квантов энергии положила начало новой эры в развитии физики. Это привело к признанию наравне с атомизмом вещества «атомизма» энергии, дискретного, квантового характера излучения, что не укладывалось в рамки представлений классической физики. Давая оценку квантовой теории Планка, Эйнштейн писал: «Именно закон излучения Планка дал первое точное определение абсолютных величин атомов, независимо от других предложений. Более того, он убедительно показал, что, кроме атомистической структуры материи, существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной, введённой Планком. Это открытие стало основой для всех исследований в физике XX века и с того времени почти полностью обусловило её развитие. Без этого открытия было бы невозможно установить настоящую теорию молекул и атомов и энергетических процессов,

управляющих их превращениями. Более того, оно разрушило остов классической механики и электродинамики и поставило перед наукой задачу: найти новую познавательную основу для всей физики».

Развивая идею Планка, Эйнштейн в 1905 году выдвинул гипотезу о том, что *свет не только излучается квантами, но распространяется и поглощается квантами*, и на её основе объяснил фотоэффект. С квантами света стали ассоциировать реальные элементарные частицы, которые были названы в 1929 году американским физико-химиком Г.Льюисом (1875–1946) *фотонами*. Фотон является особой частицей, так как в отличие от других частиц, например, электронов, протонов и т.п. он существует только в движении, причём скорость его движения равна скорости света. Масса покоя фотона равна нулю. Энергия фотонов определяется формулой Планка (7.1), а импульс

$$p = mc = h/\lambda, \quad (7.2)$$

где p – импульс фотона; m – масса фотона; c – скорость света; λ – длина волны.

Исследуя процессы излучения, Эйнштейн в 1909 году установил, что свет одновременно обладает и корпускулярными, и волновыми свойствами, т.е. свету фактически присущ *корпускулярно-волновой дуализм* (двойственность), который нельзя объяснить с позиций классической физики. Таким образом, можно сказать, что свет представляет собой единство противоположных свойств – корпускулярного (квантового) и волнового (электромагнитного), дискретного и непрерывного. К

корпускулярным параметрам, характеризующих свет, относятся энергия и импульс, а к волновым – частота и длина волны. Корпускулярные и волновые параметры связаны между собой через соотношения (7.1) и (7.2).

Следующий шаг в развитии концепции корпускулярно-волнового дуализма был сделан в 1924 году французским физиком Луи де Бройлем (1892–1987). Осознавая существующую в природе симметрию и развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, де Бройль выдвинул смелую гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Он утверждал, что не только фотоны, но и *электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают и волновыми свойствами.*

Согласно де Бройлю, каждому микрообъекту свойственны, с одной стороны, корпускулярные характеристики: энергия E и импульс p , а с другой, – волновые характеристики – частота ν и длина волны λ . Формулы, связывающие корпускулярные и волновые свойства частиц, такие же, как и для фотонов:

$$E = h\nu, \quad p = h/\lambda. \quad (7.3)$$

Смелость гипотезы де Бройля заключалась именно в том, что приведённые формулы постулировались не только для фотонов, но и для других микрочастиц, и в частности для таких, которые обладают массой покоя отличной от нуля. Таким образом, с любой частицей, обладающей импульсом p (7.3), сопоставляется волновой процесс с длиной волны, определяемой формулой де Бройля:

$$\lambda = h / p . \quad (7.4)$$

Гипотеза де Бройля вскоре была подтверждена экспериментально. Американские физики К.Дэвиссон (1881–1958) и Л.Джермер (1896–1971) исследовали в 1927 году отражение электронов от монокристалла никеля и обнаружили, что пучок электронов, рассеянный монокристаллом никеля, являющегося естественной дифракционной решёткой, даёт отчётливую дифракционную картину. Это свидетельствует о волновом характере поведения электронов. Вслед за этим было экспериментально доказано существование волновых свойств у атомов и молекул.

Гипотеза де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме свойств вещества, нашедшая экспериментальное подтверждение, коренным образом изменила представления о свойствах микрообъектов. Всем микрообъектам присущи и корпускулярные, и волновые свойства: для них существуют потенциальные возможности проявить себя в зависимости от внешних условий либо в виде частицы, либо в виде волны.

7.2. Принцип неопределённости Гейзенберга и принцип дополнительности Бора

Согласно классической механике состояние точечного материального объекта в каждый момент времени определяется значениями его координаты, импульса, энергии и т. п. Реальные микрочастицы (электроны, протоны, атомы, молекулы и пр.) проявляют корпускулярно-волновой дуализм, в связи с чем их мгновенное состояние не может характеризоваться точными

заданиями её положения и импульса. Проиллюстрируем это на примере дифракции микрочастиц на щели.

Пусть на преграду со щелью шириной Δx падают микрочастицы с импульсом p (рис. 7.1). Тогда на экране возникнет дифракционная картина, представляющая собой систему светящихся точек от попадания в них микрочастиц. Светящиеся точки на экране будут распределены не равномерно. Плотность вероятности (вероятность попадания микрочастицы в единичный интервал по координате x) будет иметь явно выраженные максимумы и минимумы. Наибольшее число светящихся точек будет приходиться на центральный дифракционный максимум, поэтому все рассуждения будем проводить применительно к этому максимуму. До прохождения через щель составляющая импульса p_x имеет точное значение, равное нулю (щель по условию перпендикулярна к импульсу), так что $\Delta p_x = 0$, зато значение координаты x микрочастицы в силу её волновых свойств является полностью неопределённой.

В момент прохождения частицы через щель положение меняется. Вместо полной неопределённости координаты x появляется неопределённость Δx , но это достигается ценой утраты определённости значения p_x . Действительно, вследствие дифракции имеется некоторая вероятность того, что частица будет двигаться в пределах угла 2φ , где φ – угол, соответствующий первому дифракционному минимуму (максимумами высших порядков, как мы уже говорили выше, можно пренебречь, поскольку их интенсивность мала по сравнению с

интенсивностью центрального максимума). Таким образом, появляется неопределённость Δp_x :

$$\Delta p_x = p \operatorname{tg} \varphi \approx p \sin \varphi. \quad (7.5)$$

Из расчёта дифракционной картины, который мы здесь проводить не будем, следует, что угловое положение первого минимума (края центрального дифракционного максимума) соответствует условию

$$\sin \varphi = \lambda / \Delta x. \quad (7.6)$$

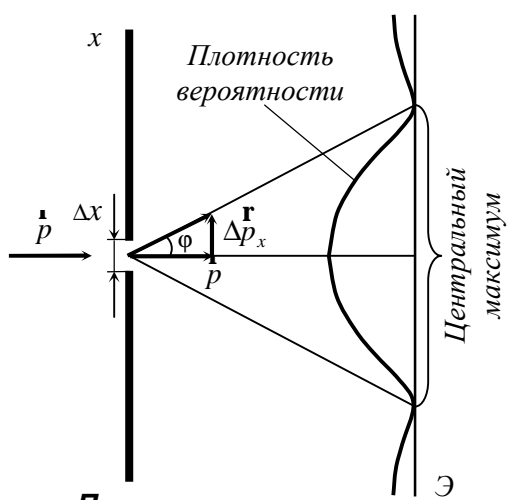


Рис. 7.1. Дифракция микрочастиц на щели.

Из (7.5) и (7.6) с учётом (7.4) непосредственно следует, что произведение неопределённостей координаты и импульса микрочастицы определяется следующим выражением:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h$$

Более строгий подход к получению соотношения, связывающего неопределённости положения микрочастицы и её импульса был проведён в 1927 году немецким физиком В.Гейзенбергом (1901–1976), который получил следующее выражение:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2, \quad (7.7)$$

где $\hbar = h/2\pi$ (h перечёркнутое) – постоянная Планка h , делённая на 2π .

Соотношение (7.7), утверждающее, что *произведение неопределённостей координаты и импульса не может быть меньше $\hbar/2$, называется соотношением неопределённостей Гейзенберга*. Из этого соотношения следует, что чем точнее определяется координата положения микрочастицы в пространстве, тем больше неопределённость значения её импульса и наоборот.

Невозможность одновременно точно определить координату и соответствующую ей составляющую импульса микрочастицы обусловлено её двойственной корпускулярно-волновой природой и никак не связана с несовершенством измерительных приборов или методов измерений. Волна не является точечным объектом, она всегда занимает в пространстве определённую область,

поэтому любое измерение положения частицы, обнаруживающей волновые свойства принципиально сопряжено с неопределённостью. Соотношение неопределённостей Гейзенберга даёт количественные значения этой неопределённости. Оно является критерием применимости классической механики к описанию поведения микрочастиц. Одна и та же микрочастица в одном случае может рассматриваться как классическая частица, а в другом как квантовая. Например, поведение электрона в электронно-лучевой трубке телевизора может быть описано с помощью классической механики, поскольку неопределённость координаты электрона при попадании его на экран трубки не сказывается на качестве изображения. В то же время поведение электрона в атоме не может быть описано с помощью классической механики, так как даже в случае очень большой неопределённости импульса электрона, равной самому импульсу, неопределённость координаты будет порядка размера атома. Это означает, что при нахождении электрона в атоме понятие траектории его движения теряет смысл.

Корпускулярно-волновой дуализм свойств микрочастиц сказывается на их взаимодействии с измерительными приборами при проведении экспериментальных исследований. Так, в одном типе измерительных приборов, например в камере Вильсона, можно наблюдать траекторию движения микрочастицы, что свидетельствует о проявлении её корпускулярных свойств. В другом типе измерительных приборов, таких как дифракционная решётка, микрочастицы проявляют волновые свойства. Однако приборов, в которых можно было бы одновременно наблюдать волновые и корпускулярные свойства микрообъектов не существует.

В 1927 году Бор сформулировал принципиальное положение квантовой механики – *принцип дополнительности*, согласно которому получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих микрообъект (элементарную частицу, атом, молекулу), неизбежно связано с потерей информации о некоторых других величинах, дополнительных к первым. Такими взаимно дополнительными величинами являются, например, координата частицы и её импульс (или скорость), потенциальная и кинетическая энергия и другие.

Рассмотрим простой пример, который хорошо иллюстрирует принцип дополнительности. Бор обратил внимание на очень простой и понятный факт: координату и импульс микрочастицы нельзя измерить не только одновременно, но и с помощью одного и того же прибора. В самом деле, чтобы измерить импульс микрочастицы и при этом не очень сильно его изменить, необходим очень лёгкий подвижный прибор. Но именно эта подвижность приводит к тому, что при попадании в такой прибор микрочастицы его положение будет весьма неопределенно. Для измерения координаты мы должны взять другой, очень массивный прибор, который не сдвинется с места при попадании в него микрочастицы. Но в этом случае произойдёт изменение импульса микрочастицы, которое прибор даже не заметит. Это – простейшая экспериментальная иллюстрация к соотношению неопределённостей Гейзенберга: *нельзя в одном и том же опыте определить обе характеристики микрообъекта – координату и импульс*. Для этого необходимы два измерения и два принципиально разных прибора, свойства которых дополнительны друг к другу.

В соответствии с принципом дополнительности волновое и корпускулярное описание микропроцессов не исключают и не заменяют друг друга, а взаимно дополняют друг друга. Для формирования представления о микрообъекте необходим синтез этих двух описаний. Иногда можно услышать вопрос о том, что же такое микрочастица, например, атом – это волна или частица? Бор показал, что вопрос «волна или частица?» в применении к атомному объекту неправильно поставлен. Таких отдельных свойств у атома нет, и поэтому он не имеет однозначного ответа «да» или «нет». Точно так же, как нет ответа у вопроса «Что больше: метр или килограмм?».

Квантовый объект – это не частица и не волна, и даже ни то, ни другое одновременно. Квантовый объект – это *нечто третье*, не равное простой сумме свойств волны и частицы, – точно так же, как мелодия – больше, чем сумма составляющих её звуков. Это квантовое «нечто» не дано нам в ощущении, и, тем не менее, оно, безусловно, реально. У нас нет образов и органов чувств, чтобы вполне представить себе свойства этой реальности. Однако сила нашего интеллекта, опираясь на опыт, позволяет всё-таки её познать.

Принцип дополнительности впервые был сформулирован для решения конкретных квантовомеханических задач, тем не менее, его применение выходит далеко за рамки непосредственного физического знания. Этот принцип эффективно используется для разрешения противоречий, встречающихся в самых различных областях науки. Принцип дополнительности является научной основой и для решения глобальных проблем, таких как противоречия между

естественнонаучной и гуманитарной культурами, наукой и искусством, противоречия, возникающие в межнациональной, межрелигиозной, социальной и других сферах жизни.

7.3. Вероятностно-статистический характер поведения микрочастиц

В середине 20 годов XX века благодаря научным исследованиям, проведённым Планком, Эйнштейном, Бором, де Бройлем, Гейзенбергом и другими учёными, стало ясно, что микрочастицам так же как и свету свойственен корпускулярно-волновой дуализм. Это накладывает ограничения на применение классической механики для описания поведения микрочастиц, определяемые принципами неопределённости и дополнительности. В соответствие с идеей де Бройля микрочастица характеризуется волной, которую в одномерном случае записывают в следующем виде:

$$\Psi(x,t) = A \exp[-i(\omega t - kx)],$$

где $\Psi(x,t)$ – волна де Бройля; A – амплитуда; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны; ω – циклическая частота; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; t – время; x – координата.

Используя соотношения $\lambda = h/p = 2\pi\hbar/p$ и $\omega = 2\pi\nu = 2\pi E/h = E/\hbar$, выражение для волны де Бройля можно записать в виде, наиболее часто используемом для описания поведения микрочастиц:

$$\Psi(x,t) = A \exp[-(i/\hbar)(Et - px)]. \quad (7.8)$$

Рассмотрим вопрос, связанный с пониманием физической природы волн де Бройля. С этой целью проведём параллельно анализ дифракции света с позиции его корпускулярных свойств (свет – поток фотонов) и дифракции микрочастиц, например, электронов (рис. 7.2). При прохождении фотонов и электронов через щели шириной Δy у этих частиц в соответствии с соотношением неопределённостей Гейзенберга появится разброс поперечных составляющих $\Delta p_y \geq \hbar/(2\Delta y)$. Это означает, что нельзя точно предсказать место на экране, в которое попадут отдельные фотон и электрон. Можно указать лишь относительную вероятность попадания этих частиц в ту или иную область экрана.

Когда через соответствующие щели проходит большое число фотонов и электронов, то датчики, расположенные по всей площади экрана, зафиксируют число частиц попадающих в определённую область экрана. Разделив это число частиц на полное число частиц и на площадь данной области экрана, получим плотность вероятности, т. е. вероятность попадания частицы на единичную площадь поверхности экрана. На рис. 7.2 б и рис. 7.2 г представлены распределения плотности вероятности для центральных дифракционных максимумов.

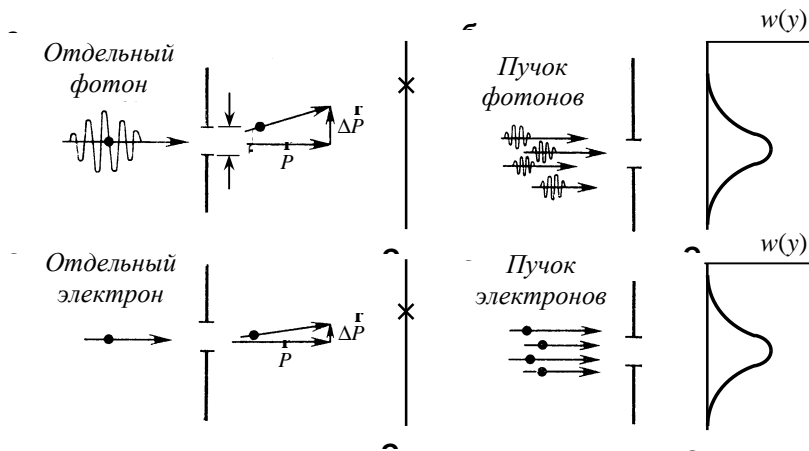


Рис. 7.2. Дифракция фотонов и электронов на щели: *a* – отдельного фотона; *б* – пучка фотонов; *в* – отдельного электрона; *г* – пучка электронов. На рис. *a* и *в* крестиком отмечены места на экране, куда может попасть соответственно фотон и электрон.

Распределение интенсивности света на экране пропорционально распределению плотности вероятности. Действительно, поскольку интенсивность света определяется средней энергией падающей на единичную площадь поверхности экрана за единицу времени, то её можно записать в виде $I = h\nu Nw(y)$, где I – интенсивность света, $h\nu$ – энергия фотона, N – число фотонов, проходящих через щель за одну секунду, $w(y)$ – плотность вероятности, y – координата в вертикальном направлении на экране. В то же время распределение интенсивности света на экране можно объяснить и с волновой точки зрения. В соответствии с теорией Максвелла колебание вектора напряжённости электрического поля в рассматриваемой

области экрана (координаты x , y и z имеют фиксированные значения) может быть записано в виде $\dot{E}(x, y, z; t) = \dot{E}(t) = \dot{E}_m \cos(\omega t + \alpha)$, где α – начальная фаза. Известно, что интенсивность света пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля, усреднённого по времени, а, следовательно, пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля, т. е. $I \sim \langle E^2(t) \rangle \sim E_m^2$. Систематизируя сказанное, можно заключить, что между плотностью вероятности попадания фотона в определённую область экрана, характеризующую корпускулярные свойства света, и квадратом амплитуды напряжённости электрического поля, характеризующим волновые свойства света, существует прямо пропорциональная связь, а именно,

$$w(y) \sim \langle E^2(t) \rangle \sim E_m^2. \quad (7.9)$$

Распределение плотности вероятности попадания электрона в определённую область экрана напоминает распределение плотности вероятности для фотонов и, следовательно, распределение интенсивности света. В 1926 году немецкий физик М.Борн (1882–1970) показал, что плотность вероятности (вероятность найти микрочастицу в единичном объёме пространства) определяется квадратом модуля волны де Бройля (*волновой функции*), т. е.

$$w(x, y, z) = |\Psi(x, y, z; t)|^2 = |A|^2. \quad (7.10)$$

Формулы для плотности вероятности нахождения фотонов (7.9) и микрочастиц (7.10) внешне очень похожи. Однако по сути входящих в неё величин различаются

принципиально. Так, $\dot{E}(x, y, z; t)$ является реальной волной, описывающей распространение в пространстве и во времени электрической составляющей электромагнитного поля, в то время как волновая функция $\Psi(x, y, z; t)$, хотя и описывает состояние микрообъекта на вероятностно-статистическом языке, наглядного физического смысла не имеет. Физический смысл имеет квадрат модуля волновой функции, определяющий вероятность нахождения микрочастицы в том или ином месте пространства.

Развивая идеи де Бройля о волновых свойствах материи, австрийский физик-теоретик Э.Шрёдингер (1887–1961) в 1926 году открыл основное уравнение квантовой механики, описывающее поведение микрочастиц. Оно имеет следующий вид:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

где m – масса частицы; $U = U(x, y, z)$ – потенциальная энергия; $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$ – волновая функция, являющаяся решением уравнения Шрёдингера, которую иногда называют «пси»-функция; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа, действие которого сводится к получению вторых частных производных функции по координатам.

Уравнение Шрёдингера не может быть выведено из других соотношений, оно постулируется. Его справедливость подтверждается согласием всех

вытекающих из него следствий с экспериментальными фактами, что придаёт ему смысл закона природы.

В настоящее время разработан математический аппарат, позволяющий решать уравнение Шрёдингера для различных микрочастиц, например, для электронов в атомах, молекулах и в различных веществах. Решение уравнения Шрёдингера означает нахождение волновых функций электронов и их энергетического спектра (дозволённых значений энергии). Знание волновых функций позволяет рассчитать вероятность нахождения электрона в интересующей области пространства, учитывая, что квадрат модуля волновой функции есть вероятность нахождения электрона в единичном объёме пространства.

В качестве примера рассмотрим поведение электрона в простейшем атоме – атоме водорода. На рис. 7.3 изображена радиальная плотность вероятности основного состояния электрона (вероятность найти электрон в шаровом слое единичной толщины), полученная из решения уравнения Шрёдингера. Видно, что электрон не находится на строго фиксированной орбите, как это следует из теории Бора. Однако следует отметить, что максимум плотности вероятности приходится на расстояние от ядра, соответствующее радиусу боровской орбиты.

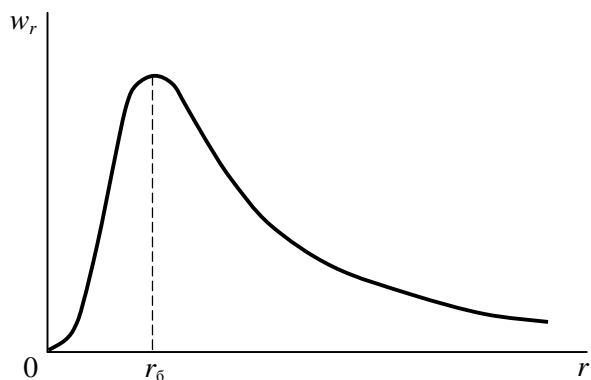


Рис. 7.3. Радиальная плотность вероятности электрона в основном состоянии в атоме водорода (r_0 – радиус боровской орбиты).

7.4. Релятивистская квантовая физика. Физический вакуум

Уравнение Шрёдингера не инвариантно относительно преобразований Лоренца, следовательно, оно не может описать поведение микрочастиц, двигающихся со скоростью близкой к скорости света. На нерелятивистский характер уравнения Шрёдингера в 1927 году обратил внимание английский физик П.Дирак (1902–1984). Описание поведения релятивистских частиц не должно противоречить постулатам специальной теории относительности. В 1928 году Дирак сконструировал уравнение, которое описывало движение электрона с учётом законов квантовой механики и специальной теории относительности, и получил формулу для энергии электрона, которой удовлетворяли два решения: одно решение давало известный электрон с положительной энергией, другое – неизвестный электрон-двойник, но с

отрицательной энергией, а именно энергия свободной частицы имеет вид:

$$E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2},$$

где E , m и p – энергия, масса, и импульс частицы соответственно; c – скорость света в вакууме.

Для покоящейся частицы её энергия, называемая энергией покоя, равна $E = \pm mc^2$. Интервал энергий $-mc^2 < E < mc^2$ является «запрещённым». В квантовой теории поля состояние частицы с отрицательной энергией интерпретируется как состояние античастицы, обладающей положительной энергией, но противоположным электрическим зарядом. Для электрона существование такой античастицы, обладающей положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона, было предсказано в 1931 году Дираком. В 1932 году американский физик К.Андерсон (1905–1991) экспериментально обнаружил такую частицу в космических лучах и назвал её *позитроном*. Так возникло представление о частицах и соответствующих им античастицах, о мирах и антимирах.

Дирак предложил модель «электронно-позитронного вакуума», согласно которой в каждой точке пространства существуют в «виртуальном» («ненаблюдаемом») состоянии электроны и позитроны, которые могут появляться и исчезать лишь парами. Рождение пары может происходить под действием энергии фотона, а может происходить и виртуально, когда после рождения пара, просуществовав недолго, уничтожается – аннигилирует. А сам вакуум определён как физический, в данном случае

фотонный, вакуум, как низшее энергетическое состояние квантованного электромагнитного поля, характеризующееся отсутствием каких-либо реальных частиц. Энергия физического вакуума в среднем равна нулю, но в нём постоянно происходят флуктуации, приводящие к рождению виртуальных электронно-позитронных пар. Существование физического вакуума, в котором постоянно рождается и исчезает огромное количество виртуальных частиц и античастиц, считается экспериментально доказанным.

Физический вакуум оказывает влияние на поведение электронов в атомах. Так, исследуя методом радиоспектроскопии тонкую структуру уровней энергии атома водорода и водородоподобных атомов американские учёные У.Лэмб и Р.Ризерфорд в 1947 году обнаружили так называемый *лэмбовский сдвиг энергетических уровней электронов* по отношению к уровням, рассчитанным с помощью уравнения Дирака. Теоретически лэмбовский сдвиг объяснён в рамках квантовой электродинамики. Основной вклад дают два радиационных эффекта (радиационные поправки): 1) испускание и поглощение связанным электроном виртуальных фотонов, что приводит к изменению эффективной массы электрона и возникновению у него аномального магнитного момента; 2) искажение кулоновского потенциала ядра из-за поляризации вакуума, наполненного виртуально рождающимися и аннигилирующими электрон-позитронными парами. Даже, когда измеряется заряд электрона, то измеряется не «собственный», а эффективный заряд электрона, находящегося в поляризованном облаке виртуальных частиц. Электрон-позитронные пары

экранируют заряд электрона, что приводит к занижению значения заряда электрона при его измерении.

С современной точки зрения *физический вакуум представляет собой совокупность квантовых полей*, характеризующих все виды фундаментальных взаимодействий и находящихся в низших энергетических состояниях. Физический вакуум не является пустым, он представляет собой море рождающихся и тут же гибнущих различных виртуальных пар, каждая из которых состоит из элементарной частицы и соответствующей ей античастицы. Все материальные объекты в той или иной мере взаимодействуют с физическим вакуумом.

7.5. Атомы, молекулы и вещество с точки зрения квантовой теории

Атомы, как известно, состоят из тяжёлого положительно заряженного ядра и лёгких отрицательно заряженных электронов и фактически представляют собой квантовую систему. В связи с этим для описания строения электронных оболочек атома и их поведения во внешних электрических и магнитных полях, при поглощении и излучении электромагнитной энергии, при взаимодействии с другими материальными объектами и т. п. используются законы квантовой механики. Найти возможные значения энергии электронов и их пространственное распределение в атоме удаётся с помощью уравнения Шрёдингера.

Простейшим атомом для решения квантовомеханической задачи является атом водорода, так как он содержит всего один электрон. Решения уравнения Шрёдингера (волновые функции) для атома водорода не

удастся выразить через элементарные математические функции, поэтому эти решения мы будем характеризовать качественно. На рис. 7.4 представлены пространственные распределения плотности вероятности (квадраты модулей волновых функций) для электрона, находящегося в некоторых состояниях. Это фактически объёмные изображения атома водорода, находящегося в различных состояниях. В то же время выражение для возможных значений энергии электрона в атоме водорода имеет простой и наглядный вид:

$$E_n = -\frac{e^4 m}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2},$$

где E_n – энергия электрона на n -ом уровне; $n=1, 2, 3, 4, \dots$ – главное квантовое число; e – заряд электрона по модулю; m – масса электрона.

Из анализа выражения для энергии электрона следует, что энергия квантована, она может принимать лишь вполне определённые дискретные значения, соответствующие квантовому числу n . Энергия электрона в атоме имеет отрицательное значение, так как электрон находится в связанном состоянии, из-за взаимодействия с ядром он не может покинуть атом. Основному состоянию атома водорода соответствует $n=1$. Если атом поглощает фотон, то энергия электрона увеличивается (уменьшается по модулю), он переходит в состояние с бóльшим значением квантового числа n . При излучении фотона атомом, находящимся в возбуждённом состоянии, энергия электрона уменьшается и он переходит в состояние с меньшим значением n .

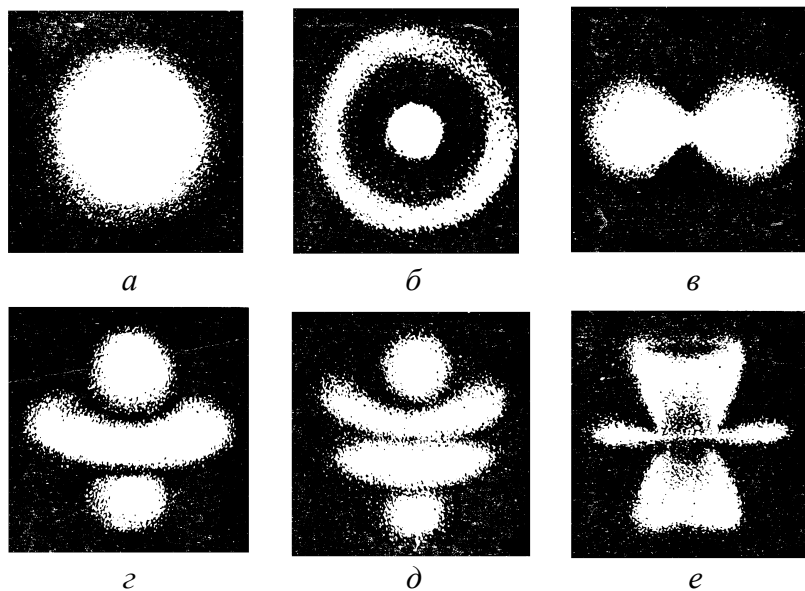


Рис. 7.4. Некоторые из возможных форм электронного облака в атоме водорода: *a* – основное состояние ($n = 1$); *б* и *в* – возбуждённые состояния ($n = 2$); *г* – возбуждённое состояние ($n = 3$);

В многоэлектронных атомах каждый электрон находится не только в электрическом поле ядра, но и в поле других электронов, поэтому его поведение зависит от состояния всех других электронов. Для атомов, имеющих два и более электронов, точное решение уравнения Шрёдингера вообще не может быть получено в аналитическом виде. Такие задачи решаются численными или приближёнными методами.

Решения уравнения Шрёдингера для многоэлектронных атомов показывают, что никаких принципиальных отличий в волновых функциях электронов в таких атомах, а, следовательно, и в пространственном распределении плотности вероятности, по сравнению с аналогичными характеристиками электрона в атоме водорода нет. Энергия электронов также имеет дискретные значения. Некоторые отличия, имеющиеся в волновых функциях и энергиях электронов, обусловлены электрон-электронными взаимодействиями.

В 1869 году Д.И.Менделеев сформулировал закон, впервые объединивший всё многообразие химических элементов в стройную систему, выражающую их внутреннюю взаимосвязь. По Менделееву, свойства атомов, а также формы и свойства соединений элементов находятся в периодической зависимости от величины атомных весов элементов, расположенных в порядке возрастания их атомных весов. Менделеев догадывался и не раз высказывал мысль, что причина периодичности заложена в каких-то закономерностях внутреннего строения атомов. Теперь мы знаем, что причиной периодичности в изменении свойств атомов является послойное заполнение электронами пространства вокруг положительно заряженного ядра, заряд которого в единицах заряда электрона по модулю равен атомному номеру элемента в периодической системе.

При сближении атомов, начиная с некоторых расстояний, они будут взаимодействовать между собой. Волновые функции наиболее удалённых от ядра электронов начинают перекрываться, что приводит к появлению сил притяжения или отталкивания. В случае действия сил притяжения атомы будут объединяться в молекулы.

Молекула (новолат. *molecula* уменьшительное от лат. *moles* – масса) – *наименьшая частица вещества*, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединённых между собой химическими связями.

В самом общем виде причина возникновения химической связи состоит в понижении электронной энергии образующейся молекулы по сравнению с суммой электронных энергий исходных атомов. Электронная энергия молекулы определяется взаимодействием каждого электрона с каждым электроном, каждого ядра с каждым ядром, каждого электрона с каждым ядром. Хотя все электронные взаимодействия в молекулах носят обычный электростатический характер, т. е. по своей природе являются кулоновскими, но вследствие волновых свойств электронов представляют собой взаимодействия не точечных зарядов, а электронных облаков. Это обстоятельство автоматически учитывается при решении уравнения Шрёдингера. Электронная энергия молекулы также как и электронная энергия атомов имеет дискретные значения. Однако полная энергия молекулы в отличие от полной энергии атома включает в себя кроме электронной энергии ещё и энергии колебательного движения ядер и вращательного движения молекулы относительно её центра масс, которые также являются квантованными. Это необходимо учитывать при анализе молекулярных спектров излучения и поглощения.

Квантовая теория объясняет не только свойства отдельных атомов и молекул, но и свойства тел, образованных из этих частиц. Рассмотрим это на примере твёрдых кристаллических тел – тел, в которых частицы (атомы, ионы или молекулы) расположены в

пространственном отношении строго закономерно. Электрические, магнитные, оптические и другие свойства кристаллов во многих случаях целиком определяются состоянием электронов в них. Решая приближёнными методами уравнение Шрёдингера для всех ядер и электронов всех частиц, образующих кристалл, удаётся найти возможные значения энергии электронов в кристалле. Особенностью энергетического спектра электронов в кристалле является то, что дискретные энергетические уровни внешних электронов, одинаковые для всех изолированных атомов, расщепляются и образуют энергетические зоны. Эти зоны состоят из очень близко расположенных энергетических уровней, число которых равно числу атомов в кристалле. На качественном уровне рассмотрим вопрос о причине образования энергетических зон.

Пусть имеется система из N одинаковых изолированных друг от друга атомов, которые имеют одинаковые структуры энергетических уровней электронов. Мысленно начнём постепенно уменьшать межатомные расстояния в системе до образования кристалла. По мере сближения атомов между ними возникает всё усиливающееся взаимодействие. Взаимодействовать начинают прежде всего внешние электронные оболочки соседних атомов. Тогда в соответствии с принципом В.Паули (1900–1958), согласно которому в системе взаимодействующих электронов на каждом энергетическом уровне не может находиться более двух электронов, будет иметь место расщепление энергетических уровней. Вместо N одинаковых уровней, свойственных изолированным атомам, получается зона энергий, содержащая N плотно

расположенных уровней (рис. 7.5). Наиболее сильно расщепляются уровни, занимаемые валентными электронами. Следует отметить, что расщепляются и более высокие в энергетическом отношении уровни, не занятые электронами. Внутренние уровни, заполненные электронами, расположенными ближе к ядру, расщепляются гораздо меньше внешних уровней. Это обусловлено слабым взаимодействием внутренних электронов соседних атомов.

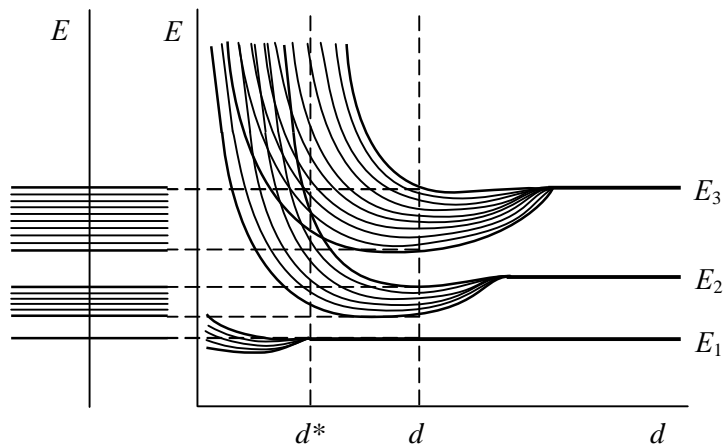


Рис. 7.5. Образование энергетических зон из атомных энергетических уровней (d – межатомное расстояние).

При достаточно малых расстояниях между атомами (d^*) может иметь место перекрывание зон, соответствующих двум соседним энергетическим уровням электрона в атоме. Зоны дозволённых значений энергии разделены промежутками, в которых разрешённых значений энергии нет. Эти энергетические промежутки называются запрещёнными зонами. В зависимости от взаимного расположения энергетических зон и степени их

заполнения электронами вещества классифицируются на металлы, полупроводники и диэлектрики.

Таким образом, можно заключить, что поведение электронов в атомах, связь атомов в молекулах или молекулярных соединениях (так называемая химическая связь), электронные свойства твёрдых тел и т. п. обусловлены корпускулярно-волновым дуализмом электронов и могут быть описаны в рамках квантовой теории. Кратко рассмотрим типы химических связей в молекулах и кристаллах, исходя из особенностей взаимодействия электронных оболочек атомов, образующих эти объекты.

7.6. Типы химических связей

Существование стабильных связей между атомами в молекулах и кристаллах предполагает, что полная энергия молекул и кристаллов меньше полной энергии их атомов в свободном состоянии, когда атомы удалены друг от друга на бесконечные расстояния. Разность этих двух энергий называется *энергией химической связи*. Атомы в молекулах и кристаллах удерживаются почти полностью силами электростатического притяжения между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными ядрами. Роль сил магнитного происхождения весьма незначительна, а гравитационными силами вообще можно пренебречь. Различают следующие основные типы химических связей: 1) ионная или гетерополярная связь, 2) ковалентная или гомеополярная связь, 3) металлическая связь, 4) связь Ван дер Ваальса, 5) водородная связь. Кратко рассмотрим каждый из названных типов связей.

Ионная связь. Этот тип связи обусловлен электростатическим взаимодействием противоположно заряженных ионов. К числу молекул с ионной связью можно отнести KCl , $NaCl$, LiF , MgO и другие, а также кристаллы с аналогичным химическим составом. За счёт электростатического притяжения ионы сближаются, внешние электронные оболочки ионов начинают перекрываться (рис. 7.6), что приводит к возникновению сил отталкивания.

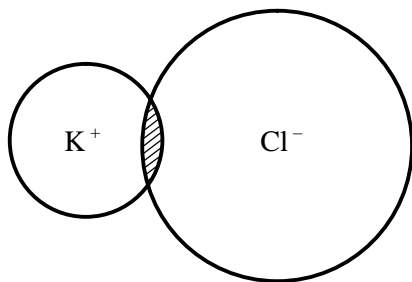


Рис. 7.6. Область перекрытия ионов K^+ и Cl^- , аппроксимированных сферами резко ограниченных радиусов в молекуле KCl .

Отталкивание объясняется взаимодействием электронных оболочек ионов с учётом принципа Паули. Этот тип отталкивания является основным во всех молекулах, кроме самых лёгких (например, H_2). Отталкивание связано также с электростатическим взаимодействием ядер, но для всех молекул, за исключением самых лёгких, оно не является основным. На некотором расстоянии между ядрами силы притяжения уравновешиваются силами отталкивания, при этом энергия

молекулы принимает минимальное значение, что соответствует устойчивому состоянию молекулы.

Ковалентная связь. Ковалентная связь осуществляется посредством обобществления двух валентных электронов (по одному от каждого из двух соседних атомов в молекуле). Пара обобществлённых электронов принадлежит одновременно двум атомам молекулы. Электроны, образующие связь, стремятся к частичной локализации в пространстве между двумя атомами, соединёнными этой связью. В этом смысле ковалентная связь характеризуется явно выраженным свойством направленности. Это хорошо видно на примере молекулы метана CH_4 (рис. 7.7). У атома углерода четыре валентных (внешних) электрона, а каждый из атомов водорода имеет один электрон. Эти восемь электронов сосредоточены главным образом вдоль прямых, соединяющих протоны (ядра атома водорода) с ядром атома углерода.

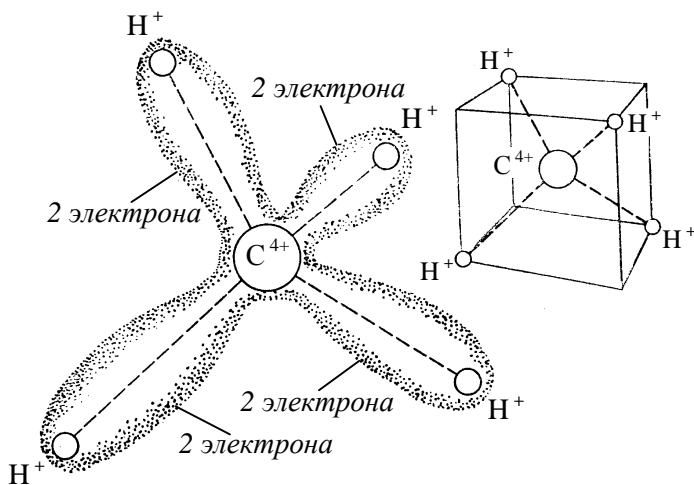


Рис. 7.7. Геометрия молекулы метана. Ядра водорода расположены в вершинах правильного тетраэдра, или в четырёх из восьми вершин куба. Электроны сконцентрированы вдоль прямых углерод – водород.

К образованию ковалентных связей имеют тенденцию атомы III, IV и V групп периодической системы элементов. Так, например, углероду кремнию и германию не хватает четырёх электронов до заполнения их электронных оболочек, и поэтому атомы этих элементов могут притягиваться в основном за счёт перекрытия оболочек. К веществам с ярко выраженной ковалентной связью относятся кристаллы алмаза, кремния, германия, карбида кремния, арсенида галлия и другие. Если кристаллы с ковалентным и ионным типами связи рассматривать как предельные случаи, то между ними имеется ряд кристаллов, обладающих промежуточными типами связи.

Металлическая связь. Металлическая связь реализуется в кристаллах различных металлов и не имеет аналога в двухатомных молекулах. В металлических кристаллах атомы расположены настолько близко, что волновые функции внешних электронов существенно перекрываются. Вследствие этого валентные электроны получают возможность переходить от одного атома к другому и могут довольно свободно перемещаться по всему объёму кристалла. Таким образом, валентные электроны в металле нельзя считать связанными с одним или несколькими ионами металла, они являются общими для всего объёма металла. Поэтому валентные электроны в металлах принято называть «обобществлёнными» или «коллективизированными».

Свободно перемещающиеся электроны в металле во многом напоминают молекулы газа, находящиеся в сосуде. Поэтому для обозначения совокупности свободных валентных электронов внутри металлического кристалла используется термин «электронный газ». Электронный газ, несущий отрицательный заряд, связывает в прочную систему положительно заряженные ионы металла. Без «цементирующего» действия электронного газа одноимённо заряженные ионы металла должны были бы удалиться друг от друга под действием кулоновских сил отталкивания, что привело бы к разрушению кристалла. Таким образом, под влиянием двух противоположных сил – «стягивающего» действия коллективизированных электронов и сил отталкивания между ионами – последние располагаются на определённом расстоянии друг от друга, соответствующем минимуму энергии системы.

Связь Ван дер Ваальса. Вандерваальсова связь – это связь между атомами или молекулами, обусловленная взаимодействием их электрических дипольных моментов. Вандерваальсовы силы взаимодействия возникают между полярными молекулами, обладающими постоянными дипольными моментами, такими как H_2O , HCl и т. д., за счёт поляризации неполярных молекул полярными, а также за счёт создания мгновенных дипольных моментов. Мгновенные дипольные моменты создаются благодаря тому, что электроны и ядра в атомах и неполярных молекулах находятся в постоянном движении. Вследствие этого центры отрицательных и положительных зарядов, вообще говоря, не совпадают. В результате создаётся мгновенный дипольный момент в атоме или молекуле, который своим электрическим полем поляризует соседний атом или молекулу, а это означает появление второго диполя. Взаимодействие диполей приводит к сближению атомов или молекул, в результате электронные оболочки начинают перекрываться и взаимодействовать, что приводит к появлению сил отталкивания, компенсирующих силы притяжения. Это создаёт условия образования кристаллов из нейтральных атомов, например, из инертных газов или неполярных молекул.

Водородная связь. Атом водорода имеет только один электрон, следовательно, он должен обладать одной связью, позволяющей ему вступать в соединение лишь с каким-либо одним атомом другого сорта. Однако при некоторых условиях атом водорода может быть связан значительными силами притяжения одновременно с двумя атомами, образуя тем самым так называемую водородную связь между ними. Принято считать, что водородная связь имеет в основном ионный характер, поскольку она возникает

лишь между наиболее электроотрицательными атомами, в частности между атомами фтора, кислорода и азота. В предельном случае, когда водородная связь носит чисто ионный характер, атом водорода теряет свой единственный электрон и, отдавая его одному из двух атомов молекулы, превращается в протон, который и осуществляет связь между атомами. Малые размеры протона не позволяют ему иметь ближайшими соседями более чем два атома; атомы столь сильно сближены, что на таком малом участке не могут поместиться более чем два атома. Таким образом, водородная связь осуществляется только между двумя атомами (рис. 7.8).

Водородная связь является важнейшей формой взаимодействия между молекулами H_2O и обуславливает вместе с электростатическим притяжением электрических дипольных моментов удивительные физические свойства воды и льда. Водородная связь играет важную роль в химических и биологических процессах. Она, например, обеспечивает полимеризацию фтористоводородных соединений, определяет размеры и геометрическую структуру белковых молекул и играет важную роль в молекулярной генетике, обуславливая отчасти возможность спаривания двух спиралей молекулы ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты).

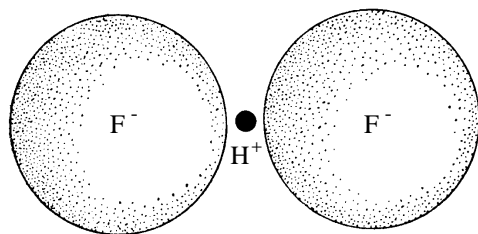


Рис. 7.8. Пример водородной связи между ионами фтора в HF_2^- .
Показан предельный случай, когда связь осуществляется с помощью протона.

Современная квантовая теория не только объясняет строение и свойства атомов, молекул и известных веществ, образованных из них, но и позволяет на основе математического моделирования предсказать строение и свойства гипотетически возможных, но ещё не существующих в природе веществ. Это даёт возможность сокращать сроки разработки новых материалов с необходимыми свойствами и экономить средства за счёт сокращения объёма дорогостоящих натуральных экспериментов.

Литература к главе 7

1. **Пономарёв Л.И.** Под знаком кванта. – М.: Сов. Россия, 1984. – 352 с.
2. **Робертсон Б.** Современная физика в прикладных науках. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
2. **Савельев И.В.** Курс общей физики: Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1979. – 304 с.
3. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики: Том V. Атомная и ядерная физика. Часть I. Атомная физика. – М.: Наука, 1986. – 416 с.
4. Физический энциклопедический словарь / Гл. редактор **А.М.Прохоров**. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
5. **Цюликe Л.** Квантовая химия: Том I. Основы и общие методы. – М.: Мир, 1976. – 512 с.

Г Л А В А 8

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Астрономия является древнейшей наукой, возникшей из практических потребностей человека, связанных с необходимостью определения местоположения на поверхности Земли, счёта времени, предсказания сезонных явлений и других. Термин «астрономия» в переводе с греческого означает науку о законах поведения звёзд (astron – звезда, nómos – закон). В настоящее время астрономия представляет собой науку о строении и развитии любых космических тел, образуемых ими систем и Вселенной в целом.

8.1. Общие представления о Вселенной и её происхождении

С точки зрения современной науки Вселенная – это вся окружающая нас часть материального мира, доступная наблюдению. Вселенная содержит разнообразные типы объектов, различающиеся размерами и массой, – от элементарных частиц, атомов и молекул в малых масштабах до планет, звёзд, галактик, скоплений галактик и дисперсионного вещества (газа, пыли) в больших масштабах, а также физические поля (гравитационное, электромагнитное и др.). В данной главе рассматриваются свойства той части Вселенной, которая окружает планету Земля. Мы будем пользоваться также понятием «космос», который включает в себя весь мир, окружающий планету Земля. В этом смысле Вселенная – доступная часть космоса. Астрономия как наука о строении и развитии космических тел и всей Вселенной включает два раздела: космогонию и

космологию. Космогония – учение о происхождении и эволюции космических тел и их систем (планет и Солнечной системы в целом, звёзд, галактик и т. д.). Космология – учение о Вселенной как целом, основанное на исследовании той её части, которая доступна для астрономических наблюдений. Теоретическим фундаментом современной космологии являются общая теория относительности и квантовая теория поля.

8.1.1. Модели нестационарной Вселенной

Первой космологической моделью Вселенной принято считать модель, созданную в 1917 году Эйнштейном на основе теории гравитации. Эйнштейн вслед за Ньютоном считал, что звёзды по отношению друг к другу находятся в стационарном положении. Но объяснить такое положение звёзд одними силами тяготения затруднительно. Поэтому Эйнштейн модифицировал общую теорию относительности, введя в уравнения так называемую космологическую постоянную, которая должна была в математической форме отобразить наличие сил отталкивания, природа которых оставалась неясной. Фактически он ввёл новую «антигравитационную» силу, которая в отличие от других сил не порождалась каким-либо источником, а была заложена в саму структуру пространства-времени. Эйнштейн утверждал, что пространство-время само по себе всегда расширяется и этим расширением точно уравновешивается притяжение всей остальной материи во Вселенной, так что в результате Вселенная оказывается статической. Данная модель, характеризующая статическую Вселенную, как показали астрофизические наблюдения, оказалась неверной.

Важный шаг в направлении решения космологических проблем сделал в 1922 году профессор Петроградского университета А.А.Фридман (1888–1925). Изучая уравнения общей теории относительности Эйнштейна, Фридман показал, что они приводят к гравитационной неустойчивости Вселенной, т. е. Вселенная не может находиться в стационарном состоянии. В зависимости от средней плотности вещества и излучения во Вселенной возможны три модели её эволюции, получившие название моделей Фридмана.

В первой модели, открытой самим Фридманом, предполагается, что масса вещества и излучения во Вселенной больше некоторой критической. Тогда в соответствии с общей теорией относительности Вселенная должна расширяться, причём скорость расширения оказывается небольшой, что позволяет за счёт работы сил гравитационного притяжения между различными космическими объектами замедлять расширение Вселенной до его полного прекращения. После этого космические объекты начинают приближаться друг к другу, и Вселенная начинает сжиматься. Во второй и третьей модели, когда масса вещества и излучения во Вселенной равна и меньше критической соответственно, Вселенная должна неограниченно расширяться.

Следующий важный шаг в познании строения Вселенной был сделан в 1924 году, когда американский астроном Э.Хаббл (1889–1953) показал, что наша Галактика не единственная. На самом деле существует много других галактик (чётко ограниченных, гравитационносвязанных звёздных систем, расположенных вне нашей Галактики, в то

время называемых туманностями), разделённых огромными областями пустого пространства.

Основываясь на модели расширяющейся Вселенной, бельгийский аббат и учёный Ж.Леметр в 1927 году показал, что в прошлом, когда Вселенная имела минимальные размеры, плотность вещества Вселенной достигала 10^{93} г/см³. Вещество в таком сверхплотном состоянии было названо Леметром протоатомом, а его состояние – сингулярным (от англ. singularity – оригинальность, своеобразие). По каким-то причинам протоатом оказался в неустойчивом состоянии и взорвался, что явилось причиной расширения Вселенной. Концепция эволюции Вселенной, основанная на предположении о взрыве протоатома, получила название концепции *Большого Взрыва*.

В 1929 году Хаббл по красному смещению спектральных линий в спектре излучения галактик обнаружил, что расстояния между галактиками всё время увеличивается. А это означало, что теоретический вывод Фридмана о расширении Вселенной получил экспериментальное подтверждение. Хаббл установил эмпирический закон, согласно которому скорость удаления галактики v прямо пропорциональна расстоянию r до неё, а именно:

$$v = Hr ,$$

где H – постоянная Хаббла.

Из результатов наблюдения расширения Вселенной следует, что скорость разбегания галактик по разным источникам увеличивается на (50 – 100) км/с на каждый

миллион парсек (1 парсек равен 3,26 светового года; световой год – это расстояние, проходимое светом в вакууме за 1 земной год). Тогда постоянная Хаббла должна иметь значения $H = (50 - 100) \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) = (1,6 - 3,2) \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Величина обратная постоянной Хаббла $\tau = 1/H$ называется космологическим временем, определяющим возраст Вселенной. Расчёт τ показывает, что возраст Вселенной составляет приблизительно 10 – 20 млрд лет. Согласно последним исследованиям возраст Вселенной оценивается в 13,7 млрд лет.

В соответствии с моделью Фридмана, основанной на общей теории относительности, в момент Большого Взрыва плотность вещества и кривизна пространства-времени должны быть бесконечными. Это означает, что Вселенная в это время представляет собой сингулярную (особую) точку. При таком условии общая теория относительности неприменима для описания поведения Вселенной. Следовательно, даже если бы перед Большим Взрывом происходили какие-нибудь события, по ним нельзя было бы спрогнозировать будущее, так как в точке Большого Взрыва возможности предсказания свелись бы к нулю. Точно так же, зная только то, что произошло после Большого Взрыва, мы не сможем узнать, что происходило до него. Это даёт основание считать началом отсчёта времени момент Большого Взрыва.

Произведение скорости света на время жизни Вселенной определяет так называемый радиус космологического горизонта, расчёт которого даёт значение равное приблизительно $(1 - 2) \cdot 10^{26} \text{ м}$, причём ежесекундно радиус космологического горизонта увеличивается на $3 \cdot 10^8 \text{ м}$.

Однако эта величина ничтожно мала по сравнению с самим радиусом и должны пройти миллиарды лет, чтобы расширение космологического горизонта стало заметным. Информация о космических объектах, находящихся за космологическим горизонтом, до нас ещё не дошла, поскольку она не может распространяться со скоростью большей скорости света, а это означает, что мы в принципе не можем заглянуть за пределы космологического горизонта.

8.1.2. Модель горячей Вселенной

Очередной важный шаг в понимании эволюции Вселенной был сделан в 1948 году российским учёным Г.А.Гамовым (1904–1968), эмигрировавшим в 1933 г. во Францию, а позже – в США, который предложил модель «горячей Вселенной», назвав её «Космологией Большого Взрыва». В соответствии с современными представлениями считается, что модель горячей Вселенной начинает работать с момента времени $\sim 10^{-36} - 10^{-35}$ с от начала Большого Взрыва, когда температура Вселенной составляла $\sim 10^{29}$ К. Вещество Вселенной представляло собой горячую плазму, состоящую из элементарных частиц.

Природа взаимодействий в области температур 10^{29} К до сих пор далека от понимания. Среди существующих моделей взаимодействий есть такие, которые предсказывают появление лептокварков – частиц, обладающих признаками лептонов и кварков. Считается, что эти частицы могут взаимодействовать между собой таким образом, что появляется избыток вещества над антивеществом. По мере расширения Вселенной понижалась её температура и изменялись физические

характеристики. В период времени от $\sim 10^{-35}$ до $\sim 10^{-10}$ с температура изменилась от $\sim 10^{29}$ К до $\sim 10^{17}$ К. В этот период имело место генерация барионного заряда материи. Эта стадия называется эпохой рождения барионного избытка.

При температурах плазмы $\sim 10^{17} - 10^{16}$ К (10^{-10} с от Большого Взрыва) имел место так называемый электрослабый фазовый переход. До этого момента электромагнитные взаимодействия и слабые взаимодействия являются единым *электрослабым взаимодействием*. В эпоху электрослабого перехода происходит расщепление электрослабого взаимодействия на обычные электромагнитное и слабое взаимодействия.

При понижении температуры до $\sim 10^{12} - 10^{11}$ К (10^{-4} с от Большого Взрыва) кварки начинают объединяться и образуют *протоны и нейтроны*. Этот процесс особенно интенсивно протекает при температуре $\sim 10^{11}$ К. Начиная с этого момента, кварки уже не могут существовать в свободном состоянии. Это явление называется «невылетанием кварков» или *конфайнментом*, а стадия носит название эпохи конфайнмента кварков. В ранней Вселенной, когда её температура была значительно выше данной, протонов и нейтронов не было, а существовал так называемый «кварковый суп», в котором кинетическая энергия кварков значительно превосходила их энергию взаимодействия.

После эпохи образования протонов и нейтронов наступает эпоха первичного нуклеосинтеза. Она была в интервале от 1 с до ~ 200 с, при этом температура Вселенной составляла $\sim 10^{10} - 10^9$ К. В этот период синтезировались

лёгкие ядра, в основном ядра изотопов водорода и гелия, более тяжёлые ядра синтезируются позже в звёздах. Оставшиеся нейтроны распались на протоны, электроны и антинейтрино. Стадия первичного нуклеосинтеза является заключительной стадией, которая относится к ранней Вселенной.

Следующая эпоха, которая играет важную роль в космологии – это эпоха доминирования (преобладания) скрытой материи. Природа скрытой материи до сих пор является неизвестной. Предполагается, что скрытая материя может состоять из массивных нейтрино (нейтрино, обладающих ненулевой массой покоя) и так называемых нейтралино. Эпоха доминирования скрытого вещества наступает примерно через 700 лет от Большого Взрыва при температуре $\sim 10^5$ К. Начиная с этой эпохи, растут малые возмущения плотности вещества, которые увеличиваются настолько, что в итоге появляются галактики, звёзды и планеты.

Вслед за эпохой доминирования скрытой массы через 700 000 лет наступила эпоха рекомбинации водорода. До рекомбинации во Вселенной существовала горячая плазма, состоящая из частиц скрытой материи, протонов, электронов, фотонов и некоторого количества лёгких ядер. Во время рекомбинации протоны и электроны объединяются и образуется водород – один из самых распространённых элементов во Вселенной. Эпоха рекомбинации совпадает с эпохой прозрачности Вселенной. Дело в том, что в плазме свет не распространяется свободно. Фотоны сталкиваются с электронами и протонами, рассеиваются, меняют направление движения и частоту. Другими словами, они «забывают» ту

информацию, которую несли до столкновения. Начиная с эпохи рекомбинации, плазма исчезает и Вселенная становится прозрачной. Температура Вселенной в эту эпоху приходится на интервал 3 000–4 500 К.

В промежутке между эпохой рекомбинации и нашим временем лежит ещё одна важная эпоха – образование крупномасштабной структуры Вселенной или образование сверхскоплений галактик.

По расчётам Гамова, в качестве следов от Большого Взрыва в сегодняшней Вселенной должно сохраниться слабое электромагнитное излучение, соответствующее излучению абсолютно чёрного тела, нагретого всего лишь до 6 К. По предложению И.С.Шкловского, это излучение было названо *реликтовым*, т. е. остаточным от ранних эпох Вселенной.

С развитием астрономических средств наблюдения, в частности, с рождением радиоастрономии, появились новые возможности познания Вселенной. В 1965 г. американские астрофизики А.Пензиас (род. 1933) и Р.Вильсон (род. 1936) экспериментально обнаружили реликтовое излучение, температура которого по современным оценкам составляет 2,752 К, за что были удостоены в 1978 г. Нобелевской премии. Наблюдается реликтовое излучение на волнах длиной от нескольких миллиметров до десятков сантиметров практически изотропно. Наличие изотропного реликтового излучения означает, что Большой Взрыв произошёл не в отдельной, избранной точке космоса (в противном случае оно не приходило бы на Землю со всех сторон), а во всём изначальном космосе. О том, какие события происходили на начальном этапе Большого

Взрыва, даёт представление модель раздувающейся Вселенной.

8.1.3. Модель раздувающейся Вселенной

В 1980 году американский учёный А.Гут высказал предположение о том, что ранняя Вселенная пережила период очень быстрого расширения. Это расширение называют раздуванием или инфляцией (от лат. *inflatio* – вздутие), подразумевая, что какое-то время расширение Вселенной происходило с всё возрастающей скоростью.

Гут предполагал, что Вселенная возникла в результате Большого Взрыва в очень горячем, но довольно хаотическом состоянии. Высокие температуры означают, что частицы во Вселенной должны были очень быстро двигаться и иметь большие энергии. При таких высоких температурах сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия должны были все объединиться в одно. По мере расширения Вселенной она охлаждалась и энергии частиц уменьшались. Это привело к своеобразному фазовому переходу и симметрия сил была нарушена: сильное взаимодействие начало отличаться от электрослабого (слабое и электромагнитное представляли собой ещё единое взаимодействие). Такой переход аналогичен фазовому переходу при замерзании воды. Жидкое состояние воды симметрично, т. е. вода одинакова во всех точках и во всех направлениях. При образовании кристаллов льда появляются выделенные направления и симметрия воды нарушается.

Если охлаждать воду очень осторожно, то её можно «переохладить», т. е. охладить ниже точки замерзания (0°C)

без образования льда. Гут предположил, что Вселенная могла себя вести похожим образом: её температура могла упасть ниже критического значения без нарушения симметрии сил. При этом Вселенная оказывается в нестабильном состоянии с энергией, превышающей ту, которую она имела бы при нарушении симметрии. Показано, что эта особая дополнительная энергия приводит к антигравитационному действию аналогично действию космологической постоянной, которую Эйнштейн ввёл в общую теорию относительности, пытаясь построить статическую модель Вселенной. Поскольку отталкивание в это время превышает гравитационное притяжение, Вселенная должна расширяться (раздуваться) с всё возрастающей скоростью.

Можно ожидать, что при раздувании, в конце концов, нарушается симметрия сил, так же как переохлаждённая вода, в конце концов, замерзает. Тогда лишняя энергия состояния с ненарушенной симметрией должна выделиться, и за счёт этого Вселенная разогреется до температуры приблизительно 10^{29} К. В результате такого фазового перехода прекращают действовать силы отталкивания, а Вселенная хотя и продолжает расширяться, но это расширение идёт уже с замедлением скорости. С этого момента Вселенная начинает эволюционировать так, как это предсказывает модель горячей Вселенной Гамова.

В соответствии с гипотезой Гута фазовый переход происходил очень быстро, как возникают вдруг кристаллы льда в очень холодной воде. Идея Гута заключалась в том, что внутри старой фазы образуются «пузырьки» новой фазы нарушенной симметрии, подобно тому, как в кипящей воде зарождаются пузырьки пара. Гут предположил, что пузыри

расширяются и сливаются друг с другом до тех пор, пока вся Вселенная не окажется в новой фазе. Однако, как показали английский физик-теоретик С.Хокинг и другие учёные, Вселенная должна так быстро расширяться, что даже если бы пузыри росли со скоростью света, они всё равно удалялись бы друг от друга и не могли бы сливаться. Вселенная оставалась бы в очень неоднородном состоянии, и в некоторых областях симметрия между силами сохранялась бы. Такая модель Вселенной не соответствовала бы тому, что мы наблюдаем сейчас.

Наполнить новым содержанием модель раздувания Вселенной удалось в 1983 году российскому физiku А.Д.Линде. Он предложил так называемую хаотическую модель раздувания Вселенной. В ней нет ни фазового перехода, ни переохлаждения, а взамен присутствует квантовое поле, которое из-за квантовых флуктуаций принимает большие значения в некоторых областях ранней Вселенной. В этих областях возникает гравитационное отталкивание, под влиянием которого вышеуказанные области начинают раздуваться. По мере увеличения этих областей энергия поля в них будет медленно уменьшаться, пока раздувание не перейдет в такое же расширение, как в горячей модели Большого Взрыва. Это должно было произойти приблизительно в период $10^{-36} - 10^{-35}$ с от начала раздувания. Одна из областей могла бы превратиться в современную наблюдаемую Вселенную.

Исходным состоянием квантового поля является фактически физический вакуум, в котором постоянно возникают и исчезают виртуальные пары частица – античастица. В результате флуктуаций вакуум переходит в возбуждённое состояние, называемое «ложным вакуумом»,

в котором и возникают гигантские антигравитационные силы отталкивания. Температура вещества в этот момент составляет $\sim 10^{32}$ К. Под действием этих сил, как уже говорилось выше, и началось стремительное раздувание области ложного вакуума – «пузырей пространства», явившихся зародышами одной или нескольких вселенных, и температура вещества при расширении стала понижаться. Формирование пространственно-временных характеристик нашей Вселенной произошло, вероятно, в период с 10^{-43} с по 10^{-42} с. С этого момента принято вести отсчёт стадии инфляции, которая протекала в период от 10^{-42} с до 10^{-36} с.

Ложный вакуум неустойчив, он распадается, исчезает отталкивание и скорость расширения Вселенной из-за действия гравитационного притяжения начинает замедляться. С распадом ложного вакуума вся запасённая в нём потенциальная энергия выделяется в виде рождения частиц и их кинетической (тепловой) энергии. Образуется горячая плазма, состоящая из элементарных частиц с температурой $\sim 10^{29}$ К, что соответствует кинетической энергии частиц $\sim 10^{16}$ ГэВ. Другими словами, с окончанием эпохи инфляции рождается обычная материя, эволюция которой с этого времени происходит в соответствии с моделью горячей Вселенной.

8.2. Звёзды и галактики

В эпоху доминирования тёмной материи, как отмечалось выше, начали интенсивно расти малые возмущения плотности вещества, из которых в дальнейшем образовались галактики, звёзды и планеты. Этот процесс мог протекать следующим образом. Вся Вселенная как

целое продолжала расширяться и охлаждаться, но в тех областях, плотность которых была немного выше средней, расширение замедлялось из-за дополнительного гравитационного притяжения. В результате некоторые области перестали расширяться и начали сжиматься.

В процессе сжатия под действием гравитационного притяжения материи, находящейся снаружи этих областей, могло начаться их медленное вращение. С уменьшением размеров коллапсирующей (сжимающейся) области её вращение ускорялось. Когда наконец коллапсирующая область стала достаточно малой, скорость её вращения стала настолько большой, что центробежная сила инерции, обусловленная вращением, могла уравновесить силу гравитационного притяжения – так образовались вращающиеся дискообразные галактики. Те области, которые не начали вращаться, превратились в овальные объекты, называемые эллиптическими галактиками. Коллапс этих областей тоже прекратился, потому что отдельные части галактики пришли к состоянию стабильного вращения вокруг её центра (силы гравитации в этих областях уравновешены центробежными силами инерции), хотя галактика как целое не вращалась.

Газ внутри галактик, состоящий из водорода и гелия, со временем распался на газовые облака меньшего размера, сжимающиеся под действием собственной гравитации. При сжатии этих облаков атомы внутри них сталкивались друг с другом, температура газа повышалась и, в конце концов, газ разогрелся так сильно, что начались реакции термоядерного синтеза. Критической температурой, при которой начинается первый цикл реакции ядерного синтеза можно считать температуру $\sim 10^9 - 10^{10}$ К. Положительно

заряженные протоны при этой температуре начинают обладать настолько большой кинетической энергией, что она обеспечивает им при столкновении возможность преодоления сил взаимного электростатического отталкивания и включения механизма сильного взаимодействия между ними. В результате из каждой пары столкнувшихся протонов и присоединившихся к ним двух нейтронов образуется ядро гелия. С этого момента времени иногда ведут отсчёт возраста звезды.

В результате этих реакций из водорода образовалось дополнительное количество гелия, а из-за выделившегося тепла возросло давление и газовые облака перестали сжиматься. Облака долго оставались в этом состоянии, подобно таким звёздам, как наше Солнце, превращая водород в гелий и излучая выделяющуюся энергию в виде тепла и света.

Длительность первого цикла термоядерного синтеза, связанного со сгоранием водорода и превращением его в гелий, составляет наиболее продолжительную и стабильную фазу существования звезды. Синтезируемый при этом гелий скапливается в центре звезды, образуя так называемое гелиевое ядро, в котором снова начинают действовать рассмотренные выше процессы сжатия, приводящие к дальнейшему повышению плотности, давления и температуры.

С повышением температуры начинается второй цикл термоядерного синтеза, при котором столкновения высокоэнергетических ядер гелия, минуя ряд последовательных превращений, приводят к образованию углерода. Внешним проявлением начала второго цикла в

жизни звезды служит так называемая гелиевая вспышка большой яркости, в результате которой размеры звезды увеличиваются под действием излучаемой энергии в 200–300 раз. Температура внешних слоёв увеличивающейся звезды снижается, и «раздувшаяся» звезда, приобретая красноватый цвет, переходит в разряд так называемых – красных гигантов. Предполагается, что наше Солнце станет красным гигантом примерно через 5 млрд лет, при этом его эволюция к стадии красного гиганта приведёт к тому, что оно сначала сожжёт Землю из-за огромного количества выделившейся энергии, а затем в результате гигантского расширения поглотит её останки. Эта фаза развития, связанная со сгоранием гелия, является сравнительно быстротекущей и составляет всего лишь около 15% от общего времени существования звёздного объекта.

В дальнейшем температура центральной части звезды продолжает стремительно увеличиваться, что приводит к синтезу ядер не только лёгких, но и средних, и тяжёлых элементов. Наконец, при достижении температуры, при которой происходит синтез железа, энерговыделение резко сокращается, а возросшая плотность центральной части оказывается настолько большой, что энергии излучения уже оказывается недостаточно, чтобы противостоять силам гравитационного сжатия. Центральная область звезды, стремительно уменьшаясь в размерах, может при определённых условиях оторваться от приповерхностных разреженных слоёв с образованием мощной ударной волны обратного действия. В результате этого часть вещества может быть выброшена в межзвёздное пространство.

Термоядерные источники энергии красного гиганта начинают истощаться, и последующая судьба таких

звёздных объектов зависит от их массы. В соответствии с общей теорией относительности возможны следующие основные варианты эволюции красных гигантов.

При массе звезды менее 1,4 массы нашего Солнца процесс сжатия её центральной части протекает сравнительно спокойно и звезда постепенно переходит в стационарное состояние с очень высокой плотностью вещества и высокой температурой. Такие звёзды называются *белыми карликами*. За счёт запаса тепловой энергии они могут излучать ещё долгое время (в течение нескольких миллиардов лет). Остывание звезды сопровождается выбросами её оболочки. Сброшенные поверхностные слои оболочки, окружающие белый карлик, образуют так называемую планетарную туманность. По мере остывания звезда изменяет свой цвет от белого к жёлтому, затем к красному и, наконец, перестаёт излучать, превращаясь в *чёрный карлик* с низкой температурой. Размер чёрного калика обычно меньше размера Земли, а масса сравнима с массой Солнца.

Эволюция звезды с массой более 1,4 массы Солнца происходит иначе. Без протекания термоядерных реакций такая звезда не может находиться в стационарном состоянии, так как давление без дополнительного притока энергии уже не может уравновесить действие силы тяготения. Гравитационное сжатие центральной части такого объекта происходит с огромной скоростью, практически скачкообразно. На определённом этапе такого сжатия возникают силы отталкивания и происходит мощный взрыв – вспышка *сверхновой звезды* с выбросом значительной части вещества звезды в окружающее пространство с образованием газовых туманностей. За

краткие мгновения такого ударного сжатия вещества и последующего взрыва в ядре звезды успевает пройти термоядерный синтез всех тяжёлых химических элементов, следующих за железом. Взрывы сверхновых звёзд имеют важное значение для обмена веществом между звёздами и межзвёздной средой, для распространения химических элементов во Вселенной.

В случае неполного разрушения ядра сверхновой звезды при её взрыве оставшаяся часть сверхплотного вещества может представлять собой один из двух возможных объектов: *нейтронную звезду* или *чёрную дыру*, если оставшаяся часть очень массивна. Если взрыва сверхновой звезды не произошло, и звезда сохранила свою массу вплоть до исчерпания термоядерного горючего, то согласно общей теории относительности она должна коллапсировать в состояние чёрной дыры.

Возможность существования нейтронных звёзд была предсказана в 1932 году российским учёным Л.Д.Ландау (1908–1968). Нейтронные звёзды образуются при высоких температурах ($\sim 10^7$ К) и плотностях вещества ($\sim 10^{12}$ кг/см³), на много порядков превосходящих плотность белых карликов. При этих условиях протоны могут захватывать электроны, превращаясь в нейтроны и испуская нейтрино. В результате число нейтронов в таких звёздах в десятки раз превосходит число протонов. Это и послужило основанием называть такие звёзды нейтронными.

Нейтронные звёзды быстро вращаются вокруг своей оси (скорость вращения может составлять десятки оборотов в секунду). Под действием мощного магнитного поля нейтронной звезды, не совпадающего с осью вращения,

формируется поток электромагнитного излучения, «освещающий» окружающее пространство подобно маяку во Вселенной. Поток электромагнитного излучения сканирует Вселенную и периодически с частотой, равной частоте вращения звезды вокруг собственной оси, освещает Землю. Излучение нейтронной звезды было впервые открыто в 1967 году английскими астрономами Дж.Белл и Э.Хьюишем. Поскольку частота сигнала, приходящего от нейтронной звезды была стабильна, так как стабильна её частота вращения, источник сигнала назвали *пульсаром*. В настоящее время обнаружены уже сотни пульсаров.

Возможность существования чёрных дыр была предсказана ещё Эйнштейном в общей теории относительности. Расчёты показывают, что белый карлик за счёт гравитационного сжатия может превратиться в чёрную дыру в том случае, если его конечная масса превышает массу Солнца в 2–3 раза. Плотность вещества в чёрной дыре огромна, а её размеры сравнительно небольшие. Например, если бы наше Солнце превратилось в чёрную дыру, то его радиус составил бы всего 3 км. Гравитационное поле в чёрной дыре настолько сильно, что ни частицы, ни один из видов излучения не могут её покинуть. Тела, пролетающие вблизи чёрной дыры и попадающие в область сильного гравитационного воздействия, начинают двигаться с возрастающей скоростью по траектории, оканчивающейся в чёрной дыре. Однако предполагается, что чёрные дыры могут быть всё же обнаружены по рентгеновскому излучению космических газов, попадающих в их поле тяготения.

Общее количество звёзд во Вселенной оценивается в 10^{22} . Невооружённым глазом в ночном небе можно видеть

около 6000 звёзд, а всего астрономическому наблюдению доступно около $2 \cdot 10^6$ звёзд. Все звёзды находятся на разных этапах своей эволюции, они различаются размерами, массой, строением, химическим составом, температурой, светимостью и другими параметрами. Самые большие звёзды (сверхгиганты) превосходят размер Солнца в десятки и сотни раз. Звёзды-карлики имеют размеры Земли и меньше. Предельная масса звёзд равна примерно 60 солнечных массам. Весьма различны и расстояния до звёзд. Свет звёзд некоторых звёздных систем идёт до нас сотни миллионов световых лет. Самыми близкими к нам звёздами являются Проксима Центавра (4,30 световых года) и Альфа Центавра (4,34 световых года).

Основным элементом крупномасштабной структуры Вселенной являются галактики и скопления галактик. Галактики представляют собой стационарные гравитационно-связанные звёздные системы. Звёздная система, в которую входит наше Солнце – Галактика (Млечный Путь, от греч. *galaktikós* – молочный, млечный), – содержит примерно $2 \cdot 10^{11}$ звёзд, среди которых 7–20 млрд белых карликов, около 1 млрд нейтронных звёзд, около 30 млрд красных карликов, а её масса равна $2,5 \cdot 10^{11}$ масс Солнца, диаметр – около 10^5 световых лет, примерный возраст – 13 млрд лет.

Наша Галактика входит в так называемую Местную Группу галактик, находящуюся на периферии ещё более крупного галактического образования – Сверхскопления галактик, образованного примерно из 10 тысяч галактических объектов, имеющего диаметр около 40 мегапарсек и медленно вращающегося вокруг мощного центрального сгущения галактик в созвездии Девы.

Ближайшие к нашему Сверхскоплению соседние сверхскопления галактик располагаются в созвездиях Льва и Геркулеса на расстояниях соответственно 87 и 100 мегапарсек. Всего во Вселенной обнаружено около 50 таких галактических сверхскоплений, образующих ещё один иерархический уровень её структуры, по всей видимости, далеко не самый верхний.

Галактики весьма разнообразны. Половина галактик имеет спиральную структуру, почти четверть относятся к эллиптическим, ещё 20% – это неправильные, в том числе взаимодействующие галактики, обычно двойные, между которыми наблюдаются мосты и перемычки светлой или темной материи.

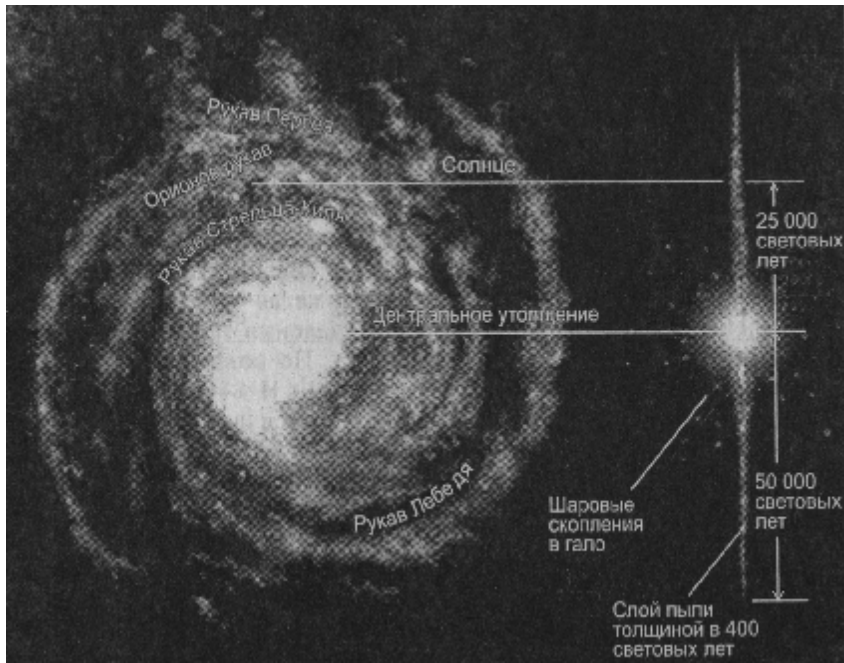


Рис. 8.1. Галактика Млечный Путь (вид «сверху» и сбоку).

Наша Галактика (рис. 8.1), имеющая спиралевидную форму, состоит из старых и молодых звёзд, движения которых имеют

различный характер. У старых звёзд большие эксцентриситеты орбит, тогда как молодые звёзды движутся почти по круговым орбитам. Получаются как бы две подсистемы: молодые звёзды быстро вращаются внутри почти неподвижной системы более старых звёзд. Как оказалось, старое население Галактики более или менее

равномерно занимает почти сферический объём (гало), концентрируясь ближе к центру, а молодое – концентрируется в тонкий диск, толщина которого в десятки раз меньше его радиуса. Такое пространственное распределение ведёт к тому, что на больших расстояниях от центра преобладает излучение звёзд диска, а вблизи центра – излучение сферической подсистемы, поэтому и получается некоторое утолщение диска в его центре. Солнце расположено на расстоянии около 25 тысяч световых лет от центра нашей Галактики.

Значительная сплюснутость диска Галактики указывает на её быстрое вращение вокруг оси. Солнечная система обращается вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с.

В семействе нашей Галактики – 14 карликовых эллиптических галактик, несколько внегалактических шаровых скоплений и неправильные галактики, из которых крупнейшая – Магеллановы облака (ближайшая к нам галактика – около $1,8 \cdot 10^4$ световых лет).

Ближайшей галактикой к нашей Галактике является «Туманность Андромеды», которую световой луч достигает за 2 млн лет, а ближайшее к нам крупное скопление галактик находится на расстоянии около 65,2 млн световых лет.

8.3. Солнечная система. Происхождение и строение Земли

Солнце является рядовой жёлтой звездой, возраст которой около 5 млрд лет. Оно прожило уже примерно

половину отпущенного ему срока активного существования. В нашей Галактике Солнце расположено в периферийной её части, на расстоянии примерно 25 тысяч световых лет от галактического центра. Радиус Солнца равен 696 тыс. км, его масса равна $1,99 \cdot 10^{30}$ кг. Средняя плотность вещества Солнца составляет $1,41 \text{ г/см}^3$, а плотность в центре Солнца – около 100 г/см^3 . Химический состав Солнца по массе составляет приблизительно 70% водорода, 27% гелия и 3% других элементов. Дозвёздное вещество, из которого формировалась Галактика, состояло из 75% водорода и 25% гелия. Сейчас в межзвёздном газе по массе водород имеет 70%, гелий – 28%, остальные элементы – 2%. Температура на поверхности Солнца около 6 тыс. градусов, в его центральной части – приблизительно 16 млн градусов.

Солнце является космическим телом, объединяющим большое количество различных космических объектов в так называемую Солнечную систему, в которую входят 9 планет со своими спутниками, около 40 тыс. астероидов, кометы, метеориты, космическая пыль и газ. Радиус Солнечной системы равен 6 млрд км, он совпадает с расстоянием от Солнца до самой далёкой планеты – Плутона.

Орбиты планет Солнечной системы, вращающихся вокруг Солнца, за исключением орбиты Плутона лежат приблизительно в одной плоскости. Орбита Плутона имеет вытянутую эллиптическую форму и её плоскость имеет аномально большой наклон по отношению к плоскостям орбит других планет, например, по отношению к плоскости земной орбиты наклон составляет 17 угловых градусов. Исходя из физических характеристик, планеты Солнечной системы, кроме планеты Плутона, принято делить на две

группы. Первая группа состоит из сравнительно небольших *планет земного типа* – Меркурия, Венеры, Земли и Марса с относительно высокой средней плотностью образующего их вещества, равной около 5 г/см^3 . Вторую группу составляют *планеты-гиганты* – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, имеющих большие массы при низкой средней плотности вещества, равной примерно $1,4 \text{ г/см}^3$. Эти планеты состоят в основном из водорода и гелия.

В космическом пространстве, разделяющем рассматриваемые две группы планет, а именно, между орбитами Марса и Юпитера находится так называемый *пояс* или *кольцо астероидов* – малых планет с диаметром от 1 км до 1000 км. Общая масса астероидов около 10^{-3} массы Земли.

Планета Плутон по своим размерам ближе к планетам земной группы. Плутон – это двойная планета, она состоит из основного тела и очень большого спутника. Оба небесных тела вращаются вокруг общего центра масс.

Центр массы Солнечной системы практически совпадает с центром массы Солнца, так как масса Солнца составляет 99,87% от массы всей Солнечной системы. Солнце по сравнению с Землёй имеет в 333 тысячи раз большее значение массы и в 109 раз больший диаметр. Среднее расстояние Земли от центра Солнца равно примерно 149,6 млн км. Это расстояние принято называть астрономической единицей длины (а.е.д.).

Важным вопросом с естественнонаучной и мировоззренческой точек зрения является вопрос о происхождении планет Солнечной системы. К настоящему

времени выдвинуто немало гипотез, направленных на решение данного вопроса. Тот факт, что орбиты планет Солнечной системы лежат практически в одной плоскости и их движение по почти круговым орбитам вокруг Солнца происходит односторонне с вращением Солнца вокруг собственной оси, свидетельствует в пользу гипотезы о рождении этих планет в ходе единого космического процесса.

Огромный вклад в развитие этой гипотезы сделал немецкий философ И.Кант (1724–1804), который в работе «Всеобщая естественная история и теория неба», опубликованной в 1755 году, основываясь на законах механики Ньютона, высказал предположение о том, что Солнце и планеты Солнечной системы образовались в результате эволюционного развития холодной пылевой туманности (облака разреженных в пространстве частиц материи), причём сначала возникло Солнце, а затем из пылевого облака, начавшего вращаться вокруг Солнца, стали возникать планеты.

В 1796 году французский учёный П.Лаплас (1749–1827) в работе «Изложение системы мира» предположил, что исходным материалом для образования Солнечной системы была горячая газовая туманность. Сжимаясь под действием гравитационных сил, туманность начинала вращаться быстрее. В экваториальном поясе возникли вследствие этого большие центробежные силы инерции, которые вызвали последовательное отделение колец материи, превратившихся в результате охлаждения и сжатия в планеты. В соответствии с теорией Лапласа планеты могли образоваться раньше Солнца. Гипотезы Канта и Лапласа близки по сути, поскольку в качестве

первоосновы образования Солнечной системы берут вещество, рассеянное во Вселенной, поэтому сейчас принято говорить о единой *небулярной* гипотезе Канта–Лапласа (от лат. *nebula* – туман, облако).

В основе современных представлений об образовании планет Солнечной системы лежит гипотеза, высказанная в 1943 году российским учёным О.Ю.Шмидтом (1891–1956) о том, что планеты Солнечной системы образовались из холодного газопылевого облака. Вращаясь вокруг Солнца, газопылевое облако сконцентрировалось вблизи экваториальной плоскости, причём в зоне близкой к Солнцу скопились частицы пыли. С ростом плотности вещества в экваториальной плоскости гравитационное взаимодействие между частицами материи стало настолько сильным, что слой материи стал неустойчив и распался на отдельные области, из которых в конечном итоге и образовались планеты. Планеты земной группы образовались в основном из пылевых частиц, а планеты-гиганты – из газовой составляющей протопланетного облака.

Астероиды, являющиеся каменистыми образованиями начального этапа аккумуляции протовещества, не присоединились к планетам и сохранились в слое (поясе), располагающемся между орбит Марса и Юпитера. Это стало возможным из-за слабого гравитационного взаимодействия между астероидами и ближайшими планетами, обусловленного большими расстояниями.

Наша планета Земля по форме представляет собой сплюснутый со стороны полюсов и растянутый в экваториальной зоне эллипсоид, получивший вследствие своей уникальной геометрической формы название *геоид*.

Средний экваториальный радиус Земли равен приблизительно 6378 км, а её полярный радиус – около 6357 км. Площадь поверхности Земли – 510,2 млн км², из них 149,1 млн км² (29,2%) занимает суша и 361,1 млн км² (70,8%) занимают океаны. Площадь горных областей составляет 53,7 млн км² и ледников – 16,4 млн км². Масса Земли равна $5,98 \cdot 10^{24}$ кг, а её средняя плотность – 5,5 г/см³. Масса Земли за счёт аккумуляции вещества из космоса в настоящее время прирастает на 10⁹ кг/год. Предполагается, что в период образования Земли, длящийся приблизительно 60 млн лет, прирост её массы составлял 10¹⁷ кг/год. Возраст Земли сейчас оценивается в 4,6–4,7 млрд лет. Период вращения Земли вокруг собственной оси составляет 23 ч 56 мин 4,1 с, а период обращения по орбите вокруг Солнца равен 365,24 суткам.

Внутренняя структура Земли является существенно неоднородной. В ней выделяют следующие концентрические зоны, которые схематично представлены на рис. 8.2: 1) земная кора средней толщины около 50 км; 2) мантия, простирающаяся до глубины приблизительно 2900 км и 3) ядро радиусом около 3500 км.

Земную кору покрывают гидросфера – жидкая оболочка, которая не является сплошной и атмосфера – газовая оболочка планеты. Земная кора, масса которой составляет около 1% от массы Земли, подразделяется на материковую, которая достигает толщины 35–45 км на равнинной части планеты и 70–80 км в области гор, и океаническую, толщина которой значительно меньше и достигает 8–10 км. Плотность земной коры увеличивается с глубиной в среднем от 2,7 до 3,0 г/см³, увеличивается и температура примерно по 3 градуса на каждые 100 м. По

химическому составу наибольшая доля приходится на кислород (47,2%), кремний (27,6%), алюминий (8,8%) и железо (5,5%), которые входят в окислы, гидроокислы, силикаты и сульфиды.

Структура материковой земной коры существенно отличается от структуры океанической. Более сложной считается материковая кора, которая состоит из трёх слоёв: верхнего осадочного, среднего гранитного и нижнего базальтового. Осадочный слой, содержащий основные запасы угля, нефти и газа, по толщине неодинаков в различных районах суши. Так, его толщина в Гренландии и Скандинавии практически равна нулю, а в дельте реки Ганг превышает 10 км. Гранитный слой, толщина которого составляет примерно 15–20 км, содержит большую часть рудных запасов земной коры. Наконец, базальтовый слой, в котором находятся основные запасы тяжёлых металлов, имеет толщину около 20 км.

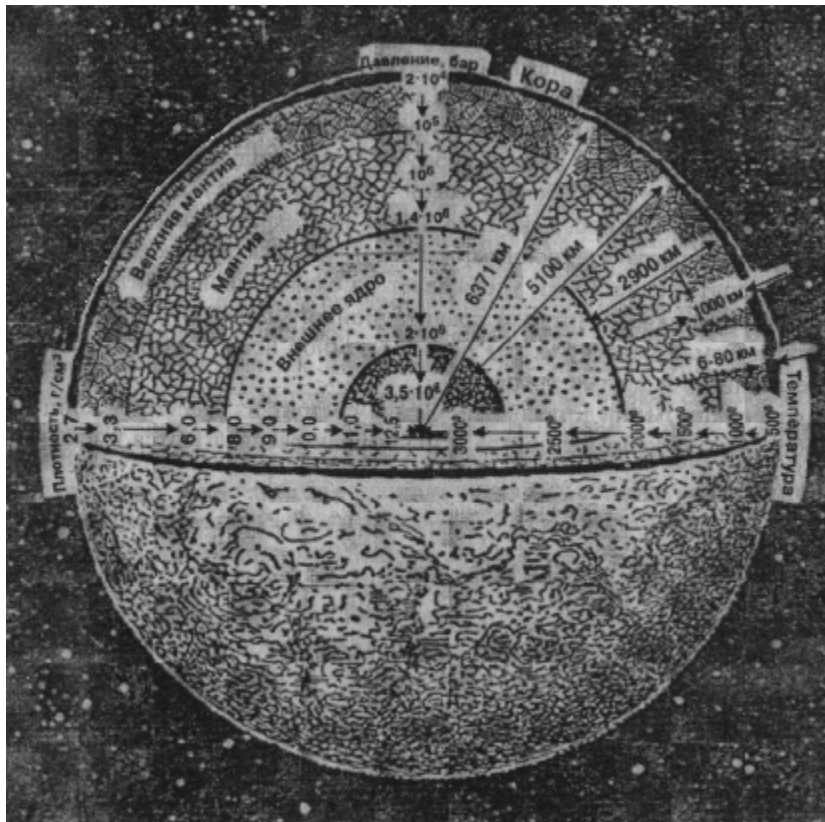


Рис. 8.2. Внутреннее строение Земли.

Океаническая кора имеет толщину 8–10 км и состоит из рыхлого осадочного слоя, лежащего на тонком базальтовом основании. Гранитный слой в океанической коре отсутствует. Переход от материковой коры к океанической происходит постепенно с увеличением

глубины океанического дна. На глубине океана свыше 3,5 км земная кора уже имеет океанический тип.

Ниже базальтового слоя начинается мантия Земли, состоящая из верхней мантии толщиной 800–850 км и нижней мантии, толщина которой около 2000 км. Плотность вещества к границе мантии с ядром достигает значения 5,5 г/см³, давление – 1,3 млн атмосфер, температура – 2000–2500°С. Мантия состоит преимущественно из тяжёлых минералов, богатых кремнием и железом. Под действием высокого давления мантия Земли, несмотря на высокую температуру, находится, вероятно, в кристаллическом состоянии за исключением нижней части верхней мантии, где влияние температуры сказывается сильнее, чем действие давления. Эту область, находящуюся либо в расплавленном, либо в аморфном состоянии, называют *астеносферой*.

Внешний слой твёрдой Земли, включающий земную кору и часть верхней мантии, носит название *литосферы*. Литосфера лежит на астеносфере и расколота примерно на 10 больших плит, по границам которых расположено подавляющее число очагов землетрясений. При появлении трещин в литосфере магма астеносферы изливается под действием высокого давления на поверхность Земли, сопровождая мощные извержения вулканов.

Нижние слои мантии граничат с ядром Земли, которое состоит из двух условно выделяемых частей: внешнее ядро, располагающееся в слое на глубине от 2900 км до 5100 км, и внутреннее ядро или так называемое субъядро, находящееся ниже 5100 км. Ядро по массе составляет 34% от массы Земли. Внешнее ядро состоит из соединения

железа с серой (48%) и окиси железа (52%) и находится в жидком состоянии с плотностью, изменяющейся с глубиной от 9,5 до 12,3 г/см³. Субъядро находится в твёрдом состоянии с плотностью 13–14 г/см³ и температурой около 5000°С в его центре и состоит из железо-никелевого сплава. Несмотря на постоянный отвод тепла к внешним слоям Земли, температура ядра остаётся высокой. Это обусловлено действием огромных гравитационных сил, приводящих к постепенному сжатию вещества и, как следствие, постоянному выделению энергии, которое оценивается примерно в $4 \cdot 10^{20}$ Ккал/год. Большое давление и высокая температура внутри ядра Земли приводят к тому, что многие электроны атомов и молекул становятся свободными и, образуя гигантские вихри, формируют магнитное поле планеты.

На ранних этапах эволюции Земли гидросфера на её поверхности отсутствовала. Вода выделилась из недр Земли в результате её тектонической активности. Выделение воды и формирование гидросферы продолжается и в настоящее время. 4 млрд лет назад объём воды на Земле составлял около 20 млн км³. Сейчас общий объём вод гидросферы составляет 1,4 млрд км³, объём воды в земной коре – около 1,3 млрд км³ и объём воды в мантии – около 20 млрд км³. Водные ресурсы в гидросфере распределяются следующим образом: около 94% объёма воды приходится на океаны и моря, около 4% – на подземные воды, около 2% – на ледники и постоянные снега и около 0,4% – на поверхностные воды (реки, озёра и др.).

Атмосфера в процессе эволюции Земли претерпела существенные изменения. Например, около 3,8 млрд. лет назад атмосфера Земли, как предполагают учёные, состояла

главным образом из углекислого газа, азота и водорода. Кислород начал появляться в атмосфере около 2,5–2,0 млрд лет назад. Его содержание тогда не превышало десятых долей процента. Сейчас атмосфера Земли состоит в основном на 78% из азота, на 21% и кислорода, 0,9% из аргона, на 0,03% из углекислого газа и из других газов в очень малых долях процента. Её масса составляет $5,15 \cdot 10^{18}$ кг. Химический состав и масса атмосферы в настоящее время во многом определяются жизнедеятельностью растений, животных и человека.

Литература к главе 8

1. *Девятова С.В., Купцов В.И.* Путь к истине. Естествознание в контексте мировой истории. – М.: НП «Ш тысячулетие», 2002. – 624 с.

2. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Учебник. – М.: ИКЦ «Маркетинг», Новосибирск: ООО «Издательство «ЮКЭА», 2001. – 832 с.

3. *Лобачёв А.И.* Концепции современного естествознания: Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 239 с.

4. *Сажин М.В.* Современная космология в популярном изложении. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 240 с.

5. *Хокинг С.* От большого взрыва до чёрных дыр: Краткая история времени: – М.: Мир, 1990. – 166 с.

Г Л А В А 9

БИОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Среда, окружающая человека, наряду с различными объектами неживой природы содержит огромное количество разнообразных живых (биологических) структур, основной особенностью которых является способность к развитию и самовоспроизведению. Человек – часть живой природы. Обладая разумом, он всегда проявлял интерес к познанию мира живых существ. На ранних стадиях зарождения человечества этот интерес отражал практические нужды людей, связанные с тем, что биологический мир рассматривался лишь как источник средств к существованию. Такое чисто потребительское отношение к природе свойственно и современному человечеству и это может привести к экологической катастрофе. В настоящее время человечество начинает осознавать такую опасность и прилагать усилия для оптимизации взаимодействия человека с природой, призванной обеспечить устойчивое развитие всей биосферы Земли.

На определённом уровне своего развития человек, кроме решения прагматических задач, начал интересоваться вопросами о том, каким образом появилась жизнь на Земле, как и на каком этапе возникло большое многообразие видов биологических организмов, как появилась разумная жизнь на Земле, каково происхождение человека, по каким законам происходит эволюция видов и т. п.

9.1. Гипотезы происхождения жизни

В настоящее время существует несколько концепций возникновения жизни на Земле, среди которых наибольший интерес представляют следующие: креационизм; панспермизм; витализм; и эволюционизм. Рассмотрим кратко каждую из этих концепций.

Креационизм (от лат. creatio – создание) – биологическая концепция, трактующая многообразие форм органического мира как акт божественного творения. Концепции креационизма придерживались и придерживаются сейчас многие видные учёные, среди которых шведский естествоиспытатель, создатель систематики растительного и животного мира К.Линней (1707–1778) и французский анатом, зоолог и палеонтолог Ж.Кювье (1769–1832). Они считали, что только с позиций креационизма можно объяснить неизменный характер видового состава биологических систем и отсутствие переходных форм живых организмов от одного вида к другому. Наблюдаемая экспериментально изменчивость свойств биологических систем под действием внешних и внутренних факторов происходит только в пределах каждого конкретного вида.

Данные палеонтологии (науки о вымерших растениях и животных, сохранившихся в виде остатков, отпечатков и следов их жизнедеятельности, о смене их во времени и пространстве), основателем которой считается Кювье, свидетельствуют о том, что на Земле время от времени происходила смена видов. Для объяснения этого факта Кювье в 1812 году была разработана *теория катастроф*, согласно которой стихийные бедствия, происходившие на

Земле, приводили к уничтожению жизни на больших территориях. После этого Творцом жизнь создавалась заново, но уже в изменённом виде.

Подытоживая сказанное, отметим, что в рамках концепции креационизма проблема возникновения жизни на Земле решается не в сфере *науки*, а в сфере *веры*.

Панспермизм предполагает занесение жизни на поверхность Земли из космоса либо в виде спор микроорганизмов, либо путём намеренного заселения планеты разумными пришельцами из других миров. Теоретические основы концепции панспермизма были разработаны немецким биологом Г.Рихтером (1818–1876) и шведским учёным С.Аррениусом (1859–1927). В соответствии с этой теорией в космическом пространстве существуют так называемые «споры жизни», которые, попадая в благоприятные условия на поверхности Земли, могут стать зародышами многочисленных биологических структур.

Прямых свидетельств в пользу космического происхождения жизни в настоящее время не существует. Однако космос может быть поставщиком низкомолекулярных органических соединений, которые могут находиться в составе выпадающих на Землю метеоритов, частиц близко пролетающих комет и космической пыли. В некоторых из свежевывавших на Землю метеоритах обнаружен ряд аминокислот, которые могут служить строительным материалом для белковых молекул. Подсчитано, что Земля, проходя через пылевое облако в течение 1 млрд лет, могла получить с космической пылью 10^{13} кг органического материала.

Следует сказать, что концепция панспермизма фактически не решает проблему возникновения жизни как таковой, она исходит из предположения, что зародыши жизни уже существуют во Вселенной.

Витализм (от лат. *vitalis* – жизненный) предполагает обусловленность жизненных явлений в биологических системах присутствием в них особой нематериальной, непознаваемой сверхъестественной силы. В трактовке сущности живого витализм исходит из представлений об абсолютности различия явлений органической и неорганической природы. Зарождение витализма происходило во времена античности. Так, древнегреческий философ Платон (428–347 гг. до н. э.) говорил о бессмертной душе – «психее», оживляющей растительный и животный мир, а его ученик философ и учёный Аристотель (384–322 гг. до н. э.) выдвинул идею о существовании особой нематериальной силы «энтелехии», управляющей явлениями живой природы. Наиболее ярко витализм проявился во взглядах греческого философа Плотина (204–270), который утверждал наличие в живой природе особого «животворящего духа». Имеется предположение, что им впервые было выдвинуто понятие «жизненной силы», которое было использовано в последующих виталистических теориях.

Значительный вклад в развитие концепции витализма внесли немецкий врач и химик Г.Шталь (1660–1734), немецкий биолог Х.Дриш (1867–1941), американский ботаник Э.Синнотт и др. Виталисты пытаются доказать нематериальный характер жизни и невозможность понять её сущность. Так, Синнотт в работе «Материя, дух и человек» пишет о том, что живая природа, в отличие от неживой,

организуется и управляется особым творческим началом, которое является одним из атрибутов Бога. Принципиально иной точки зрения придерживаются сторонники эволюционной теории.

Эволюционизм утверждает, что разрыва между живой и неживой природой не существует и, что жизнь возникла на Земле, когда сложилась благоприятная совокупность физических и химических условий, сделавших возможным образование органических веществ из неорганических. Идеи эволюционизма впервые были сформулированы французским биологом Ж.-Б.Ламарком (1744–1829). В работе «Философия зоологии», опубликованной в 1809 году, он разработал основы естественной классификации животных и обосновал идею постепенного развития во времени живой природы под воздействием естественных причин. Развитие организмов обусловлено внутренне присущим им стремлением к совершенству и вынужденной необходимостью приспосабливаться к меняющимся условиям внешней среды. Ламарк придерживался мнения, что изменчивость ничем не ограничена, она постоянно и непрерывно размывает межвидовые границы, приводя к возможности перехода одного вида в другой.

Суть эволюционного учения Ламарка отражают два закона, сформулированные им. *Первый закон* утверждает, что постоянное употребление органа ведёт к его усилению, а неупотребление – к ослаблению и исчезновению. *Второй закон* гласит, что под действием постоянных упражнений или неупражнений органы изменяются, и возникшие изменения наследуются». Положения об эволюции

органического мира Ламарк распространил и на объяснение происхождения человека от высших «четвероруких обезьян».

Дальнейшее развитие концепция эволюционизма получила в работах английского биолога Ч.Дарвина (1809–1882), среди которых особое место занимает фундаментальный труд «Происхождение видов путём естественного отбора, или сохранение благоприятствующих пород в борьбе за жизнь», опубликованный в 1859 году.

9.2. Основные принципы эволюции жизни

Эволюционное учение Дарвина базируется на четырёх основных принципах: изменчивости, наследственности, борьбы за существование и естественного отбора. Кратко рассмотрим каждый из них.

Изменчивость биологических систем характеризует их способность приспосабливаться к меняющимся условиям окружающей среды и факторам внутривидовой конкуренции. При изменении условий окружающей среды живые организмы с целью выживания вынуждены пытаться изменить себя. В случае удачных изменений свойств живых организмов биологическая система вновь придёт к равновесию во взаимодействии с окружающей средой. Такие биологические системы выживут. В противном случае биологические системы обречены на гибель. Наибольшая вероятность выжить имеется у биологических систем, обладающих высокой изменчивостью.

Для того, чтобы последующие поколения живых организмов также находились в равновесии с окружающей

средой, необходимо, чтобы они наследовали положительные признаки родителей. Это означает, что эти признаки должны быть закреплены на молекулярно-генетическом уровне. Изменчивость, происходящая на генетическом уровне, носит название *наследственной или генотипической изменчивости*. Именно наследственная изменчивость биологических систем на протяжении смены многих поколений обеспечивает эволюцию видов.

Известны два вида наследственной изменчивости: мутационная и комбинативная изменчивость. Любые резкие наследственные изменения в живых организмах независимо от характера и причин их возникновения носят название мутаций (от лат. *mutatio* – изменение). Термин «*мутация*» был введён в 1901 году голландским ботаником Х. де Фризом. *Мутационная изменчивость* может иметь место при существенных изменениях условий окружающей среды, например, при повышении уровня радиации, увеличения концентрации вредных веществ в атмосфере и т. п. Она ведёт к структурным изменениям генетического материала, ответственного за трансляцию видовых признаков последующим поколениям живых организмов. Опыт показывает, что подавляющее большинство мутаций приводит к негативным изменениям свойств живых организмов. Однако некоторые мутации всё же могут дать положительные изменения этих свойств. Именно они и определяют прогрессивную тенденцию в эволюции биологических видов.

Комбинативная изменчивость связана с двуполом размножением, когда потомством наследуются индивидуальные признаки родителей в различных сочетаниях. Это приводит к появлению новых признаков у

живых организмов и, следовательно, расширяет внутривидовое разнообразие, что повышает степень жизнеспособности вида.

Биологическим системам любого вида свойственна постоянная *борьба за существование*, неизбежность которой вытекает из противоречия между способностью организмов к неограниченному размножению и ограниченностью жизненных ресурсов. Дарвин выделил три основные формы борьбы за существование: 1) внутривидовую – наиболее напряжённую, потому что особи одного вида живут в одинаковых условиях и имеют одинаковые потребности при ограниченности пищевых ресурсов; 2) межвидовую – борьбу с особями других видов, например, с хищниками, болезнетворными микроорганизмами и др. 3) борьбу с неживой природой – наводнениями, засухой и т. п.

Результатом наследственной изменчивости и борьбы за существование является *естественный отбор* – выживание наиболее приспособленных особей. Естественный отбор сохраняет живые организмы с полезными в данных условиях среды наследственными изменениями и устраняет организмы, не имеющих этих изменений. Вследствие этого особи, обладающие полезными наследственными изменениями, оставляют более многочисленное потомство, и их численность возрастает.

Таким образом, в результате взаимосвязанного действия наследственной изменчивости, борьбы за существование и естественного отбора виды из поколения в поколение изменяются в направлении всё большей

приспособленности к условиям среды обитания. Эволюционная теория полагает, что естественный отбор вызывает дивергенцию (расхождение) признаков внутри вида и может привести к образованию нового вида. Это, по мнению эволюционистов, является причиной многообразия видов живых организмов, существующих на Земле.

9.3. Появление человека на Земле и его эволюция

Предполагается, что Земля образовалась как планета около 4,6 млрд лет тому назад, а жизнь зародилась на ней 3,5 млрд лет назад. В науке с XIX века господствует вытекающая из теории эволюции Дарвина концепция происхождения человека от высокоразвитых предков современных обезьян. Из всех животных по генетическому аппарату ближе всего к человеку оказались шимпанзе. Эволюция человека (антропогенез) включает в себя следующие наиболее важные ступени: австралопитек, питекантроп, синантроп, неандерталец, кроманьонский человек.

Первым звеном в длинной цепочке, которая привела к появлению человека, был *австралопитек* (буквально южная обезьяна). В 1924 году в пещере Тонг в Южной Африке был найден череп ребёнка, который был тщательно исследован врачом-анатомом Р.Дартом, объявившим на основании этих исследований об открытии обезьяны, относящейся к промежуточному виду приматов между современными человекообразными обезьянами и человеком. Особи этого вида приматов были названы им австралопитеками.

Австралопитеки – маленькие двуногие существа, ареал распространения которых захватывал Восточную,

Южную и Центральную Африку в период от 4 до 1 миллиона лет назад. Они имели рост 100–150 см, среднюю массу около 50 кг, объём черепной коробки 400–500 см³ и массивную вытянутую морду. Австралопитеки жили стадами, были способны создавать орудия труда (грубо обитые камни), но не умели пользоваться огнём.

На современном уровне познания самым древним представителем рода *Homo* (человеческого) признаётся *Homo habilis* – «человек умелый». Впервые останки человека умелого обнаружила в ущелье Олдовай в Танзании М.Лики. Человек умелый появился в Восточной Африке примерно 2 миллиона лет назад. По сравнению с австралопитеком он имел бóльший объём черепной коробки (650–800 см³), более компактную морду и более изящный зубной аппарат. Человек умелый изготавливал и широко использовал в быту различные орудия из камня.

От *Homo habilis* произошёл самый древний *Homo erectus* – «человек прямоходящий». *Homo erectus* появились около 1,7 миллиона лет назад в районе озера Туркана в Кении и оттуда распространились в Северную Африку, Азию и Европу. Рост человека прямоходящего достигал 170 см, объём черепной коробки составлял от 750 до 1250 см³, он имел мощный, но типично человеческий зубной аппарат.

Будучи основными действующими лицами на сцене древнего мира в течение около полутора миллионов лет *Homo erectus* впервые научились добывать огонь. Именно они постепенно становятся искусными охотниками и обустраивают первые жилища. Изобретя новую технологию резьбы по камню, они изготавливают ножи, рубила,

скребки, свёрла. Сегодня многие учёные уверены, что *Homo erectus* более или менее успешно общались между собой с помощью слов.

К виду *Homo erectus* относят *питекантропа* (буквально «обезьяночеловек»), останки которого были найдены на острове Ява в 1891 году, жившего там приблизительно 500 тысяч лет назад, и *синантропа* («китайский человек»), останки которого обнаружены в 1927 году в Китае около Пекина, их возраст приблизительно 400 тысяч лет. Несколько захоронений *Homo erectus* обнаружено и в Европе, возраст которых 1500–400 тысяч лет.

В течение последних 200 тысяч лет человечество активно развивалось. Одно за другим стали появляться технические нововведения, у человека стали возникать духовные интересы, появились эстетические чувства. Некоторые учёные считают, что с этого момента культурная эволюция начинает преобладать над эволюцией биологической. В этот период в среде *Homo erectus* зародился новый вид человека *Homo sapiens* – «человек разумный».

Homo sapiens имел уже объём черепной коробки в среднем 1400 см³, развитые лобные доли мозга и уменьшенную вытянутость лица. Различают архаичную ветвь человека разумного, к которой относят *неандертальцев*, и более эволюционно продвинутую ветвь – *Homo sapiens sapiens*, которая появилась 100 тысяч лет назад и является прототипом современного человечества.

Впервые останки неандертальцев были найдены в 1856 году в Германии в долине Неандерталь. Неандертальцы жили в период от 200 до 35 тысяч лет до н. э. на территории Европы, Азии и Африки. Неандертальцы носили одежду из шкур животных, жили в пещерах или строили жилища. Их рост был чуть ниже, чем рост у современного человека, ходили они немного согнув ноги в коленях; черепная коробка с объёмом 1200–1400 см³ у них была низкой, лоб покатый с надбровными дугами. Неандертальцы охотились на мамонтов, хоронили своих умерших сородичей.

По неизвестным причинам к 35 тысячному году до н. э. неандертальцы исчезли, уступив место *современному человеку*, не обладающему ни одной из физических черт, характерных неандертальцам. Большинство антропологов допускают, что появление современного человека в Европе не может быть связано с эволюцией, которая кстати началась на этом месте после неандертальцев. В этот период появляются новые технологии в обработке камня и кости, в изготовлении метательных орудий и появляется изобразительное искусство.

Это совпадение между фактами биологическими и фактами культурными склоняет к мысли, что замещение неандертальцев осуществлялось после заселения Западной Европы современными людьми, пришедшими с Востока. Предполагается, что два народа смешались и произошло скрещивание. Пришельцы с Востока имели вытянутый череп с высоким лбом, лицо с выступающими скулами и хорошо выраженный подбородок – это были первые современные люди, *Homo sapiens sapiens*, прямые предки *кроманьонцев*.

Впервые останки кроманьонца были обнаружены в 1868 году во Франции в пещере Кро-Маньон. Кроманьонцы появились в Европе 35 тысяч лет назад. Они имели рост около 180 см, их внешний облик и размер черепной коробки (1400–1600 см³) были близки к современному человеку. Одним из наиболее поразительных аспектов развития кроманьонцев является расцвет эстетических чувств, напрямую связанных с религией или с волшебством, которые выражались посредством гравюр, рисунков, скульптур и украшений. На период 16–11 тысяч лет назад приходится расцвет наскальной живописи благодаря людям, жившим охотой, рыбной ловлей и собирательством плодов дикорастущих растений, людям эпохи, названной веком северного оленя. Наскальная живопись почти полностью исчезла как искусство 10 тысяч лет назад, т. е. к моменту завершения последнего ледникового периода. После этого человеку хватило всего нескольких тысячелетий, чтобы приручить животных, использовать растения, овладеть гончарным ремеслом, открыть металлургию.

В течение последних нескольких тысячелетий биологическая эволюция человека значительно замедлилась в пользу культурной эволюции, темпы которой непрерывно увеличиваются. Биологические процессы, которые привели нас от обезьяны к человеку, по сравнению с культурным развитием очень медленны. В самом деле, механизмы естественного отбора не позволяют передавать приобретённые признаки от одного поколения к другому. Биологические изменения ощутимы только на шкале геологических времён. В случае культурной эволюции изменения происходят очень быстро, так как каждое поколение непрерывно передаёт свои достижения последующему.

Исключительная разумность современного человека даёт ему власть сознательно организовывать своё будущее – факт уникальный в животном царстве. Но в то же время человек – это единственное животное, которое стало угрозой самому себе. И нельзя предугадать, какая из двух сил возьмёт верх: сила культурной эволюции, которая приведёт к появлению нового *Homo sapiens*, или разрушительная сила, которая его уничтожит, чтобы вернуть равновесие в природе, до того как она сама будет ввергнута в катастрофу.

9.4. Биологическая клетка как элементарная единица живого

Клеточная теория строения организмов сформулирована в 1839 году немецким биологом Т.Шванном (1810–1882) в работе «Микроскопические исследования о соответствии в структуре и росте животных и растений», в которой были использованы результаты исследований по клеточному строению растений немецкого ботаника М.Шлейдена (1804–1881) и других учёных.

Клетка представляет собой обособленную, наименьшую по размерам структуру, которой присуща вся совокупность свойств жизни и которая может в подходящих условиях окружающей среды поддерживать эти свойства в самой себе, а также передавать их в ряду поколений. Клетка, таким образом, несёт полную характеристику жизни. Вне клетки не существует настоящей жизнедеятельности. Поэтому в природе ей принадлежит роль *элементарной структурной, функциональной и генетической единицы*.

Это означает, что клетка составляет основу *строения, жизнедеятельности и развития* всех живых форм. Благодаря заложенным в ней механизмам клетка обеспечивает обмен веществ, использование биологической информации, размножение, свойства наследственности и изменчивости, обуславливая тем самым присущие органическому миру качества единства и разнообразия. Занимая в мире живых существ положение элементарной единицы, клетка отличается сложным строением. При этом определённые черты обнаруживаются во всех без исключения клетках, характеризую наиболее важные стороны клеточной организации как таковой.

9.4.1. Строение клетки

Клетки, как растений, так и животных отделены от своего окружения *плазматической мембраной* (рис. 9.1). Каждая клетка состоит из двух важнейших, неразрывно связанных между собой частей – ядра и цитоплазмы.

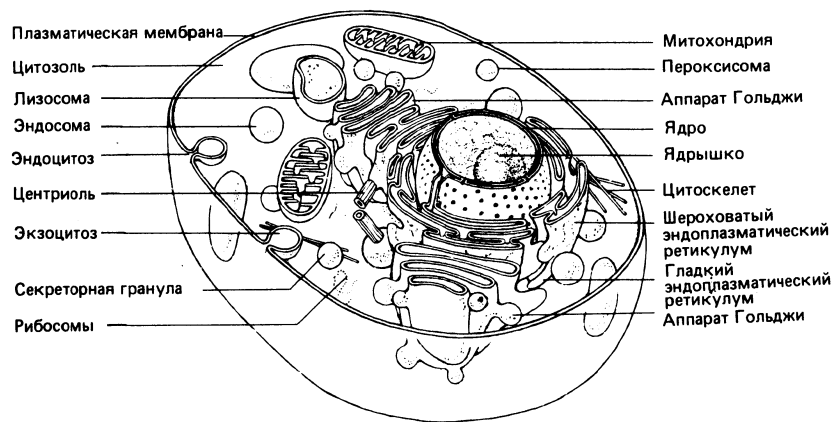


Рис. 9.1. Схематическое изображение клетки.

Клеточное ядро состоит из оболочки, ядерного сока (нуклеоплазмы), ядрышка и хроматина. Функциональная роль *ядерной оболочки* заключается в обособлении генетического материала (хромосом) клетки от цитоплазмы и в регуляции двусторонних взаимодействий ядра и цитоплазмы. Основу *ядерного сока*, или *матрикса*, составляют белки. Ядерный сок образует внутреннюю среду ядра, в связи с чем он играет важную роль в обеспечении функционирования генетического материала.

Ядрышко представляет собой плотное округлое тельце, располагающееся в ядерном соке. В ядре клетки в зависимости от её функционального состояния число ядрышек колеблется от 1 до 5–7 и более. Ядрышко не является самостоятельным органоидом клетки. Оно лишено мембраны и образуется вокруг участка хромосомы, в котором закодирована структура *рибосомных*

рибонуклеиновых кислот (рРНК). Этот участок носит название ядрышкового организатора; на нём синтезируется рРНК. Кроме накопления рРНК в ядрышке формируются рибосомы, которые затем перемещаются в цитоплазму.

Хроматин представлен в виде глыбок, гранул и сетевидных структур, хорошо окрашивающихся некоторыми красителями. Хроматин содержит дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК) и белки и представляет собой спирализованные и уплотнённые участки хромосом.

В *цитоплазме* различают основное вещество (матрикс), органеллы и включения. *Основное вещество цитоплазмы* заполняет пространство между клеточной оболочкой, ядерной оболочкой и другими внутриклеточными структурами. Оно образует внутреннюю среду клетки, которая объединяет все внутриклеточные структуры и обеспечивает взаимодействие их друг с другом.

Органеллы – это постоянные структуры цитоплазмы, выполняющие в клетке жизненно важные функции. Существуют органеллы, свойственные всем клеткам, – это митохондрии, клеточный центр, аппарат Гольджи, эндоплазматическая сеть, рибосомы, лизосомы, пероксисомы и есть органеллы, свойственные только определённым типам клеток, определяющие окрашивание мышц, реснички эпителия трахеи и бронхов и ряд других.

Митохондрии – «энергетические станции» клетки, имеющие форму округлых, овальных или палочковидных телец. Размеры митохондрий составляют 0,2–1 мкм в диаметре и 5–20 мкм в длину. В митохондриях

осуществляется синтез универсального источника энергии – аденозинтрифосфата (АТФ). При распаде АТФ выделяется большое количество энергии, которая используется клетками при синтезе различных веществ, при выработке тепла, необходимого для поддержания температуры тела, при движении и других физиологических процессах.

Клеточный центр состоит из двух очень маленьких телец цилиндрической формы, расположенных под прямым углом друг к другу. Эти тельца называются *центриолями*. Центриоль имеет диаметр около 0,15 мкм и длину 0,3–0,5 мкм. Стенка центриоли состоит из девяти триплетов микротрубочек. Центриоли способны к микросборке и относятся к самовоспроизводящимся органеллам цитоплазмы. Центриоли играют важную роль в клеточном делении, от них начинается рост микротрубочек, образующих веретено деления.

Аппарат Гольджи представляет собой совокупность уплощённых дискообразных цистерн, от краёв которых отпочковываются секреторные пузырьки (везикулы), а также имеются локальные расширения цистерн, дающие более крупные пузырьки (вакуоли). Цистерны комплекса Гольджи соединены с каналами эндоплазматической сети. Синтезируемые на мембранах эндоплазматической сети белки, полисахариды, жиры транспортируются к комплексу, конденсируются внутри его структур и «упаковываются» в виде секрета, готового к выделению, либо используются в самой клетке в процессе её жизнедеятельности.

Эндоплазматическая сеть – это разветвлённая сеть (ретикулум) каналов и полостей в цитоплазме клетки, образованная мембранами. Различают два вида мембран

эндоплазматической сети – гладкие и шероховатые. На мембранах *гладкой эндоплазматической сети* находятся ферментные системы, участвующие в жировом и углеводном обмене. Основная функция *шероховатой эндоплазматической сети* – синтез белков, который осуществляется в рибосомах, прикрепленных к мембранам.

По каналам сети перемещаются вещества, в том числе и синтезированные на мембранах. Мембраны эндоплазматической сети выполняют ещё одну функцию – пространственного разделения ферментных систем, что необходимо для их последовательного вступления в биохимические реакции. Таким образом, эндоплазматическая сеть – общая внутриклеточная циркуляционная система, по каналам которой транспортируются вещества внутри клетки и из клетки в клетку.

Функцию синтеза белков осуществляют *рибосомы*. Они представляют собой сферические частицы диаметром 15–35 нм, состоящие из двух субъединиц неравных размеров и содержащие примерно равное количество белков и РНК. Рибосомные РНК (рРНК) синтезируются в ядре на молекуле ДНК одной из хромосом. Там же формируются рибосомы, которые затем покидают ядро. Рибосомы в цитоплазме располагаются или прикрепляются к наружной поверхности мембран шероховатой эндоплазматической сети. В зависимости от типа синтезируемого белка рибосомы могут объединяться в комплексы – полирибосомы. В таком комплексе рибосомы связаны между собой длинной цепочкой молекулы информационной (матричной) РНК (иРНК или мРНК).

Внутриклеточное переваривание различных химических соединений и структур происходит в лизосомах. *Лизосомы* – это небольшие овальные тельца диаметром около 0,4 мкм, окружённые одной трёхслойной мембраной. В лизосомах находится около 30 ферментов, способных расщеплять белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды, липиды и другие вещества. Лизосомы могут разрушать и структуры самой клетки при её отмирании в ходе эмбрионального развития, когда происходит замена зародышевых тканей на постоянные, и в ряде других случаев. По-видимому, переваривание структур, образованных самой клеткой, играет важную роль в нормальном обмене веществ клеток. Однако остаётся неизвестным, каким образом лизосомы «распознают» внутриклеточный материал, подлежащий разрушению.

В различных метаболических циклах участвуют ферменты, содержащиеся в *пероксисомах*, состоящих из пузырьков диаметром 0,1–1,5 мкм, ограниченных одной мембраной. Пероксисомы ликвидируют возникающие в клетке пероксиды, токсичные для живого вещества.

Включениями называют относительно непостоянные компоненты цитоплазмы, которые служат запасными питательными веществами (жир, гликоген), продуктами, подлежащими выведению из клетки (гранулы секрета), балластными веществами (некоторые пигменты).

9.4.2. Жизненный цикл клетки

В многоклеточном организме клетки специализированы, т. е. имеют строго определённое строение и функции. В соответствии со специализацией

клетки имеют разную продолжительность жизни. Например, нервные и мышечные клетки после завершения эмбрионального периода развития перестают делиться и функционируют на протяжении всей жизни организма. Другие клетки, такие как клетки костного мозга, эпидермиса, эпителия тонкого кишечника в процессе своей специфической функции быстро погибают, и поэтому в этих тканях происходит непрерывное клеточное размножение.

Закономерные изменения структурно-функциональных характеристик клетки во времени составляют содержание жизненного цикла клетки (клеточного цикла). *Клеточный цикл* – это период существования клетки от момента её образования путём деления материнской клетки до собственного деления или гибели. Важным компонентом клеточного цикла является *митотический цикл* – комплекс взаимосвязанных и согласованных во времени событий, происходящих в процессе подготовки клетки к делению и на протяжении самого деления. Кроме того, в жизненный цикл включается период выполнения клеткой многоклеточного организма специфических функций, а также периоды покоя. В периоды покоя ближайшая судьба клетки не определена: она может либо начать подготовку к митозу, либо приступить к специализации в определённом функциональном направлении (рис. 9.2). *Митоз* – способ деления клеток, обеспечивающий тождественное распределение генетического материала между дочерними клетками и преемственность хромосом в ряду клеточных поколений.

Из рисунка видно, что после завершения митоза клетка может вступить в период подготовки к синтезу ДНК,

обозначаемый символом G_1 . В течение этого периода в клетке усиленно синтезируются РНК и белки, повышается активность ферментов, участвующих в биосинтезе ДНК. После завершения фазы G_1 клетка приступает к синтезу ДНК или её *редупликации* – удвоению. Продолжительность синтеза ДНК в разных клетках неодинакова: от нескольких минут у бактерий до 6–12 часов в клетках млекопитающих.

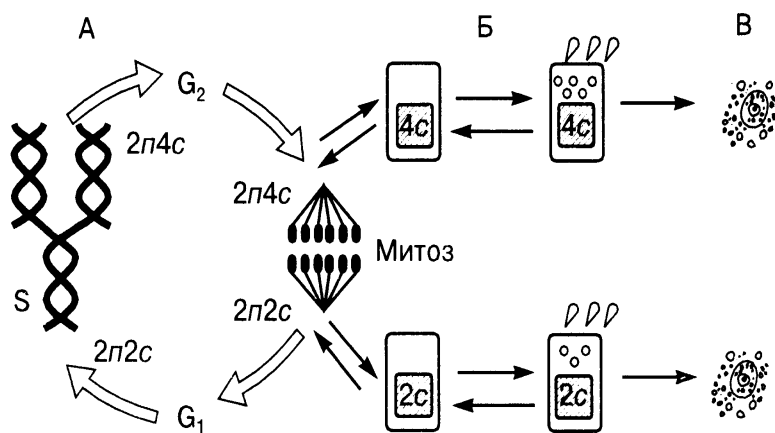


Рис. 9.2 Жизненный цикл клетки многоклеточного организма: А – митотический цикл; Б – переход в дифференцированное состояние; В – гибель клетки ($2n$ – двойной набор хромосом; $2c$ – количество ДНК в двойном наборе хромосом; $4c$ – удвоенное количество ДНК).

После завершения синтеза ДНК – S-фазы митотического цикла – клетка, как правило, начинает делиться не сразу. Период от окончания синтеза ДНК и до момента митоза называется фазой G_2 . В этот период завершается подготовка клетки к митозу. Для осуществления митотического

деления клетки необходимы и другие подготовительные процессы, в том числе удвоение центриолей, синтез белков, из которых строится ахроматиновое веретено, завершение роста клетки. При вступлении клетки в митоз меняется её функциональная активность: например, прекращается амёбoidalное движение у простейших и у лейкоцитов высших животных; поглощение жидкости и деятельность сократительных вакуолей у амёб; часто исчезают специфические структуры клетки, например, реснички эпителиальных клеток.

Митоз (рис. 9.3) состоит из четырёх фаз: профазы, метафазы, анафазы и телофазы. В *профазе* увеличивается объём ядра, хромосомы становятся видимыми вследствие спирализации, по две центриоли расходятся к полюсам клетки, между ними микротрубочки образуют веретено деления. Вследствие спирализации хромосом становится невозможным считывание генетической информации с ДНК и прекращается синтез РНК. В конце профазы ядерная оболочка распадается на отдельные фрагменты, края которых смыкаются. Образуются мелкие пузырьки, сходные с эндоплазматической сетью. На протяжении профазы продолжается спирализация хромосом, которые становятся толстыми и короткими. После распада ядерной оболочки хромосомы свободно и беспорядочно лежат в цитоплазме.

В *метафазе* спирализация хромосом становится максимальной и укороченные хромосомы устремляются к экватору клетки, располагаясь на равном расстоянии от полюсов. Митотическое веретено деления уже полностью сформировано и его микротрубочки соединяют полюса с центромерами хромосом. Каждая хромосома продольно

расщепляется на две хроматиды (дочерние хромосомы), соединённые в области центromеры. Центromерные участки хромосом находятся строго в экваториальной плоскости, а дочерние центromеры и хроматиды обращены к противоположным полюсам.

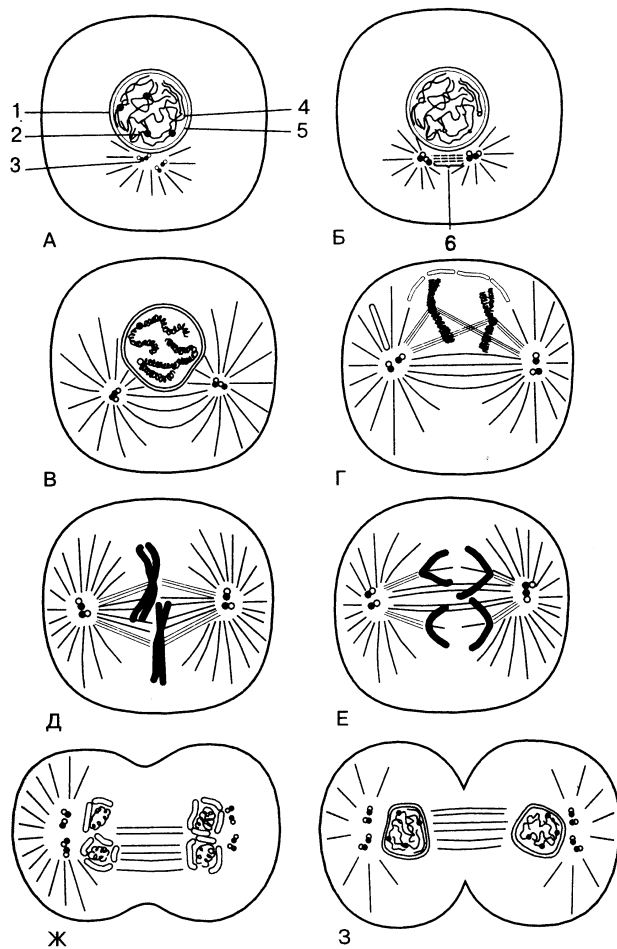


Рис. 9.3. Схема митоза. А, Б – интерфаза; В, Г – профаза;
 Д – метафаза; Е – анафаза; Ж, З – телофаза:
 1 – центромера; 2 – ядрышко; 3 – центриоль; 4 – хромосома;
 5 – ядерная оболочка; 6 – веретено.

В *анафазе* центромеры разъединяются, и с этого момента хроматиды становятся самостоятельными

хромосомами. Трубочки веретена, прикреплённые к центромерам, тянут хромосомы к полюсам клетки со скоростью 0,2–5 мкм/мин. По завершении движения на полюсах собирается два равноценных полных набора хромосом.

Завершается митоз *телофазой*. Хромосомы, собравшиеся у полюсов, деспирализуются и становятся плохо видимыми. Реконструируются ядра дочерних клеток. Образуются ядрышки. Из мембранных структур цитоплазмы образуются ядерные оболочки. Материнская клетка делится на две дочерние.

Биологическое значение митоза огромно. Благодаря точному распределению генетического материала между дочерними клетками митоз обеспечивает такие важные явления жизнедеятельности, как эмбриональное развитие, рост, восстановление органов и тканей после повреждения, поддержание структурной целостности тканей при постоянной утрате клеток в процессе их функционирования.

9.4.3. Структурно-функциональная организация генетического материала

Генетический материал, содержащийся в клетке, образует структурно дифференцированные единицы, называемые хромосомами. Хромосомы представляют собой мультимолекулярные агрегаты, образованные преимущественно молекулами ДНК и белка и содержащие небольшое количество РНК, не являющейся, строго говоря, структурной частью хромосомы.

Строение хромосом хорошо видно на стадии метафазы

митоза. Изучение хромосом позволило установить следующие факты: 1) во всех соматических клетках любого растительного или животного организма число хромосом одинаково; 2) в половых клетках содержится всегда вдвое меньше хромосом, чем в соматических клетках данного вида организмов; 3) у всех организмов, относящихся к одному виду, число хромосом в клетках одинаково, например, у человека в соматических клетках имеется 23 пары хромосом, а у голубя – 40. Число хромосом в соматических клетках всегда чётное, так как в них находятся по две одинаковых по форме и размерам хромосомы: одна от отцовского организма, а другая – от материнского. Хромосомный набор соматической клетки, в котором каждая хромосома имеет себе пару, носит название *двойного*, или *диплоидного, набора*. В половые клетки из каждой пары хромосом попадает только одна, поэтому хромосомный набор в этом случае называется *одинарным* или *гаплоидным*.

Схематично строение хромосом представлено на рис. 9.4.

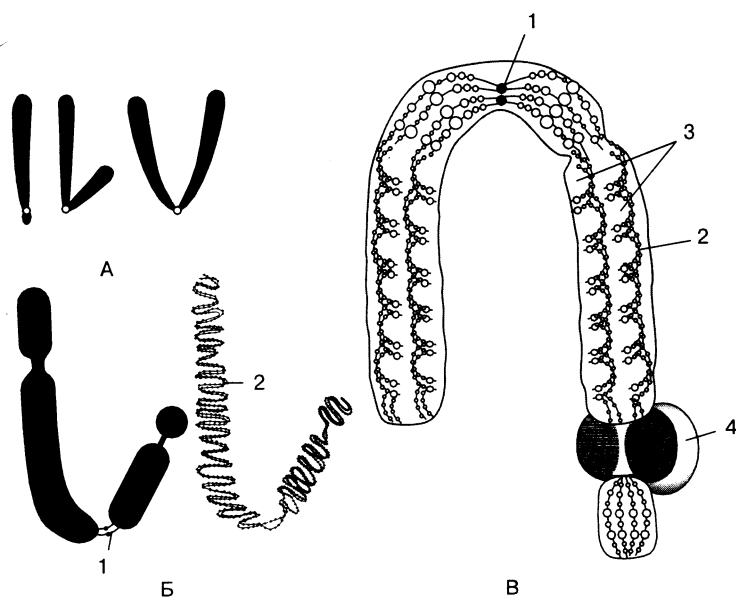


Рис. 9.4. Строение хромосом. А – типы хромосом; Б, В – тонкое строение хромосом:

1 – центромера; 2 – спирально закрученная нить ДНК; 3 – хроматиды; 4 – ядрышко.

В определении формы хромосом большое значение имеет положение так называемой *первичной перетяжки* или *центромеры* – области, к которой во время митоза прикрепляются трубочки веретена. Центромера делит хромосому на два плеча. Расположение центромеры определяет три основных типа хромосом: 1) равноплечие – с плечами равной или почти равной длины; 2) неравноплечие, имеющие плечи неравной длины; 3) палочковидные – с одним длинным и вторым очень коротким, иногда с трудом обнаруживаемым плечом.

Непосредственным носителем наследственной информации в хромосомах является ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) – биологический полимер, состоящий из двух полинуклеотидных цепей, соединённых друг с другом. Мономеры, составляющие каждую из цепей ДНК, представляют собой сложные органические соединения, включающие одно из четырёх азотистых оснований: аденин (А), или тимин (Т), или цитозин (Ц), или гуанин (Г); сахар – дезоксирибозу, по имени которой получила название и сама ДНК, а также остаток фосфорной кислоты. Эти соединения носят название нуклеотидов (рис. 9.5).

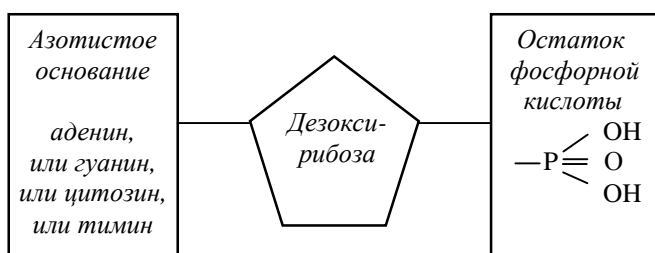


Рис. 9.5. Схема строения нуклеотида

В каждой цепи нуклеотиды соединяются путём образования ковалентных связей между дезоксирибозой одного и остатком фосфорной кислоты последующего нуклеотида. Объединяются две цепи в одну молекулу при помощи водородных связей, возникающих между азотистыми основаниями, входящих в состав нуклеотидов, образующих разные цепи. Количество таких связей между разными азотистыми основаниями неодинаково, и вследствие этого они могут соединяться только попарно: азотистое основание А одной цепи полинуклеотидов всегда

связано двумя водородными связями с Т другой цепи, а Г – тремя водородными связями с азотистым основанием Ц противоположной полинуклеотидной цепочки. Такая способность к избирательному соединению нуклеотидов называется *комплементарностью*. Комплементарное взаимодействие нуклеотидов приводит к образованию пар нуклеотидов (рис. 9.6). В полинуклеотидной цепочке соседние нуклеотиды связаны между собой через сахар (дезоксирибозу) и остаток фосфорной кислоты. В 1953 году американским биофизиком Дж.Уотсоном (род. 1928) совместно с английским биофизиком и генетиком Ф.Криком (род. 1916) была предложена модель пространственной структуры ДНК в виде двойной спирали (рис. 9.7).

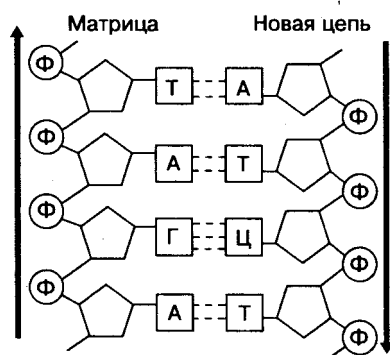


Рис. 9.6. Комплементарное соединение нуклеотидов и образование двухцепочечной молекулы ДНК:

А – аденин; Г – гуанин; Т – тимин; Ц – цитозин; Д – дезоксирибоза;
Ф – остаток фосфорной кислоты

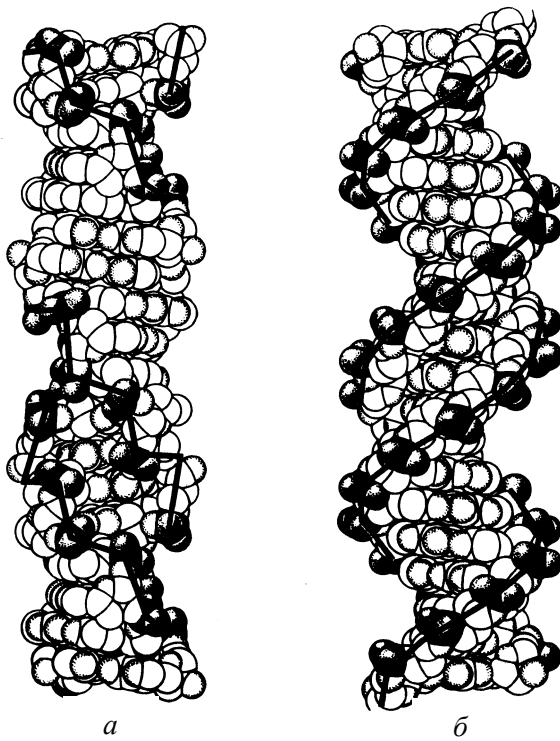


Рис. 9.7. Пространственные модели левозакрученной (а) и правозакрученной (б) спиралей ДНК.

Таким образом, в структурной организации молекулы ДНК можно выделить *первичную структуру* – полинуклеотидную цепь, *вторичную структуру* – две

комплементарные друг другу и антипараллельные полинуклеотидные цепи, соединённые водородными связями, и *третичную структуру* – трёхмерную спираль. Диаметр спирали составляет 2 нм, длина шага – 3,4 нм. В каждый виток входит 10 пар нуклеотидов. Длина спирали молекула ДНК зависит от организма, которому она принадлежит.

ДНК простейших вирусов содержит несколько тысяч нуклеотидных пар, бактерий – несколько миллионов, а высших организмов – миллиарды. Если выстроить в одну линию все молекулы ДНК, заключённые в одной клетке человека, то получится нить длиной 2 м, т. е. её длина в миллиард раз больше её толщины.

Относительная простота структуры ДНК, представляющей чередование всего лишь четырёх различных нуклеотидов, долгое время мешала исследователям рассматривать это соединение как материальный субстрат наследственности и изменчивости, в котором должна быть зашифрована чрезвычайно разнообразная информация. В 1954 году Г.А.Гамовым было высказано предположение, что кодирование генетической информации в молекулах ДНК должно осуществляться сочетанием нескольких нуклеотидов.

Всё многообразие жизни обуславливается разнообразием белковых молекул. Только в организме человека встречается около 5 млн типов белковых молекул, отличающихся по своей массе, структуре и функциям не только друг от друга, но и от белков других организмов. Однако, несмотря на такое разнообразие и сложность строения, все белки построены всего из 20 различных аминокислот. Для шифровки такого их числа достаточное количество сочетаний нуклеотидов обеспечивает

триплетный код, в котором каждая аминокислота шифруется тремя стоящими рядом нуклеотидами. В этом случае из четырёх нуклеотидов образуется $4^3 = 64$ триплета. Код, состоящий из двух нуклеотидов, дал бы возможность зашифровать только $4^2 = 16$ различных аминокислот. Из 64 возможных триплетов ДНК кодирует аминокислоты 61 триплет, а оставшиеся 3 триплета выполняют функцию знаков препинания при считывании наследственной информации.

Генетический код обладает *специфичностью*. Каждый триплет способен кодировать только одну определённую аминокислоту. Интересным фактом является полное соответствие кода у различных видов живых организмов. Такая *универсальность* генетического кода свидетельствует о единстве происхождения всего многообразия живых форм на Земле в процессе биологической эволюции.

Одним из основных свойств материала наследственности является его способность к самокопированию – *редупликации*. Это свойство обеспечивается особенностями химической организации молекулы ДНК, состоящей из двух комплементарных цепей. В процессе редупликации на каждой полинуклеотидной цепи материнской молекулы ДНК синтезируется комплементарная ей цепь. В итоге из одной спирали ДНК образуются две идентичные двойные спирали дочерних ДНК (рис. 9.8).

В процессе синтеза ДНК принимает участие целая группа ферментов. С помощью фермента *геликазы* разрываются водородные связи и двойная спираль ДНК расплетается в местах начала редупликации. Образующиеся при этом одинарные цепи ДНК связываются специальными дестабилизирующими белками, которые

растягивают остовы цепей, делая их азотистые основания доступными для связывания с комплементарными нуклеотидами, находящимися в нуклеоплазме. На каждой из цепей, образующихся в области редупликации, при участии фермента ДНК-полимеразы осуществляется синтез дочерних комплементарных цепей.

Редупликация молекул ДНК происходит с удивительной точностью: новые молекулы абсолютно идентичны старой. В этом заключается глубокий биологический смысл, потому что нарушение структуры ДНК, приводящие к искажению генетического кода, сделали бы невозможным сохранение и передачу по наследству генетической информации, обеспечивающей развитие полезных для организма признаков. И всё же под воздействием химических и физических факторов (ультрафиолетовое и ионизирующее излучение, повышенная температура) правильность структуры вновь синтезированной молекулы ДНК может нарушаться. Для ликвидации этих нарушений существует специальный фермент, который «узнаёт» участок молекулы ДНК, не сходный с матрицей, и выщипывает его, после чего недостающий участок достраивается. Таким образом, консерватизм наследственности обеспечивают матричный синтез ДНК и система восстановления повреждённых участков молекулы.

9.4.4. Использование генетической информации в процессах жизнедеятельности. Синтез белка

Наследственная информация, записанная с помощью генетического кода, хранится в молекулах ДНК и размножается для того, чтобы обеспечить вновь образуемые клетки необходимыми «инструкциями» для их развития и

функционирования. Вместе с тем непосредственного участия в жизнеобеспечении клеток ДНК не принимает. Роль посредника, функцией которого является перевод наследственной информации, хранящейся в ДНК, в рабочую форму, играют *рибонуклеиновые кислоты – РНК*.

В отличие от молекул ДНК рибонуклеиновые кислоты представлены одной полинуклеотидной цепью, которая состоит из четырёх разновидностей нуклеотидов, содержащих сахар – рибозу (вместо дезоксирибозы), остаток фосфорной кислоты и одно из четырёх азотистых оснований – аденин, гуанин, цитозин или урацил (вместо тимина). В цепочке РНК нуклеотиды соединяются путём образования ковалентных связей между рибозой одного нуклеотида и остатком фосфорной кислоты другого. РНК синтезируются на молекулах ДНК при помощи ферментов РНК-полимераз с соблюдением принципа комплементарности, причём аденину ДНК в РНК комплементарен урацил. Всё многообразие РНК, действующих в клетке, в зависимости от функции и местонахождения можно разделить на три вида: *информационные РНК* (иРНК), *транспортные РНК* (тРНК) и *рибосомные РНК* (рРНК). Каждая из этих РНК синтезируется на определённом участке ДНК.

Процесс синтеза иРНК, который называют *транскрипцией* – переписыванием информации, начинается с обнаружения РНК-полимеразой особого участка в молекуле ДНК, указывающего место начала транскрипции – *промотора*. После присоединения к промотору РНК-полимераза раскручивает прилежащий виток спирали ДНК. Две цепи ДНК в этом месте расходятся, и на одной из них фермент осуществляет синтез иРНК (рис. 9.9). Размер иРНК зависит от длины участка ДНК, на котором она была

синтезирована. Молекулы иРНК могут состоять из 300–30 000 нуклеотидов.

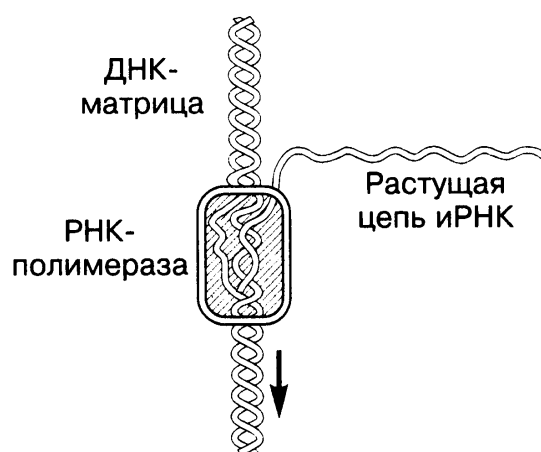


Рис. 9.9. Синтез иРНК (транскрипция). В месте синтеза иРНК цепи ДНК расходятся (расплетаются).

В процессе синтеза, по мере продвижения РНК-полимеразы вдоль молекулы ДНК, пройденные ею одноцепочечные участки ДНК вновь объединяются в двойную спираль. Образованная в ходе транскрипции иРНК содержит точную копию информации, записанной в соответствующем участке ДНК. Тройки рядом стоящих нуклеотидов иРНК, шифрующие аминокислоты, называются *кодонами*. Последовательность кодонов иРНК шифрует последовательность аминокислот в полипептидной цепи. Кодонам иРНК соответствуют определённые аминокислоты (рис. 9.10).

Важная роль в процессе использования наследственной информации клеткой принадлежит транспортной РНК, состоящей из 75–95 нуклеотидов (рис. 9.11). Доставляя

необходимые аминокислоты к месту сборки пептидных цепей, тРНК выполняет функцию трансляционного посредника. Транспортные РНК по принципу комплементарности (взаимного соответствия) «узнают» участок (триплет) иРНК, соответствующий переносимой аминокислоте, и осуществляют ориентацию аминокислоты на рибосоме. Установлено существование нескольких типов тРНК, способных соединяться с одним и тем же кодоном, и некоторых типов тРНК, которые узнают несколько кодонов. В результате в цитоплазме клеток встречается не 61 (по количеству кодонов), а около 40 различных молекул тРНК. Этого количества достаточно, чтобы транспортировать 20 разных аминокислот к месту сборки белка.



Рис. 9.10. Соотношение последовательности триплетов ДНК, РНК и аминокислот в белковой молекуле.

Процесс взаимодействия иРНК и тРНК, обеспечивающий трансляцию информации с языка нуклеотидов на язык аминокислот, осуществляется на *рибосомах*. Последние

представляют собой сложные комплексы рРНК и разнообразных белков, в которых первые образуют каркас. Рибосомные РНК содержат от 3000 до 5000 нуклеотидов и являются не только структурным компонентом рибосом, но и обеспечивают связывание их с определённой нуклеотидной последовательностью иРНК. Этим устанавливается начало и рамка считывания при образовании пептидной цепи. Кроме того, они обеспечивают взаимодействие рибосомы и тРНК. Многочисленные белки, входящие в состав рибосом наряду с рРНК, выполняют как структурную, так и ферментативную роль.

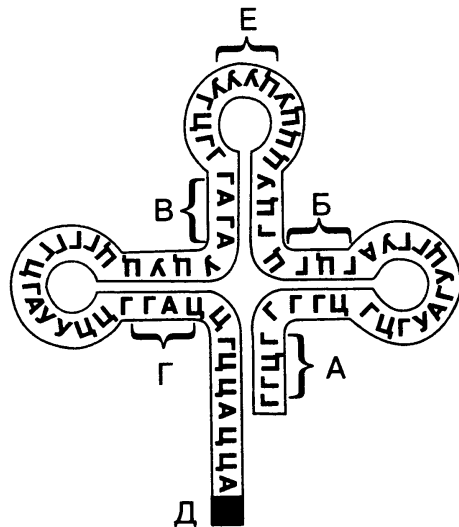


Рис. 9.11. Схема строения тРНК: А, Б, В, Г – участки комплементарного соединения внутри одной цепочки РНК; Д – активный центр (участок соединения с аминокислотой); Е – участок комплементарного соединения с молекулой иРНК.

Рассмотрим процесс синтеза белка (рис. 9.12). В цитоплазме на один из концов информационной РНК, а именно на тот, с которого начинается синтез иРНК в ядре, вступает рибосома и начинается синтез полипептида. Рибосомная РНК удерживает иРНК и поступающую в рибосому тРНК, а также выступает катализатором процесса синтеза белков. По мере продвижения по молекуле иРНК рибосома транслирует триплет за триплетом, т. е. переводит последовательности нуклеотидов в молекуле иРНК в последовательность аминокислот полипептидной цепи, присоединяя последовательно аминокислоты к растущему концу полипептидной цепи.

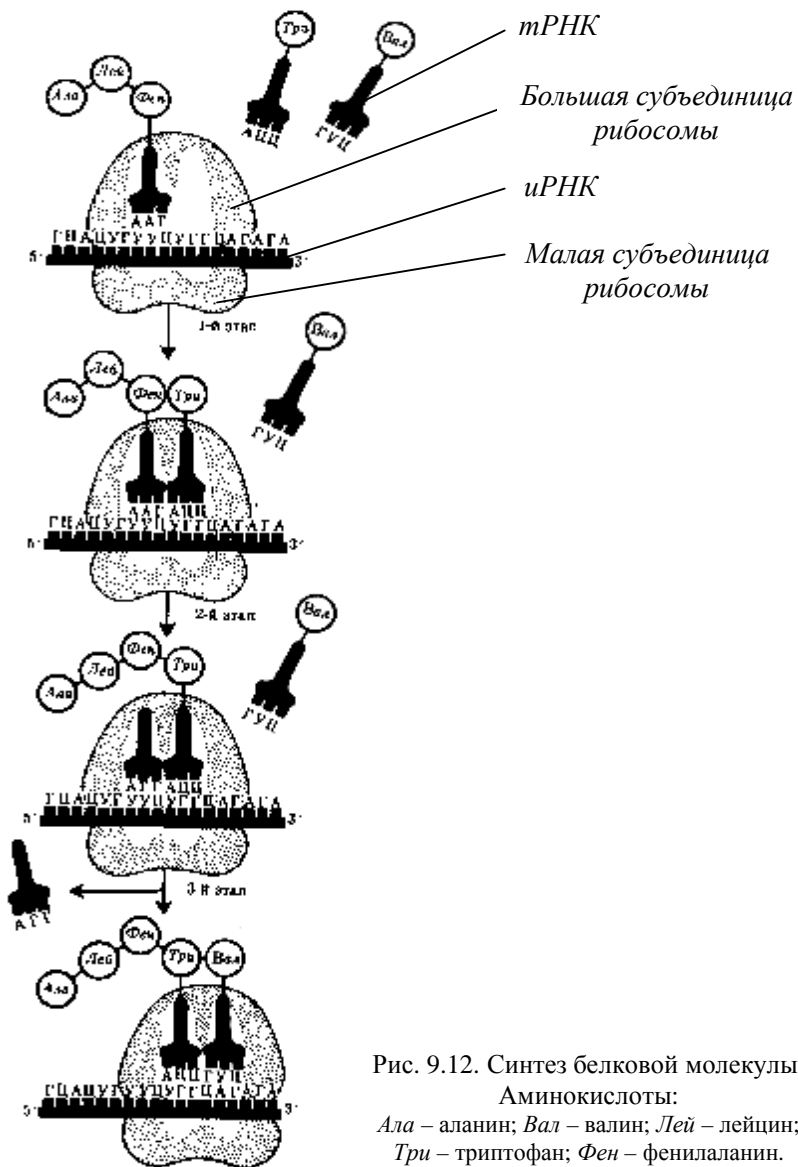


Рис. 9.12. Синтез белковой молекулы.

Аминокислоты:

Ала – аланин; Вал – валин; Лей – лейцин;
 Три – триптофан; Фен – фенилаланин.

Точное соответствие аминокислоты коду триплета иРНК обеспечивается транспортной РНК. Для каждой аминокислоты существует своя тРНК, один из триплетов которой (антикодон) комплементарен определённому триpletу (кодону) иРНК. На другом конце молекулы тРНК расположен триплет, способный связываться с определённой аминокислотой (рис. 9.12). Каждой аминокислоте соответствует свой фермент, присоединяющий её к тРНК. Таким образом, процесс правильного расположения тРНК на иРНК осуществляется рибосомами. Одна рибосома способна синтезировать полную полипептидную цепь. Однако нередко по одной молекуле иРНК движется несколько рибосом. Такие комплексы называются *полирибосомами*. После завершения синтеза полипептидная цепочка отделяется от матрицы – молекулы иРНК, сворачивается в спираль и приобретает структуру, свойственную данному белку.

9.5. Виды живых систем. Свойства жизни

В настоящее время на Земле обитает огромное количество видов живых систем, среди которых более 500 тыс. видов растений, из них цветковых примерно 300 тыс., и около 1200 тыс. видов животных, из них около 900 тыс. членистоногих, 110 тыс. видов моллюсков, около 45 тыс. видов хордовых животных, из которых около 40 тыс. позвоночных.

Подавляющее большинство ныне живущих организмов (кроме вирусов и фагов) состоят из клеток. По признаку клеточного строения все живые организмы делятся на доклеточные и клеточные. Доклеточные формы жизни – вирусы, открытые в 1892 году русским микробиологом Д.И.Ивановским (1864–1920), и фаги. Вирусы занимают

промежуточное место между живым и неживым. Они состоят из белковых молекул и нуклеиновых кислот; не имеют собственного обмена веществ; вне организма или клетки они не проявляют признаков жизни. Все клеточные подразделяются на четыре царства: безъядерные (бактерии, цианеи), растения (багрянки, настоящие водоросли, высшие растения), грибы (низшие и высшие) и животные (простейшие и многоклеточные). Безъядерные, видимо, относятся к самым древним формам жизни на Земле.

Биологические системы отличаются высоким уровнем целостности и самоорганизацией. Живые системы – открытые системы, постоянно обменивающиеся веществом, энергией и информацией со средой. Для них характерны уменьшение энтропии вследствие увеличения упорядоченности в процессе органической эволюции и способность к самоорганизации материи. Закономерности изменения энтропии подчиняются второму началу термодинамики. Согласно этому закону, в энергетически изолированной системе при неравновесных процессах количество энтропии изменяется в одну сторону. Оно увеличивается, становясь максимальным по достижении состояния равновесия. Живой организм отличается высокой степенью структурированности и низкой энтропией. Это достигается благодаря постоянному притоку извне вещества, энергии и информации, используемых на поддержание и развитие внутренней структуры. Способность противостоять нарастанию энтропии, сохранять высокий уровень упорядоченности является обязательным свойством жизни.

В настоящее время существует большое количество определений понятия «жизнь», обобщая которые можно характеризовать *жизнь как способ существования*

макромолекулярной открытой системы, которой свойственны иерархическая организация, способность к самовоспроизведению, обмен веществ, тонко регулируемые потоки энергии и информации. Жизнь представляет собой постоянный процесс самообновления, в результате которого воссоздаются структуры, соответствующие снашиваемым и утрачиваемым. Основу живого образуют нуклеиновые кислоты и белки.

Основой воспроизводства является синтез белков, который происходит в клетках организма при помощи нуклеиновых кислот – ДНК и РНК. Сущность живого наиболее концентрированно выражена в замечательном явлении *конвариантной редупликации* – самовоспроизведения с возможностью изменения закодированной генетической информации, осуществляемого на основе матричного принципа синтеза макромолекул. В его основе – уникальная способность к самовоспроизведению основных управляющих систем (ДНК и хромосом), которые обладают относительно высокой степенью стабильности. Такая стабильность и обеспечивает возможность идентичного самовоспроизведения (явление наследственности). Все основные свойства живого немыслимы без наследственной передачи свойств в ряду поколений.

С другой стороны, при самовоспроизводстве управляющих систем в живых организмах происходит не абсолютное повторение, а воспроизведение с внесением изменений, что также определяется свойствами ДНК. Абсолютной стабильности в природе не бывает. Любая достаточно сложная молекулярная структура претерпевает структурные изменения в результате движения атомов и молекул. Если эти изменения не ведут к летальному исходу,

они будут передаваться по наследству в результате самовоспроизведения по матричному принципу. Конвариантная редупликация даёт возможность передачи по наследству *мутаций*, т. е. дискретных отклонений от исходного состояния.

Живым существам присущ особый способ взаимодействия с окружающей средой – *обмен веществ*. Его содержание составляют взаимосвязанные и сбалансированные процессы ассимиляции и диссимиляции. Результатом *ассимиляции* является образование структур организма, *диссимиляции* – расщепление органических соединений с целью обеспечения различных сторон жизнедеятельности необходимыми веществами и энергией. Для осуществления обмена веществ необходимы постоянный приток определённых веществ извне и выделение некоторых продуктов диссимиляции во внешнюю среду. Таким образом, организм является по отношению к окружающей среде *открытой системой*.

Процессы ассимиляции и диссимиляции представлены многочисленными химическими реакциями, объединёнными в метаболические цепи, циклы, каскады. Последние представляют собой совокупность взаимосвязанных реакций, протекание которых строго упорядочено во времени и пространстве. Упорядоченность различных сторон обмена веществ достигается благодаря структурированности клетки, т. е. наличия в ней обязательных структур, таких как митохондрии, рибосомы, лизосомы и др., согласовано выполняющих определённые функции. На важность свойства структурированности указывает следующий пример. Тело микоплазмы (микроорганизма, занимающего по размерам промежуточное положение между вирусами и типичными

бактериями) превосходит по диаметру атом водорода всего в 1000 раз. Даже в таком малом объеме, благодаря структурированности, осуществляется примерно 100 согласованных во времени и пространстве биохимических реакций, необходимых для жизнедеятельности этого организма. Для сравнения: жизнедеятельность клетки человека требует согласованного протекания более 10 000 биохимических реакций.

Любая упорядоченность для своего поддержания и развития требует притока энергии и информации. Обмен энергией и информацией между организмом и средой осуществляется либо в процессе обмена веществом, либо – излучением. Так, на этапе диссимиляции, при которой сложные органические соединения распадаются на простые, выделяется энергия, необходимая для реакции биосинтеза. Поэтому диссимиляцию называют ещё *энергетическим обменом*.

Область жизни представлена совокупностью отдельных организмов, т. е. характеризуется *дискретностью*. Продолжительность жизни организмов ограничена. В связи с этим сохранение жизни во времени зависит от такого её свойства, как способности к размножению, а именно, к воспроизведению себе подобных по типу обмена веществ и главным чертам морфофизиологической (структурной) организации.

Существуют также свойства, распространяющиеся на область жизни в целом. Они отражают универсальные принципы её существования во времени и пространстве. Одно из таких свойств – *включённость организма в процесс эволюции*. Благодаря этому жизнь как особое явление материального мира сохраняется на протяжении вот уже более 3 млрд лет. Второе такое свойство – *существование*

отдельных организмов лишь во взаимодействии с другими в составе сообществ – биоценозов.

9.6. Основные уровни организации живого

Живая природа является целостной, но неоднородной системой, которой свойственна иерархическая организация. Под системой в науке понимают единство или целостность, составленное из множества элементов, которые находятся в закономерных отношениях и связях друг с другом. Биологическими системами являются, например, клетка, организм, популяция, биогеоценоз, биосфера и другие. Иерархической называется система, в которой части, или элементы, расположены в порядке от низшего к высшему. Так, в живой природе биосфера складывается из биогеоценозов, представленных популяциями организмов разных видов, а организмы состоят из органов, имеющих клеточное строение.

Иерархический принцип организации позволяет выделить в живой природе отдельные уровни, что удобно с точки зрения изучения жизни как сложного природного явления. В биологической науке широко используют классификацию уровней в соответствии с важнейшими частями, структурами и компонентами организма, являющимися для исследователей разных специальностей непосредственными объектами изучения. Такими объектами могут быть организм как таковой, органы, ткани, клетки, внутриклеточные структуры, молекулы.

Взаимопроникновение идей и методов различных областей естествознания (физики, химии, биологии), возникновение наук на стыке этих областей (биофизика, биохимия, молекулярная биология) повлекли за собой

расширение классификации, вплоть до выделения молекулярного и атомного уровней.

Возможность исследовать фундаментальные биологические процессы, происходящие в организме, на клеточном, субклеточном и даже молекулярном уровнях, является выдающейся, но не единственной отличительной чертой современной биологии. Для неё типичен углублённый интерес к процессам в сообществах организмов, которые определяют планетарную роль жизни. Таким образом, классификация пополнилась надорганизменными уровнями, такими, как видовой, биогеоценотический, биосферный.

Основываясь на специфических особенностях дискретных структур и фундаментальных биологических взаимодействиях, выделяют следующие основные уровни организации живого: *молекулярно-генетический, клеточный, онтогенетический (организменный), популяционно-видовой, биогеоценотический*. Особенность данной классификации заключается в том, что отдельные уровни иерархической системы жизни определяются в ней на общей основе выделения для каждого уровня элементарной единицы и элементарного явления. *Элементарная единица* – это структура или объект, закономерные изменения которых, обозначаемые как *элементарные явления*, составляют специфический для соответствующего уровня вклад в процесс сохранения и развития жизни. Соответствие выделяемых уровней узловым моментам эволюционного процесса, вне которого не стоит ни одно живое существо, делает их всеобщими, распространяющимися на всю область жизни, включая человека.

Молекулярно-генетический уровень. *Элементарной единицей* на молекулярно-генетическом уровне служит *ген* – фрагмент молекулы ДНК, в котором записан определённый в качественном и количественном отношении объём биологической (генетической) информации. Ген определяет возможность развития отдельного элементарного признака. Однако следует иметь в виду, что при наличии в организме какого-либо гена признак, обусловленный этим геном может и не проявиться. Возможность развития признаков в значительной степени зависит от условий внешней среды. *Элементарное явление* на молекулярно-генетическом уровне заключается прежде всего в процессе *конвариантной редупликации*, или в *самовоспроизведении*, с возможностью некоторых изменений в содержании закодированной в гене информации (мутаций), в способности передавать хранящуюся в них информацию внутриклеточным управляющим системам.

Клеточный уровень. Воплощение биологической информации в конкретные процессы жизнедеятельности требует специальных структур, энергии и разнообразных химических веществ (субстратов). Эти условия в живой природе обеспечивает *клетка, служащая элементарной структурой клеточного уровня*. *Элементарное явление представлено реакциями клеточного метаболизма*, составляющими основу потоков энергии, веществ и информации. Благодаря деятельности клетки поступающие извне вещества превращаются в субстраты и энергию, которые используются (в соответствии с имеющейся генетической информацией) в процессе биосинтеза белков и других соединений, необходимых организму. Таким образом, на клеточном уровне сопрягаются механизмы передачи биологической информации и превращения

веществ и энергии. Элементарное явление на этом уровне служит энергетической и вещественной основой жизни на всех других уровнях её организации.

Онтогенетический уровень. *Элементарной единицей* организменного уровня является *особь* в её развитии от момента зарождения до прекращения существования в качестве живой системы, что позволяет также назвать этот уровень *онтогенетическим* (уровнем индивидуального развития). *Закономерные изменения организма в индивидуальном развитии составляют элементарное явление данного уровня.* Эти изменения обеспечивают рост организма, дифференциацию его частей и одновременно интеграцию развития в единое целое, специализацию клеток, органов и тканей. В ходе онтогенеза в определенных условиях внешней среды происходит воплощение наследственной информации в биологические структуры и процессы, на основе генотипа (совокупности всех генов одного организма) формируется фенотип (совокупность всех признаков организма, обусловленных его генотипом) организмов данного вида.

Онтогенез определяется деятельностью некоторой саморегулирующейся иерархической системы, согласовано реализующей наследственные свойства и работу управляющих систем в пределах особи. Однако в настоящее время не известно, почему в онтогенезе строго определённые процессы происходят в должное время и в нужном месте. Одна из важнейших проблем современной биологии – выявление закономерностей регуляции внутриклеточных процессов, функций клетки и механизма включения генов в процессе клеточной дифференцировки, ведь в процессе развития каждой клетки в ней работают

только те гены, функция которых необходима для развития конкретного органа.

Популяционно-видовой уровень. *Элементарной единицей* популяционно-видового уровня служит *популяция* – совокупность особей одного вида, населяющих определённую территорию, более или менее изолированную от соседних совокупностей того же вида. Объединение особей в популяцию происходит благодаря общности генофонда, используемого в процессе полового размножения для создания генотипов особей следующего поколения. Популяция в силу возможности межпопуляционных скрещиваний представляет собой открытую генетическую систему. Действие на генофонд популяции элементарных эволюционных факторов, таких, как мутационный процесс, колебания численности особей, естественный отбор, приводит к эволюционно значимым изменениям генофонда.

Популяции целостны, хотя состоят из множества особей. Их целостность базируется на иных основаниях, чем целостность молекулярно-генетического и онтогенетического уровней. Она обеспечивается взаимодействием особей в популяциях и воссоздаётся через обмен генетическим материалом в процессе полового размножения. *Виды* – это системы популяций. Популяции и виды как надиндивидуальные образования способны к самостоятельному эволюционному развитию в течение длительного времени. Виды являются наименьшими генетически закрытыми системами, поскольку скрещивание особей разных видов в природе в подавляющем большинстве случаев не ведёт к появлению плодовитого потомства.

Если популяция – основная элементарная структура на популяционно-видовом уровне, то *элементарное явление* на этом уровне – *изменение генотипического состава популяции*; элементарный материал на этом уровне – *мутации*. В синтетической теории эволюции выделены элементарные факторы, действующие на этом уровне: мутационный процесс, популяционные волны, изоляция и естественный отбор. Каждый из этих факторов может оказать определенное воздействие на популяцию и вызвать изменения в генотипическом составе популяции.

Популяции и виды, а также протекающий в популяциях процесс эволюции всегда существуют в определенной природной среде, конкретной системе, которая включает в себя биотические и абиотические факторы. *Биотические факторы среды* – совокупность явлений, оказываемых на организмы жизнедеятельностью других организмов. *Абиотические факторы среды* – совокупность условий неорганической среды, влияющих на организмы. Они делятся на химические, физические, космические, геолого-географические, климатические и др. Такая система получила название «*биогеоценоз*» – *это элементарная единица следующего (биогеоценотического) уровня организации жизни на Земле.*

Биогеоценотический уровень. Всю полноту взаимодействий и взаимозависимости живых существ и элементов неживой природы в области распространения жизни отражает концепция биогеоценоза. *Биогеоценоз* (экологическая система, экосистема) – это динамическое и устойчивое сообщество растений, грибов, микроорганизмов и животных (биотическая составляющая или биоценоз), находящихся в постоянном взаимодействии и непосредственном контакте с компонентами атмосферы,

гидросферы и литосферы (абиотической составляющей). *Биотическая* (живая) и *абиотическая* (неживая) компоненты биогеоценоза связаны между собой обменом веществ, энергией и информацией.

Биогеоценоз – это целостная система. Виды в биогеоценозе действуют друг на друга не только непосредственно, но и опосредованно через изменения ими абиотических условий. Выпадение одного или нескольких компонентов биогеоценоза может привести к разрушению целостности биогеоценоза, что часто ведёт к необратимому нарушению равновесия и гибели биогеоценоза как системы. В целом жизнь биогеоценоза регулируется силами, действующими внутри самой системы, т. е. можно говорить о саморегуляции биогеоценоза. В то же время биогеоценоз представляет собой незамкнутую систему, взаимодействующую с соседними биогеоценозами. Обмен веществ и энергией между соседними биогеоценозами может осуществляться в разных формах: газообразной, жидкой и твердой, а также в форме миграции животных.

Элементарным явлением на биогеоценозическом уровне является обмен веществом, энергией и информацией между компонентами биогеоценоза, обеспечивающий их согласованное функционирование и устойчивое развитие биогеоценоза как целого. Биогеоценоз – это уравновешенная, взаимосвязанная и стойкая во времени система, которая является результатом длительной и глубокой адаптации составных компонентов. Устойчивость его пропорциональна многообразию его компонентов: чем многообразнее биогеоценоз, тем он, как правило, устойчивее во времени и в пространстве. Например, биогеоценозы, представленные тропическими лесами, гораздо устойчивее биогеоценозов в зоне умеренного или

арктического поясов, так как тропические биогеоценозы состоят из гораздо большего количества видов растений и животных, имеют бóльшую биомассу и интенсивнее взаимодействуют с соседними биогеоценозами, чем умеренные и тем более арктические биогеоценозы.

Каждая экосистема неизменно содержит как простые, так и сложные компоненты, так как высокоорганизованные организмы для своего существования нуждаются в более простых организмах. Биогеоценоз только из бактерий или деревьев никогда не сможет существовать, как нельзя представить экосистему, населённую лишь позвоночными или млекопитающими. Таким образом, низшие организмы в экосистеме – это не какой-то случайный пережиток прошлых эпох, а необходимая составная часть биогеоценоза, целостной системы органического мира, основа его существования и развития, без которой невозможен обмен веществом и энергией между компонентами биогеоценоза.

Для обеспечения постоянного круговорота вещества, поддержания целостности системы и обеспечения её эволюции экосистема нуждается в притоке энергии. Первичным источником энергии служит *солнечное излучение*, мощность которого составляет $4,6 \cdot 10^{26}$ Вт. На поверхность Земли падает около $2 \cdot 10^{17}$ Вт солнечного излучения, причём на фотосинтез органического вещества растениями потребляется около $4 \cdot 10^{13}$ Вт.

Первичной биотической основой для сложения биогеоценозов служат *автотрофы* – фотосинтезирующие зелёные растения и микроорганизмы, а также хемосинтезирующие бактерии (хемосинтетики), производящие органическое вещество из двуокиси углерода за счёт энергии, получаемой при окислении неорганических

соединений (аммиака, водорода, соединений серы и др.). Автотрофные растения и микроорганизмы представляют жизненную среду для *гетеротрофов* – животных, грибов, большинства бактерий, вирусов. Поэтому и границы биогеоценозов чаще всего совпадают с границами растительных сообществ (фитоценозов). Но и животные впоследствии начинают играть важную роль в жизни растений: они осуществляют опыление, распространение плодов, участвуют в круговороте веществ и т. д. Так складывается биогеоценотический комплекс, который может существовать веками.

Автотрофы, и прежде всего фотосинтетики, играют поистине космическую роль на Земле. Фиксируя энергию солнечного излучения в продуктах фотосинтеза, растения выполняют роль космического очага энергии на Земле. Ежегодно растения образуют до 100 млрд тонн органических веществ. При этом растения усваивают из атмосферы до 170 млрд тонн углекислого газа, разлагают до 130 млрд тонн воды и выделяют до 115 млрд тонн свободного кислорода. Таким образом, жизнь на Земле полностью зависит от фотосинтеза. Учение о фотосинтезе было создано русским физиологом К.А.Тимирязевым (1843–1920).

Приведенные выше уровни жизни отражают важнейшие биологические явления, без которых невозможны эволюция и, следовательно, само существование жизни. Хотя элементарные единицы и явления на выделяемых уровнях различны, все они тесно взаимосвязаны, решая свою специфическую задачу в рамках единого эволюционного процесса. С конвариантной редупликацией на молекулярно-генетическом уровне связаны элементарные основы этого процесса в виде явлений наследственности и истинной

мутационной изменчивости. Особая роль клеточного уровня состоит в энергетическом, вещественном и информационном обеспечении, происходящего на всех других уровнях. На онтогенетическом уровне биологическая информация, находящаяся в генах, преобразуется в комплекс признаков и свойств организма. На популяционно-видовом уровне определяется эволюционная ценность изменений, относящихся к молекулярно-генетическому, клеточному и онтогенетическому уровням. Специфическая роль биогеоценотического уровня состоит в образовании сообществ организмов разных видов, приспособленных к совместному проживанию в определенной среде обитания. Важной отличительной чертой таких сообществ является их устойчивость во времени.

Рассмотренные уровни отражают общую структуру эволюционного процесса, закономерным результатом которого является человек. Поэтому типичные для этих уровней элементарные структуры и явления распространяются и на людей, правда, с некоторыми особенностями в силу их социальной сущности.

Литература к главе 9

1. *Алексенко В.А., Алексенко Л.П.* Биосфера и жизнедеятельность: Учебное пособие. – М.: Логос, 2002. – 212 с.
2. Биология. В 2 книгах. Кн. 1: Учеб. для медиц. спец. вузов/ *В.Н.Ярыгин, В.И.Васильева, И.Н.Волков, В.В.Синельщикова*; Под ред. *В.Н.Ярыгина*. – М.: Высшая школа, 2001 –432 с.
3. Биология. В 2 книгах. Кн. 2: Учеб. для медиц. спец. вузов / *В.Н.Ярыгин, В.И.Васильева, И.Н.Волков,*

В.В.Синельщикова; Под ред. **В.Н.Ярыгина**. – М.: Высшая школа, 2001 – 334 с.

4. **Горелов А.А.** Концепции современного естествознания: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2000. – 512 с.

5. **Де Дюв К.** Путешествие в мир живой клетки. – М.: Мир, 1987. – 256 с.

6. **Иост Х.** Физиология клетки. – М.: Мир, 1975. – 864 с.

7. **Лобачёв А.И.** Концепции современного естествознания: Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 239 с.

8. **Мамонтов С.Г.** Биология: Учебное пособие. – М.: Дрофа, 2001. – 544 с.

9. **Найдыш В.М.** Концепции современного естествознания: Учебное пособие. – М.: Гардарики, 2002. – 476 с.

10. **Томас Г.** Древний человек. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 160 с.

Г Л А В А 10

КОНЦЕПЦИИ БИОСФЕРЫ И НООСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Живые организмы (живое вещество) и среда их обитания органически связаны и взаимодействуют друг с другом, образуя целостную динамическую систему. Совокупная деятельность живых организмов и особенно разумная деятельность человека проявляются как биогеохимический фактор планетарного масштаба и значения. Процессы, протекающие в живой природе, оказывают сильное воздействие на литосферу, гидросферу и атмосферу Земли. Фактически живое вещество и человек, как его составляющая, являются в настоящее время геологической силой, определяющей эволюцию нашей планеты. Это дало основание ввести такие понятия как *биосфера*, *ноосфера* и *пневмасфера* Земли.

10.1. Современные представления о биосфере Земли

Биосфера Земли представляет собой совокупность связанных между собой обменом веществом, энергией и информацией биогеоценозов, располагающихся в основном в очень тонком приповерхностном слое нашей планеты толщиной около 40 км. Принято считать, что верхняя граница жизни находится в атмосфере на высоте примерно 25–30 км и ограничена интенсивным потоком губительных ультрафиолетовых лучей за пределами озонового слоя в тропосфере. Однако в последнее время жизнеспособные организмы были найдены даже в стратосфере на высоте

около 80 км. Нижняя граница жизни располагается в земной коре на глубине приблизительно 10 м, хотя отдельные виды микроорганизмов встречаются в нефтеносных слоях на глубине до 3 км. В гидросфере зона, богатая живыми организмами, занимает слой воды до 200 м, но некоторые организмы обнаружены и на максимальной глубине глубоководных океанских впадин – до 11 км.

Термин «биосфера» как «тонкая плёнка жизни» на поверхности Земли, в значительной мере определяющая внешний облик планеты, был введён впервые в 1875 году австрийским геологом Э.Зюссом (1831–1914). Современные представления о биосфере как области жизни планетарного масштаба, объединяющую в себе всю совокупность биологических систем и среду их обитания, связаны с работами русского учёного В.И.Вернадского (1864–1945) и, прежде всего, с его основополагающей работой «Биосфера», опубликованной в 1926 году. Представление о широком влиянии живых существ на протекающие в природе процессы было сформулировано ещё в 1883 году русским учёным В.В.Докучаевым (1846–1903) в работе «Русский чернозём», в которой была показана зависимость процесса почвообразования не только от климата, но и от совокупного влияния растительных и животных организмов.

Согласно Вернадскому биосфера включает: 1) живое вещество – совокупность живых организмов; 2) косное вещество – горные породы, минералы, продукты вулканической деятельности, неживые продукты человеческого труда и т. п.; 3) биогенное вещество, которое создаётся и перерабатывается в процессе жизнедеятельности организмов (газы атмосферы, нефть,

каменный уголь и др.); 4) биокосное вещество, представляющее собой совместный результат жизнедеятельности организмов и абиогенных процессов (почвы, илы и т. п.). Вернадский отмечал, что материально-энергетически живое естественное тело отлично от косного естественного тела и что между живыми и косными естественными телами биосферы нет переходов – граница между ними на всём протяжении геологической истории резкая и ясная.

Возникновению жизни на Земле предшествовало формирование трёх главных сфер: литосферы, гидросферы и атмосферы. При этом первоначальный состав и строение этих сфер существенно отличались от их современного состава и строения. Появление жизни стало революционным событием в истории Земли. Живые организмы, возникнув, стали быстро заселять Землю. Благодаря этому появилась четвёртая сфера, а именно, биосфера Земли.

Масса биосферы, увеличиваясь, оказалась столь внушительной, что под её воздействием стали меняться три ранее существовавшие сферы Земли. Изменения при этом носили не только количественный, но и качественный характер. Но при этом, естественно, менялась и сама биосфера. Шёл процесс её дифференциации и образование специфических целостностей. Возникли такие сообщества живых организмов, которые стали образовывать устойчивые системы. Причём эти системы включали в себя не только живые организмы, но и определённые условия геологической среды. Возникли биогеоценозы. В рамках таких образований живые организмы не только вели борьбу

за жизненные ресурсы, но и сами создавали условия своего сосуществования.

Вернадский писал, что биосфера – это «организованная, определённая оболочка земной коры, сопряжённая с жизнью». «Пределы биосферы обусловлены прежде всего *полем существования жизни*. Жизнь может проявляться только в определённой среде, в определённых физических и химических условиях. Это как раз та среда, которая отвечает биосфере». «Биосфера – единственная область земной коры, занятая жизнью. Только в ней, в тонком наружном слое нашей планеты, сосредоточена жизнь; в ней находятся все организмы, всегда резкой, непроходимой гранью отделённые от окружающей их косной материи. Никогда живой организм в ней не зарождается. Он, умирая, живя и разрушаясь, отдаёт ей свои атомы и непрерывно берёт их из неё, но охваченное жизнью живое вещество всегда имеет своё начало в живом же».

На основе обобщения эмпирических фактов Вернадский выдвинул тезис о геологической вечности жизни. Он утверждал, что «никогда в течение всего геологического времени не наблюдались азойные (т. е. лишённые жизни) геологические эпохи». В настоящее время этот тезис находит всё более убедительные экспериментальные подтверждения. Следы биосферы в виде сообществ микроорганизмов различных видов учёные находят в древнейших породах, возраст которых приближается к геологическому возрасту Земли.

Жизнь по Вернадскому имеет космопланетарный характер. Он писал: «Твари Земли являются созданием сложного космического процесса, необходимой и

закономерной частью стройного космического механизма, в котором, как мы знаем, нет случайности». Эволюция биосферы обусловлена космическим излучением и, прежде всего, излучением Солнца. «Благодаря космическим излучениям биосфера получает во всём своём строении новые, необычные и неизвестные для земного вещества свойства, и отражающий её в космической среде лик Земли выявляет в этой среде новую, изменённую космическими силами картину земной поверхности. *Вещество биосферы* благодаря им проникнуто энергией; оно *становится активным*, собирает и распределяет в биосфере полученную в форме излучений энергию, превращает её в конце концов в энергию в земной среде свободную, способную производить работу».

Эволюция биосферы обусловлена эволюцией биологических видов. Согласно Вернадскому «эволюционный процесс получает при этом особое геологическое значение благодаря тому, что он создал новую геологическую силу – научную мысль социального человечества. Мы как раз переживаем её яркое вхождение в геологическую историю планеты. В последние тысячелетия наблюдается интенсивный рост влияния одного видového живого вещества – цивилизованного человечества – на изменение биосферы. Под влиянием научной мысли и человеческого труда биосфера переходит в новое состояние – *в ноосферу*». Термин «*ноосфера*» (от греч. *noos* – разум и сфера) означает буквально сфера разума. Таким образом, с появлением человеческого общества в развитии биосферы намечается переход от биогенеза, обусловленного факторами биологической эволюции, к ноогенезу – развитию под влиянием разумной созидательной деятельности человечества.

10.2. Учение Вернадского о ноосфере

В эволюционном развитии биосферы можно выделить несколько этапов. Первый из них – возникновение первичной биосферы с биотическим круговоротом, второй – усложнение структуры биотического компонента биосферы в результате появления многоклеточных организмов. Эти два этапа, осуществлявшиеся в связи с чисто биологическими закономерностями жизнедеятельности и развития, могут быть объединены в период *биогенеза*. Третий этап связан с возникновением человеческого общества. Разумная по своим намерениям деятельность людей в масштабе биосферы способствует превращению последней в *ноосферу*. На рассматриваемом этапе эволюция происходит под определяющим воздействием человеческого сознания в процессе деятельности людей, что свойственно *периоду ноогенеза*.

Биосфера Земли, являясь самоорганизующейся системой, сама создала и продолжает создавать условия своего существования. Однако деятельность человека начинает существенно изменять ситуацию. Например, из-за сжигания громадного количества органического топлива резко возрастает потребление кислорода. В США только автомобили потребляют в два раза больше кислорода, чем его производит вся растительность на территории страны. Всё увеличивающиеся масштабы деятельности человека нарушают устойчивость основных процессов, регулируемых биосферой Земли. Именно это воздействие порождает угрозу экологического кризиса и даже экологической катастрофы.

С развитием *социосферы* – формы существования совокупности людей, взаимосвязанных системой отношений, – биосфера Земли оказалась перед лицом реальной угрозы гибели. Было показано, например, что в случае термоядерной войны произойдёт настолько глобальное похолодание, что жизнь на Земле станет невозможной. Однако не следует думать, что социосфера угрожает биосфере лишь такими внезапными катастрофами. Постоянно обсуждается, например, вопрос о разрушении озонового слоя атмосферы под влиянием выбросов в атмосферу вредных газов, связанных с несовершенством технологических решений в сфере производства и эксплуатации различных технических устройств. Этот слой сегодня защищает всё живое на Земле от жёсткого излучения, которое способно уничтожить значительную часть живых организмов, нарушить тем самым устойчивость всей биосферы. Столь же реальной является и опасность перегрева атмосферы за счёт увеличения углекислого газа в ней.

За время длительной эволюции биосфера Земли выработала механизмы, обеспечивающие относительно высокий уровень её устойчивости в целом. Как в ней самой, так и во внешних условиях её бытия постоянно происходят колебания, и, противодействуя этим колебаниям, вырабатывая стабильность своих основных параметров, биосфера оказывается способной выдержать значительные внешние нагрузки. Однако благодаря усиливающейся человеческой деятельности в оборот вводятся такие факторы, к которым биосфера Земли совершенно не приспособлена. Так, человек создаёт такие химические соединения, которые естественным путём не возникают, поэтому биосфера не выработала механизмы защиты от

многих таких химических соединений. К тому же масштабы, в которых происходит загрязнение среды, также оказываются беспрецедентными и биосфера в ряде районов Земли начинает разрушаться.

Опасность для биосферы составляет и систематическое давление на тот генофонд, которым располагает биосфера Земли. Постоянно идёт уничтожение видов животных и растений, а это подрывает саму основу биосферы. Дело в том, что активность любой системы, в конечном счёте, определяется тем разнообразием, которым она располагает. Уменьшение генофонда биосферы ведёт к уменьшению её разнообразия, а, следовательно, к снижению её активности. Но это означает, что снижается и адаптивная способность биосферы реагировать на меняющиеся условия. Не только уничтожение, но даже изменение соотношения между отдельными видами живого вещества может нарушить динамическое равновесие в биогеоценозах и привести к экологической катастрофе.

Создание и поддержание условий устойчивого развития биосферы, а следовательно и человечества, возможно лишь в случае, если люди на всех уровнях своей деятельности будут руководствоваться принципами *планетарного научного мышления*, зарождающегося в недрах ноосферы.

Понятие ноосферы как современной стадии, геологически переживаемой биосферой, было предложено в 1927 году французским математиком и философом Э.Ле Руа (1870–1954), причём, как отмечал Ле Руа, в разработке этого понятия принимал участие французский геолог и палеонтолог П.Тейяр де Шарден (1881–1955). Основанием

для введения такого понятия послужили лекции, прочитанные в 1922–1923 годах В.И.Вернадским в Сорбонне в Париже, в которых излагалась биогеохимическая концепция биосферы. Ноосфера включает в себя социальные и природные явления, взятые в их целостности, в их единстве и противоречиях. Становление ноосферы определяется социально-природной деятельностью человека, его трудом и знаниями, т. е. тем, что относится к космопланетарному измерению человека.

Вернадский считал, что планета вступает в новую стадию своего развития, на которой определяющую роль будет играть человек разумный как сила невиданного масштаба. Обнаружилось, что связь человека с природой настолько всеобъемлюща и глубока, что любое действие, как и бездействие тоже, отражается на состоянии этой среды. Гигантская геологическая деятельность человечества наглядна, она стала видна невооружённым взглядом. Человечество сейчас вооружено огромным арсеналом всевозможных воздействий на природу, в том числе и фантастических по мощности разрушительных сил. Это способно поставить космопланетарный процесс ноосферогенеза на грань возможного социально-природного апокалипсиса.

10.3. Общие представления о пневмасфере

Говоря о человеке как о геологической силе, Вернадский делал акцент на геологическом понимании роли разума. Он рассматривал биосферу как одну из геосфер, как геологическую оболочку, а не просто как живую плёнку планеты. Это предполагает, нерасторжимую сопряжённость живого вещества, как выразался Вернадский, со всеми

вещественными структурами Земли. На определённом этапе развития биосферы, связанным с появлением разумного человека, в её недрах стала формироваться ноосфера как новая геологическая сфера – сфера разума. Ноосфера на современном этапе своего развития не только неразрывно связана с той частью биосферы, которая ассоциируется с человеком, но через неё с остальной частью биосферы и физическими геосферами Земли (атмосферой, гидросферой и литосферой).

Благодаря ноосферной деятельности человека для усиления его воздействия на биосферу и физические геосферы Земли с целью удовлетворения социально-экономических потребностей создана *техносфера*. Техносфера включает в себя производственное оборудование, различного рода сооружения, системы коммуникаций, транспортные средства и т. п. С появлением техносферы нагрузка на биосферу значительно возросла и мир приблизился к экологической катастрофе.

Человек – существо не только разумное, но и духовное. Слово «духовное» происходит от слова «дух», которое является философским понятием, означающим невещественное (идеальное) начало, в отличие от природного (материального) начала. Философские школы материалистического направления считают, что дух является вторичным по отношению к материи, её производным. В идеалистических учениях дух – это первоначало мира, а материя является вторичной по отношению к духу. Материалисты утверждают, что дух – совокупность и средоточие всех функций сознания, возникающих как отражение действительности, но сконцентрированных в единой индивидуальности, как

орудие сознательной ориентации в действительности для воздействия на неё и, в конце концов, для её переделывания. В этом смысле В.И. Ленин говорил: «Сознание человека не только отражает объективный мир, но и творит его».

Несмотря на принципиальные различия в том, какое место отводят духу две крайние по мировоззрению философские школы (материалистическая и идеалистическая), можно отметить, что они считают дух активным и способным изменять материальный мир. Если разум человека связан с рациональной мыслительной деятельностью, то его дух обуславливает иррациональную сторону деятельности, определяемую волей, интуицией, чувством, нравственностью, моралью и т. п.

Рационализм, свойственный ноосфере, как показывает жизненный опыт, неизбежно приводит к противоречиям между природой и человеческим обществом, а также к противоречиям внутри самого общества. Так, постоянное стремление общества улучшить материальное благосостояние населения за счёт эксплуатации природных ресурсов разрушает сложившиеся биогенезы, что уже привело в ряде районов Земли к экологической катастрофе. Например, на огромных территориях вокруг крупных химических предприятий за счёт выбросов вредных веществ уничтожается растительный и животный мир, а также ухудшается здоровье населения.

Сегодня можно говорить не только о региональных, но и о всемирных экологических проблемах, так как в биосфере Земли начинают развиваться необратимые процессы, обусловленные уничтожением тысяч видов

растений и животных, сокращением лесного покрова планеты, истощением биоресурсов мирового океана, загрязнением атмосферы, гидросферы и литосферы вредными веществами, концентрация которых приближается к критической. Первая Конференция Организации Объединённых Наций по окружающей среде, состоявшаяся в 1972 году, официально признала наличие на Земле глобального экологического кризиса биосферы.

В настоящее время человечеством прилагаются большие усилия по оздоровлению биосферы, однако ощутимых результатов это не приносит. Корни проблемы здесь лежат в том, что человек в своей деятельности, стремясь получить «быстрый» результат, руководствуется в основном разумом, забывая о своём духовном начале. Проблемы биосферы, впрочем, как и многие другие жизненно важные проблемы (межнациональные, религиозные, социальные и др.), не могут быть решены вне духовной сферы. Это не означает отрицание значения сферы разума. Здесь речь идёт об устранении сложившегося перекоса в соотношении разумной и духовной деятельности человека в пользу разумной. Сфера разума и сфера духа являются взаимодополняющими и находятся в диалектическом взаимодействии.

Для обозначения сферы духовной деятельности человека введём термин «*пневмасфера*» (от греч. *пне́иμα* – дух и сфера), что в буквальном переводе означает сфера духа. По-видимому, впервые о сфере духовной деятельности человека как о духовной планетарной оболочке говорил российский философ и учёный П.А.Флоренский (1882–1943). О влиянии духа на формирование ноосферы писал в работе «Феномен

человека» Тейяр де Шарден. Определяя ноосферу как «действительно новый покров, «мыслящий пласт», который, зародившись в конце третичного периода, разворачивается с тех пор над миром растений и животных – вне биосферы и над ней», дальше он пишет: «Мысль становится множеством, чтобы завоевать всё обитаемое пространство поверх любой другой формы жизни. Другими словами, дух ткёт и развёртывает покров ноосферы».

Уровень развития пневматосферы, являющейся фактически «геологической» сферой Земли, определяется как тем, насколько в духовном плане продвинул каждый человек, так и тем, насколько согласовано взаимодействуют между собой различные духовные течения и прежде всего основные религии мира. В настоящее время всё отчетливее проявляется тенденция перехода от конфронтации различных религий и конфессий, разделяющей народы и страны, к позитивному взаимодействию религиозных институтов и конфессий, что приводит к повышению их взаимной толерантности (терпимости к чужим мнениям, верованиям, поведению) и установлению равенства религиозных ценностей и традиций различных религий и конфессий. Это неизбежно должно привести к духовному единению человечества.

Только при условии религиозного плюрализма каждый человек может осознать реальность личного духовного бытия, сделать свой религиозно-духовный выбор и нести за него личную ответственность. Всё более отчетливо выявляется взаимосвязь и взаимодополнительность научных и религиозных ценностей, выступающих в качестве разных сторон единого бытия. Закрепляется приоритет нравственных стереотипов

во взаимоотношениях между человеком, обществом и окружающей средой.

Будущее человечества зависит от того, на сколько интенсивно будет развиваться и совершенствоваться пневмасфера. Только, начиная с определённого уровня своего развития, пневмасфера сможет активно воздействовать на ноосферу сначала в направлении замедления темпов движения человечества к социально-природному апокалипсису, а затем остановить этот процесс и создать условия для гармоничного развития всех геологических сфер Земли.

10.4. Космические и биологические циклы

Жизнь биосферы и человека как её части тесно связана с процессами, протекающими в других геологических сферах Земли и в Космосе. Многие процессы, происходящие в Космосе, на Земле и в социальной среде, имеют циклический (периодически повторяющийся) характер. Вначале рассмотрим так называемые космические ритмы – периодические изменения в природе, происходящие под влиянием гравитационных сил.

Все ритмы принято делить по значению их периода на две группы. К первой группе относят ритмы, действующие в так называемой антропной шкале времени, т. е. в шкале, соизмеримой с жизнью человека. Здесь, прежде всего, можно выделить суточный ритм, обусловленный вращением Земли вокруг своей оси, месячный ритм, связанный с вращением Луны вокруг Земли и годичный ритм, обусловленный вращением Земли вокруг Солнца.

В суточном и годичном ритмах изменяются освещённость, создаваемая Солнцем на поверхности Земли, температурный режим и ряд физических параметров атмосферы и гидросферы. В результате происходит смена дня и ночи, смена времён года. Суточные и месячные вариации гравитационного поля на поверхности Земли, связанные с приливным действием Луны и Солнца, создают сложное явление океанических приливов. С такими же периодами (сутки и месяц) происходят вариации магнитного поля Земли. Изменение ориентации земной магнитосферы относительно солнечного ветра (радиального потока плазмы солнечной короны в межпланетное пространство) задаёт суточный ритм магнитного поля. Вращение Солнца, а вместе с ним межпланетного магнитного поля, имеющего характерную структуру, задаёт 27-дневный ритм вариаций магнитного поля Земли.

Ко второй группе относят ритмы, действующие в геологической шкале времени, т. е. на протяжении очень длительных периодов, гораздо больших длительности жизни человека. Долгопериодические изменения влияют на погоду и климат на Земле, а через это и на биосферу. Климатические циклы связаны с характерными особенностями орбитальных движений Земли и Солнца, обусловленных воздействием других планет и галактик.

Выделяют следующие климатические циклы, за которые ответственность несут особенности орбитального движения Земли: 1) 26-тысячелетний цикл, обусловленный прецессией оси вращения Земли, так называемый Большой Платонический Год; 2) 41-тысячелетний цикл, связанный с периодом изменения угла наклона оси вращения Земли к эклиптике (большому кругу небесной сферы, по которому

происходит видимое годовое движение Солнца); 3) 100-тысячелетний цикл, равный периоду изменения значения эксцентриситета земной орбиты. Совместное действие этих космических факторов, их наложение, взаимное усиление приводят к долгопериодическим изменениям климата Земли.

Выявлены орбитальные климатические ритмы длительностью в 400 тысяч; 1,2; 2,5 и 3,7 миллионов лет, среди которых 400-тысячелетний ритм служит основной причиной долгопериодических изменений климата и эволюции органического мира. Этот ритм выявлен геологами из последовательности ледниковых событий и только потом обнаружен астрономами.

Самый большой из известных периодов – галактический год, равный примерно 250 млн лет. Это – период вращения Галактики в окрестности Солнца. Орбита Солнца в нашей Галактике располагается вблизи так называемого радиуса коротации. Это особое место в Галактике – своеобразный «пояс жизни», где редко происходят вспышки сверхновых звёзд, губительные для жизни. Это создаёт благоприятные условия как для возникновения, так и для длительного существования жизни.

Жизнедеятельность любого организма возможна лишь при оптимальной его приспособленности к периодическим изменениям условий внешней среды, имеющим гелиогеофизическую природу. Так, ритм «сон-бодрствование» синхронизируется с суточным вращением Земли, ритмы смены мехового покрова (линьки) у животных – со сменой времён года. Подобные

самоподдерживающиеся функциональные изменения, сохраняющиеся на протяжении жизни индивида даже в искусственно создаваемых постоянных условиях, называются биологическими ритмами.

Организму присущи множество периодических процессов жизнедеятельности, охватывающих весьма широкий диапазон частот. В плане взаимодействия организма и внешней среды выделяют два типа таких колебательных процессов. Во-первых, это *адаптивные ритмы* (или собственно биоритмы), т. е. колебания с периодами, близкими к геофизическим циклам. Их роль состоит в обеспечении приспособления жизненных проявлений и поведенческих реакций организма к периодическим изменениям условий внешней среды. Во-вторых, это *рабочие ритмы*, которые отражают текущую деятельность физиологических систем организма. Примером первой группы колебательных процессов являются ритмы физиологических функций, имеющих устойчивую околосуточную периодичность; второй – периодичность сокращений сердца и дыхательных движений, импульсация нейронов. Очевидно, что физиологические ритмы трудно связать с колебательными процессами среды обитания, они скорее суть оптимальной временной организации физиологических функций организма.

Биологические ритмы классифицируют также по частоте осцилляций, выделяя пять классов: высокочастотные, ультрадианные, циркадианные, инфрадианные и низкочастотные ритмы. Кратко остановимся на рассмотрении каждого из них.

Высокочастотные ритмы процессов жизнедеятельности с периодом до 30 минут – это большинство рабочих ритмов. В основе их лежат ритмические осцилляторы клеточных мембран возбудимых клеток. Нейроны и мышечные клетки способны генерировать серии ритмично следующих импульсов. Их интеграция и обеспечивает стабильную работу сердца, дыхательных мышц и ряда других систем, дисбаланс которых грозит самому существованию организма.

Ультрадианные ритмы – с периодом от 0,5 до 20 часов иногда относят уже к собственно биологическим, т. е. согласованным с гелиогеофизическими условиями (в данном случае – с временем суток). В то же время отдельные фазы этих ритмов не удаётся связать с определённым временем суток. Так, например, имеют место колебания главных компонент крови с частотой около одного цикла за 20 часов. Один из ультрадианных ритмов – повторение стадии быстрых движений глаз через каждые 90 минут сна – связан не с временем суток, а отсчитывается от момента засыпания человека.

Циркадианные биоритмы (околосуточные) имеют длительность периода от 20 до 28 часов и синхронизированы с вращением Земли вокруг оси, сменой дня и ночи. Прежде всего, это ритмы «сон-бодрствование», а также суточные колебания различных физиологических параметров (температуры тела, артериального давления и др.). Эти ритмы наиболее устойчивы и сохраняются в течение жизни организма.

Инфраничные ритмы, имеющие период выше суточных (от 26 часов до 6 суток) наименее изучены.

Примером может служить недельный ритм выделения некоторых гормонов.

Низкочастотные ритмы процессов жизнедеятельности, так же как суточные, широко представлены в организме и имеют связь с геофизическими и социальными (режимами труда и отдыха) факторами. Основные ритмы этой группы – *лунный* (около 30 дней) и *окологодичный* – можно обнаружить у любого вида животных. Выделяют так же *мегаритмы* – продолжительностью от полутора до нескольких десятков лет. Такие ритмы проявляются в изменении численности популяции, видов животных, вспышках эпидемий.

Следует отметить, что большинство функций организма подвержено одновременно нескольким ритмическим колебаниям. Так, частота сердечных сокращений, являясь типично физиологическим ритмом, в то же время изменяется в течение суток и в разные сезоны года. Наряду с суточными изменениями температуры тела человека имеют место её сезонные колебания. Это служит одним из доказательств взаимодействия биологических ритмов с различными периодами колебаний функций организма.

Совокупность биологических ритмов, протекающих в организме, одновременно включает в себя ритмы клеток, субклеточных структур, органов, тканей и, наконец, организма в целом. Все эти биоритмы взаимосвязаны и согласованы друг с другом, составляя сложный ансамбль колебательных процессов, отражающий хронобиологическое состояние организма.

Имеется много данных о том, что космические факторы действуют на живые организмы непосредственно через переменные поля. Например, вспышки на Солнце – внезапные, непериодические высвобождения электромагнитной энергии и высокоэнергетических частиц – вызывают резкие изменения магнитной и радиационной обстановки на Земле. Последствия одной вспышки (магнитная буря, полярное сияние, нарушение радиосвязи) быстро проходят, но частая повторяемость вспышек в период повышенной активности Солнца приводит к устойчивым эффектам в биосфере Земли. Периоды максимальной активности Солнца подчиняются 11-летнему ритму. Такой же ритм отчётливо проявляется во многих биологических и социальных процессах на Земле.

Изучением влияния солнечной активности на биологические структуры занимается гелиобиология, основателем которой является русский учёный А.Л.Чижевский (1897–1964). Одним из первых он показал, что космические ритмы влияют на процессы в живой природе на всех уровнях организации биологических систем – от индивидуальных организмов до популяций и сообществ. Чижевский установил корреляцию между циклами деятельности Солнца и целым рядом явлений в биосфере, в том числе миграций животных, эпидемий и т. п.

Поскольку нервно-психическая система человека чутко реагирует на изменения солнечной активности, последние отражаются на психической возбудимости человеческих коллективов, повышая или понижая их реактивность. Изучив историю 80 стран и народов за 2500 лет, Чижевский показал, что с приближением к годам максимума солнечной активности количество исторических

событий с участием народных масс увеличивается и достигает своей наибольшей величины в эти годы. Наоборот, в минимумы активности Солнца наблюдается минимум массовых действий.

Жизнедеятельность любых организмов на уровне физико-химических процессов сопровождается излучением собственных электромагнитных полей, имеющих свои строго определённые ритмы, причём они строго согласованы и сбалансированы. Всё живое на Земле подвержено воздействию внешних полей таких как гравитационное и магнитное поля Земли, электромагнитного излучения Солнца, потоков космических частиц и т. п., имеющих постоянную и ритмическую составляющие.

Как уже отмечалось выше, живые организмы в процессе эволюции приспособились к такому воздействию. Однако если происходят изменения привычных для организма внешних полей или их ритма, вызванные естественными или искусственными причинами (магнитные бури, различные виды радиации, искусственное состояние невесомости и т. п.), то это приводит к различного рода нарушениям жизнедеятельности клеток и организма в целом. Организм особенно чувствителен к воздействию механических и электромагнитных волн, частоты которых совпадают с резонансными частотами колебаний различных органов тела и физико-химических процессов.

Ритмический характер отмечается и в жизнедеятельности различных биологических сообществ, в том числе и в человеческом обществе (например, в изменении численности популяций, в возникновении

социальных революций и т. п.). Известный русский учёный В.М.Бехтерев (1857–1927) на основании анализа исторического материала сделал вывод, «что везде и всюду появление коллективной деятельности, как и проявление индивидуальной жизни, подчиняется закону ритма, имеющего, таким образом, всеобщее значение». Человек является биосоциальным существом и поэтому он фокусирует в себе многообразие ритмов, порождённых как биологической, так и социокультурной эволюцией.

Литература к главе 10

1. Биология. В 2 книгах. Кн. 2: Учеб. для медиц. спец. вузов / **В.Н.Ярыгин, В.И.Васильева, И.Н.Волков, В.В.Синельщикова**; Под ред. **В.Н.Ярыгина**. – М.: Высшая школа, 2001 – 334 с.

2. **Вернадский В.И.** Биосфера и ноосфера. – Рольф, 2002. – 576 с. – (Библиотека истории и культуры).

3. **Дыбов А.М., Иванов В.А.** Концепции современного естествознания: Учебное пособие – Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 1999. – 320 с.

4. Концепции современного естествознания: Под редакцией **С.И.Самыгина**. – Ростов н/Д: «Феникс», 2001. – 576 с.

5. **Лось В.А., Урсул А.Д.** Устойчивое развитие: Учебное пособие – М.: Агар, 2000. – 254 с.

6. Основы физиологии человека. В 2 книгах. Кн. 2: Учебник для высших учебных заведений: Под редакцией

Б.И.Ткаченко. – СПб.: Издательство «Международный фонд истории науки», 1994. – 413 с.

7. **Тейяр де Шарден П.** Феномен человека: Сборник очерков и эссе. – М.: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 533 с.

Г Л А В А 11

КОНЦЕПЦИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ

В сложных открытых системах, обменивающихся энергией, веществом и информацией с окружающей средой и находящихся вдали от равновесия, могут происходить при определённых условиях процессы самоорганизации, в результате которых возникают упорядоченные структуры. Самоорганизация может иметь место в системах самой различной природы, например, в физических, химических, биологических, социальных и других системах. Изучением процессов самоорганизации занимается наука, называемая синергетикой.

1.1. Самоорганизующиеся системы и их свойства

Термин «*синергетика*» для определения совокупного, кооперативного действия объектов в процессе самоорганизации ввёл в 1969 году немецкий физик Г.Хакен (род. 1927). Это название происходит от греческого *synergētikós* – совместный, согласовано действующий. Однако впервые этот термин был введён на несколько десятков лет раньше английским физиологом Ч.Шеррингтоном (1857–1952) для характеристики согласованных действий нервной и мышечной систем человека.

В предисловии к своей книге «Синергетика» Хакен пишет: «Я назвал новую дисциплину «синергетикой». В ней исследуется совместное действие многих подсистем (преимущественно одинаковых или же несколько различных видов), в результате которого на

макроскопическом уровне возникает структура и соответствующее функционирование. С другой стороны, для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизующимися системами, необходимо кооперирование многих различных дисциплин». Отсюда следует, что синергетика является синтетической наукой, интегрирующей знания многих наук.

Понятие самоорганизующейся системы Хакен определяет следующим образом: «Мы назовём систему самоорганизующейся, если она без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру. Под специфическим внешним воздействием мы понимаем такое, которое навязывает системе структуру или функционирование. В случае же самоорганизующихся систем испытывается извне неспецифическое воздействие. Например, жидкость, подогреваемая снизу совершенно равномерно, обретает в результате самоорганизации макроструктуру, образуя шестиугольные ячейки».

Значительный вклад в теорию самоорганизации систем внёс И.Р.Пригожин. Он показал, что в *диссипативных системах* (системах, в которых имеет место рассеяние энергии) в ходе неравновесных необратимых процессов возникают упорядоченные образования, которые были названы им *диссипативными структурами*.

Основными свойствами самоорганизующихся систем являются *открытость, диссипативность и нелинейность*. Рассмотрим эти свойства на конкретном примере самоорганизации электромагнитного излучения в лазере.

Лазеры являются квантовыми генераторами когерентного электромагнитного излучения. Слово «лазер» составлено из начальных букв английского выражения «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», означающего «усиление света с помощью вынужденного излучения». Для определённости будем рассматривать рубиновый лазер, в качестве активной среды в котором используется рубин (кристаллическая окись алюминия), в некоторых узлах кристаллической решётки которого алюминий замещён трижды ионизированными атомами хрома.

Рубиновый лазер устроен следующим образом (рис. 11.1). Основным элементом лазера является цилиндрический стержень, изготовленный из рубина, торцы которого тщательно отполированы и расположены строго перпендикулярно оси кристалла. На торцы стержня нанесены слои серебра, один из которых является частично прозрачным, чтобы создать возможность выхода излучения из системы. Рубиновый стержень с нанесёнными на его торцы серебряными слоями, выполняющими роль зеркал, образуют так называемый оптический резонатор, вокруг которого расположена импульсная лампа электромагнитного излучения, которая называется лампой накачки и предназначена для снабжения резонатора энергией. Процесс самоорганизации электромагнитного излучения (света) происходит в оптическом резонаторе, являющемся *открытой системой*. Лампа накачки является внешней средой по отношению к резонатору.

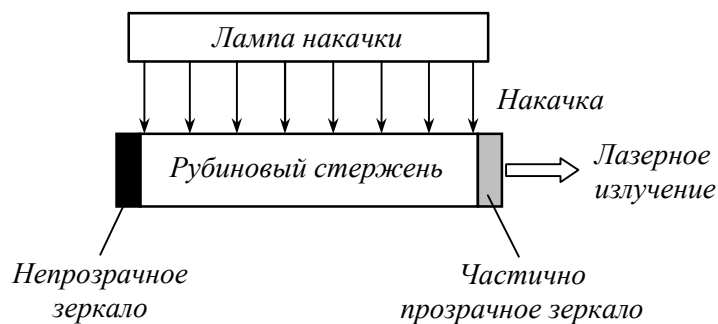


Рис. 11.1. Схематическое изображение лазера.

Работа лазера осуществляется следующим образом. Импульсное электромагнитное излучение лампы накачки поглощается ионами хрома в рубиновом стержне, в результате этого ионы хрома переходят в возбуждённое состояние (рис. 11.2) с энергиями E_3 и E'_3 , находящимися в области соответствующих энергетических полос (полосы энергии возникают вследствие взаимодействия между ионами хрома). Длительности существования этих возбуждённых состояний τ_3 и τ'_3 малы и составляют $\sim 10^{-8}$ с. Однако только незначительная часть ионов хрома возвращается в основное состояние с энергией E_1 . Опыт показывает, что большая часть возбуждённых ионов хрома сначала отдаёт часть своей энергии кристаллической решётке рубина без излучения света. В результате этого ионы хрома переходят в метастабильное состояние с энергией E_2 , длительность существования которого составляет $\tau_2 \approx 3 \cdot 10^{-3}$ с, следовательно, $\tau_2 \gg \tau_3$ и τ'_3 . В этом случае число ионов хрома, находящихся в возбуждённом

состоянии с энергией E_2 , может превысить их число в основном состоянии с энергией E_1 . Это будет соответствовать так называемой *инверсной заселённости* энергетических уровней, характерной только для *неравновесного состояния*, возникающего за счёт поглощения системой энергии, переданной внешней средой (энергии, излучённой лампой накачки). В равновесном состоянии число ионов хрома с энергией E_2 всегда меньше числа ионов с энергией E_1 , так как энергия системы в этом случае должна иметь минимальное значение.

Передача энергии кристаллической решётке рубина и есть *процесс диссипации*, так как часть энергии упорядоченного состояния (энергии «высокого качества») переходит в энергию теплового хаотического движения ионов решётки (энергию «низкого качества»), т. е. имеет место рассеяние части энергии, выступающее в данном случае как системообразующий фактор. В результате этого завершается процесс организации системы ионов хрома в отношении их энергетического состояния (неравновесного состояния с энергией E_2) и начинается процесс самоорганизации электромагнитного излучения лазера.

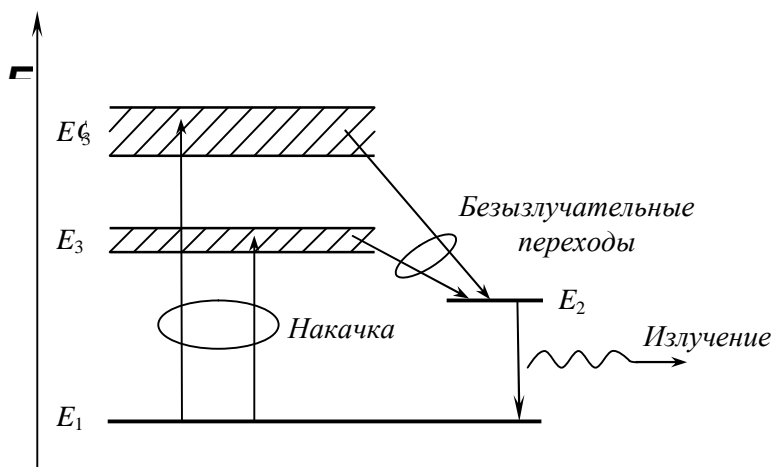


Рис. 11.2. Энергетические уровни ионов хрома в рубине.

Вначале некоторые ионы хрома спонтанно (самопроизвольно) начинают переходить из возбуждённого состояния в основное, при этом излучаются цуги электромагнитных волн. Цуги, направление распространения которых не совпадает с осью рубинового стержня, покидают его (рис. 11.3). Это своеобразный процесс *диссипации энергии*. Под действием энергии цугов, распространяющихся в аксиальном направлении, начинают происходить вынужденные переходы ионов хрома в основное состояние, сопровождающееся так называемым *вынужденным излучением* цугов, колебания векторов напряжённости электрического и магнитного полей в которых согласованы по фазе, поляризации и направлению распространения с аналогичными параметрами вынуждающего излучения. Количество цугов увеличивается

лавинообразно. Это существенно *нелинейный процесс*. Для его усиления в лазере предусмотрена положительная обратная связь, которую обеспечивают серебряные зеркала на торцах рубинового стержня.

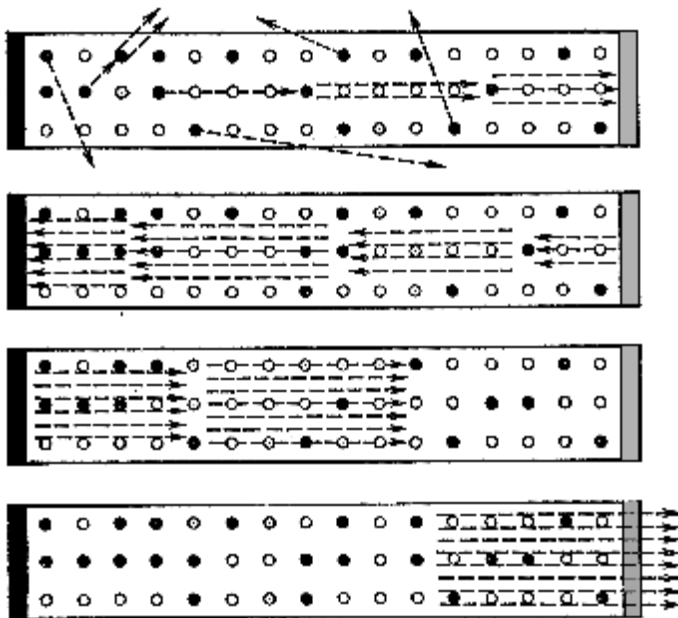


Рис. 11.3. Процесс лавинного увеличения числа цугов (чёрными кружочками изображены ионы хрома в основном состоянии).

Длина цуга значительно больше длины рубинового стержня, поэтому при последовательном отражении цуга от двух зеркал, когда он возвращается в определённую область

резонатора, колебания в нём должны быть синфазны с колебаниями уже существующими в этой области. Это достигается тем, что длина рубинового стержня делается такой, чтобы её удвоенное значение было кратно целому числу длин волн.

Электромагнитный импульс формируется в резонаторе достаточно быстро и через частично прозрачное зеркало выходит из лазера. Лазерное излучение обладает высокой степенью когерентности (пространственной и временной согласованности электромагнитных колебаний в системе цугов, образующих импульс излучения).

Таким образом, в процессе самоорганизации электромагнитного импульса в резонаторе лазера проявились такие свойства системы как *открытость*, позволившая за счёт обмена энергией с внешней средой перейти системе в неравновесное состояние; *диссипативность*, благодаря которой была сформирована инверсная заселённость энергетических уровней ионами хрома и обеспечено аксиальное распространение цугов и *нелинейность*, проявившаяся в лавинообразном нарастании числа согласовано взаимодействующих цугов.

11.2. Пороговый характер самоорганизации. Бифуркация

Следствием нелинейности открытой диссипативной системы, находящейся в неравновесном состоянии, является пороговый характер возникновения процесса самоорганизации. В этом можно убедиться на примере лазерного излучения, рассмотренного в предыдущем параграфе. Как уже говорилось, для протекания процесса

самоорганизации электромагнитного импульса в резонаторе лазера необходимо наличие инверсной заселённости энергетических уровней ионов хрома, соответствующих возбуждённому состоянию. Если число ионов хрома, находящихся в возбуждённом состоянии будет меньше числа ионов в основном состоянии, то процесс самоорганизации возникнуть не сможет, и лазер будет работать как обычная лампа. Инверсная заселённость уровней имеет место при мощности излучения лампы накачки больше некоторого значения. Эту мощность называют пороговой мощностью начала лазерного режима работы (рис. 11.4). В данном случае мощность излучения лампы накачки, поглощаемая ионами хрома в резонаторе, является параметром, управляющим процессом самоорганизации.

В ряде случаев при достижении управляющим параметром критического значения процесс самоорганизации может пойти не по одному единственному пути развития, как это имеет место в лазере, а по одному из двух возможных путей развития. Выбор пути является случайным и определяется флуктуацией, которая может в данный момент возникнуть в системе. Проиллюстрируем сказанное на примере самоорганизации так называемых конвективных ячеек Бенара, возникающих в вязкой жидкости при наличии градиента температуры.

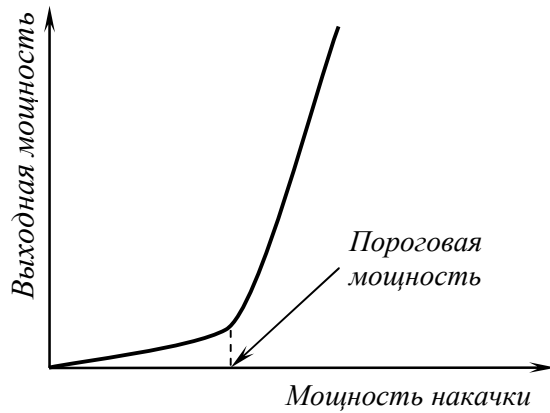


Рис. 11.4. Пороговый характер лазерного излучения.

Представим себе слой вязкой жидкости (например, глицерина) между двумя горизонтально расположенными металлическими пластинами, размеры поверхности которых значительно превосходят толщину слоя. Если температуры верхней и нижней пластин одинаковые, то жидкость с течением времени придёт к однородному состоянию устойчивого равновесия.

Будем медленно изменять это состояние, нагревая нижний слой жидкости, т. е. сообщая системе некоторое количество энергии в виде тепла. Пусть температура верхней пластины остаётся неизменной и равной T_1 , а температура нижней пластины T_2 увеличивается. Допустим вначале, что разность температур пластин $\Delta T = T_2 - T_1$ является малой величиной и поддерживается неизменной. В системе снова установится простое и единственное состояние, в котором единственный протекающий процесс

сводится к переносу тепла через слой жидкости от нижней пластины к верхней, от которой тепло будет передаваться во внешнюю среду для обеспечения постоянства температуры T_1 . Единственное отличие этого состояния от равновесного будет состоять в том, что температура, а с ней плотность и давление не будут более однородными. Они будут практически линейно изменяться от тёплой области (внизу) к холодной (вверху). Это явление известно под названием *теплопроводности*. При этом перемещения слоёв жидкости вверх или вниз отсутствуют, что объясняется стабилизирующим действием вязкости жидкости, в которой действуют силы внутреннего трения, препятствующие относительно перемещению частей жидкости.

Отклоняя всё дальше систему от равновесия путём увеличения ΔT , мы увидим, что внезапно, при некотором значении ΔT , которое назовём *критическим* (ΔT_c), объём вещества приходит в движение. Более того, это движение далеко не случайное: жидкость структурируется в виде небольших ячеек (рис. 11.5), называемых ячейками Бенара в честь исследователя Х.Бенара, впервые (в 1900 году) наблюдавшего образование конвективных ячеек в жидкой ртути.

Суть данного процесса самоорганизации заключается в следующем. Вследствие теплового расширения жидкость, находящаяся ближе к более нагретой нижней пластине, характеризуется пониженной плотностью по сравнению с верхними слоями. Это приводит к градиенту плотности, направленному противоположно силе тяжести. Такая конфигурация потенциально неустойчива. Рассмотрим,

например, малый объём жидкости вблизи нижней пластины. Вообразим теперь, что этот элемент объёма немного смещается вверх вследствие возмущения. Находясь теперь в более холодной и, следовательно, в более плотной области, этот элемент будет подвержен действию направленной вверх архимедовой силы, превышающей силу тяжести, что будет стремиться усилить восходящее движение. С другой стороны, если находящийся вначале у верхней пластины малый объём жидкости смещается вниз, то он проникает в область пониженной плотности, и архимедова сила становится меньше силы тяжести, что ускоряет нисходящее движение. Такой характер движения жидкости носит название *конвекции*.

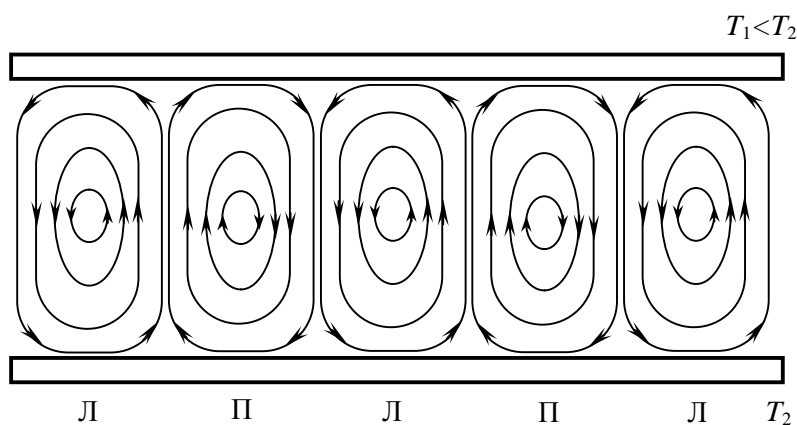


Рис. 11.5. Конвективные ячейки Бенара с вращением жидкости по часовой стрелке (П) и против часовой стрелки (Л).

На рис. 11.5 показано насколько сложно возникающее движение: в некоторой точке жидкость движется вверх, проходит последовательно вдоль пластины 1, затем идёт вниз, движется вдоль пластины 2, идёт вверх и т. д. Ячейки выстраиваются вдоль горизонтальной оси, причём жидкость в соседних ячейках вращается в противоположных направлениях (по и против часовой стрелки). Однажды установившись, направление вращения в дальнейшем сохраняется. Однако при повторении эксперимента при тех же условиях при достижении критического порогового значения ΔT_c может оказаться, что во вновь образовавшихся ячейках жидкость вращается в направлениях, противоположных направлению вращения её в первом эксперименте. Таким образом, мы совершенно точно знаем, что как только ΔT слегка превысит ΔT_c , то появится ячеистая структура течения жидкости. Это явление строго детерминировано. Напротив, направление вращения жидкости в ячейках непредсказуемо и неуправляемо. Лишь случай в виде тех или иных возмущений, доминирующих в момент проведения эксперимента, решает, каким будет вращение в данной ячейке – право- или левовращательным. Здесь имеет место удивительное сотрудничество между случайностью и определённой.

Таким образом, при небольшом превышении разности температур между пластинами ΔT порогового значения ΔT_c система может начать развиваться по одному из двух возможных направлений: образования в данном месте жидкости право- или левовращательных ячеек Бенара

(рис. 11.6). Это явление называется *бифуркацией* (от лат. bifurcatio – раздвоение).

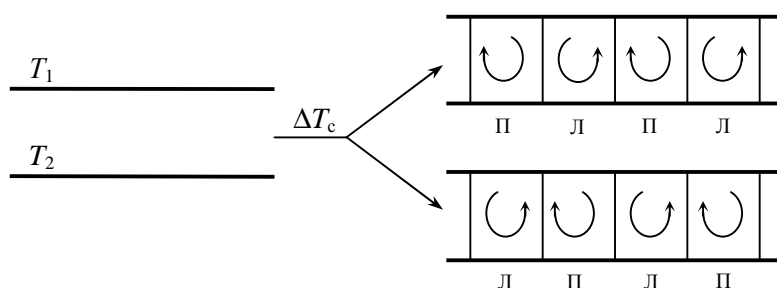


Рис. 11.6. Две возможные структуры самоорганизации движения жидкости в конвективных ячейках Бенара.

Рассмотрим простую нелинейную математическую модель, которая на качественном уровне позволит описать поведение диссипативных систем с самообразованием в них упорядоченных структур.

Пусть имеется единственная переменная x (например, вертикальная компонента скорости течения жидкости в некоторой определённой точке), изменяющаяся в соответствии с уравнением

$$\frac{dx}{dt} = -x^3 + \lambda x,$$

где t – время; λ – управляющий параметр (например, разность температур между пластинами в эксперименте с ячейками Бенара).

Рассмотрим стационарные состояния. В этом случае скорость изменения переменной x равна нулю ($dx/dt = 0$) и исходное дифференциальное уравнение становится простым алгебраическим уравнением

$$x^3 - \lambda x = 0,$$

которое имеет три решения: одно тривиальное $x_0 = 0$ и два действительных при положительных значениях управляющего параметра λ (мнимые решения при $\lambda < 0$ физического смысла не имеют), а именно

$$x_{\pm} = \pm\sqrt{\lambda}.$$

Эти решения (рис. 11.7) сливаются с x_0 при $\lambda = 0$ и ответвляются от него при $\lambda > 0$. Это соответствует явлению бифуркации, о котором уже говорилось выше. Ветви x_{\pm} появляются в результате бифуркации в тот момент, когда «стандартное состояние», соответствующее решению $x_0 = 0$ теряет устойчивость, причём сами эти ветви устойчивы. Сказать уверенно о том, по какой из ветвей будет эволюционировать система, не представляется возможным. Всё будет зависеть от тех возмущений (флуктуаций), которые будут иметь место при подходе системы к точке начала бифуркации ($\lambda = 0$ в данном случае).

Пороговое значение управляющего параметра (точка бифуркации) является фактически точкой перехода системы из хаотического состояния в организованное или из организованного в организованное на более высоком уровне. Процесс может проходить и в направлении от упорядоченности к хаосу, например, при плавлении

кристаллов. В этом случае говорят о процессе самодезорганизации.

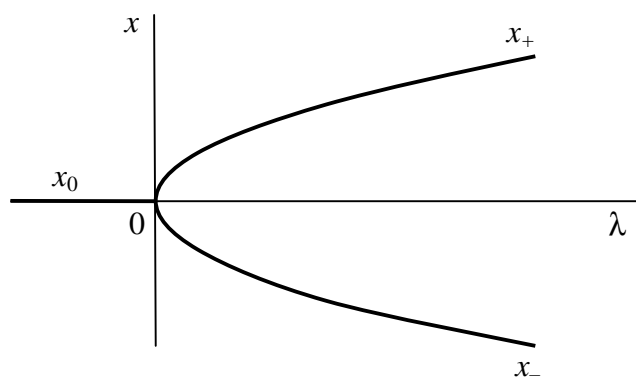


Рис. 11.7. Симметричная бифуркация в диссипативной динамической системе.

11.3. Самоорганизация в химических реакциях

Наглядным примером образования пространственных, временных или пространственно-временных структур в ходе протекания химических реакций может служить так называемая *реакция Белоусова–Жаботинского*. Эта реакция была открыта в 1951 году химиком-экспериментатором Б.П.Белоусовым, а механизм её протекания был детально исследован в 1964 году А.М.Жаботинским, поэтому подобные реакции стали называть именами этих двух учёных. Рассмотрим на качественном уровне суть этой реакции.

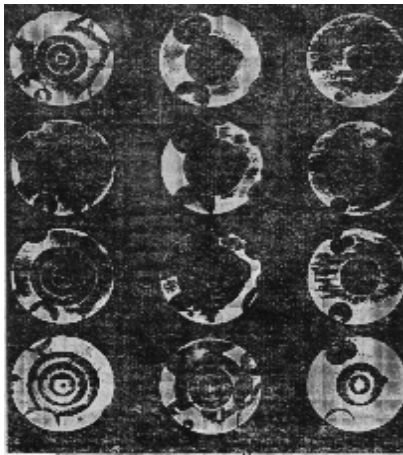
Реакция Белоусова–Жаботинского протекает в растворе, состоящем из сульфата церия $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$, малоновой кислоты $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, серной кислоты H_2SO_4 и бромата калия KBrO_3 . В раствор добавляют несколько капель ферроина, играющего роль индикатора в окислительно-восстановительных реакциях. Протекающие в системе процессы можно наблюдать невооружённым глазом благодаря окрашивающему действию ферроина, дающему красный цвет при избытке ионов Ce^{3+} и голубой при избытке ионов Ce^{4+} .

Как только раствор приготовлен, в нём начинаются удивительные превращения. В какой-то момент времени вся система внезапно окрашивается в голубой цвет, что указывает на избыток в растворе ионов Ce^{4+} . Спустя некоторое время (от нескольких секунд до сотен секунд в зависимости от концентрации реагентов) голубой цвет сменяется красным, указывая на избыток ионов Ce^{3+} . Этот процесс так и продолжается: голубой, красный, голубой, красный и т. д. – ритмическая смена цвета с идеально регулируемым периодом и амплитудой, зависящими лишь от параметров и тем самым являющимися собственными характеристиками системы. Эти колебания можно рассматривать как *химические часы* – устройство для измерения времени с помощью внутренней динамики системы. В открытой системе при прокачке раствора через реактор с определённой скоростью химические часы будут работать неограниченное время.

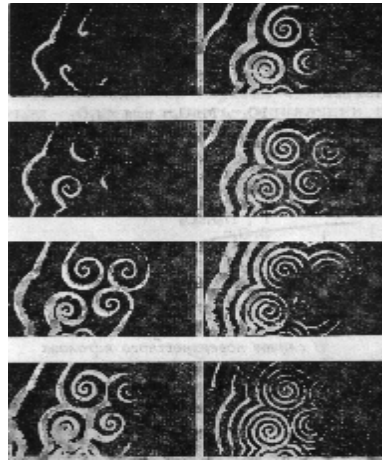
Однако, если раствор налить, например, в вертикально расположенную пробирку, то по истечении некоторого числа колебаний, определяемого концентрацией реагентов, спонтанно возникают неоднородности концентрации и

образуются устойчивые пространственные структуры в виде чередующихся красных и синих слоёв, поддерживающихся в течение многих минут. Поскольку реакция идёт в замкнутой системе, то через некоторое время вследствие процессов диссипации химической энергии реакция прекращается, и в системе устанавливается химическое равновесие.

В случае, когда реакция Белоусова–Жаботинского протекает без перемешивания раствора, можно наблюдать регулярные пространственно-временные картины в виде распространяющихся волн (рис. 11.8). Показанные на рисунке волны созданы в тонком слое реагирующего вещества. Они бывают двух видов: кольце-



a



б



в

Рис. 11.8. Распространение химических волн в двумерной системе Белоусова–Жаботинского: *a* – волны с кольцевыми фронтами; *б* – спиральные волны; *в* – многозаходная спираль.

вые (*a*), имеющие почти цилиндрическую симметрию относительно оси, перпендикулярной поверхности слоя, и спиральные волны (*б*), вращающиеся в пространстве по или

против часовой стрелки. При некоторых условиях получаются многозаходные спирали, показанные на рис. 11.8, в. В любом из этих случаев волновые фронты распространяются на макроскопические расстояния без искажений и с заданной скоростью, что эквивалентно некоторому химическому сообщению, посылаемому из центра излучения волн.

11.4. Самоорганизация в живой природе и в человеческом обществе

Биологические системы являются открытыми системами, обменивающимися веществом, энергией и информацией с окружающей средой. Процессы самоорганизации являются основой развития любого организма, начиная с момента зарождения до момента смерти. По мере развития организма повышается уровень его структурной организации: от одноклеточной зиготы (зародышевой клетки) к функционально ориентированным клеткам, далее к специализированным органам, тканям и, наконец, к целому организму. Все процессы, определяющие эти структурные переходы, носят избирательный характер, т. е. протекают в определённых пространственно-временных рамках с определённой интенсивностью, подчиняясь принципу целостности развивающегося организма. Эти процессы являются чрезвычайно сложными и для их анализа необходим большой объём специальных знаний. Поэтому мы не будем их рассматривать, а обсудим живые системы, развитие которых характеризуется промежуточным уровнем сложности, как, например, амёбы вида *Dictyostelium discoideum*. Здесь развитие по существу сводится к переходному явлению, весьма сходному с тем, что наблюдаются в реакции Белоусова–Жаботинского, и

отмечающему переход от одноклеточной к многоклеточной стадии жизни.

На рис. 11.9 показан жизненный цикл этого вида. На рис. 11.9, *a* амёбы находятся в одноклеточной стадии. Они движутся во внешней среде, питаются бактериями и размножаются путём клеточного деления. В целом среда с амёбами представляет собой однородную систему, поскольку их плотность (число клеток на квадратный сантиметр) весьма постоянна. Допустим теперь, что амёбы начинают голодать (в лаборатории это легко сделать искусственно, а в природе такое может случиться вследствие неблагоприятных изменений среды обитания). Это условие

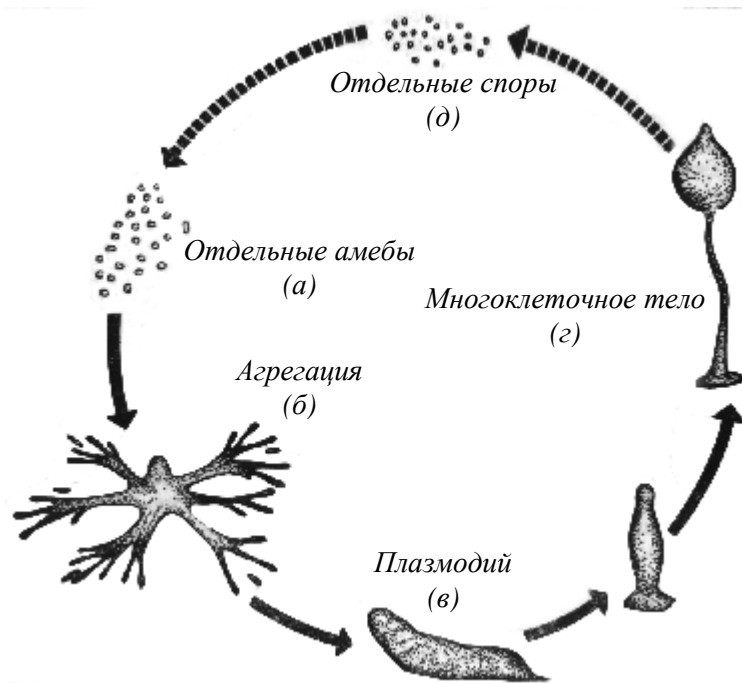


Рис. 11.9. Жизненный цикл амёбы *Dictyostelium discoideum*.

является аналогом некоторого ограничения в физическом или химическом эксперименте. При этом можно видеть, что отдельные клетки не умирают. Вместо этого в ответ на данное ограничение они начинают агрегироваться по направлению к некоторому центру притяжения (рис.11.9, б). Изначальная однородность распределения клеток нарушается – пространство структурируется. Возникающее при этом многоклеточное тело способно двигаться главным образом с целью отыскания более благоприятных условий по температуре и влажности (рис. 11.9, в). После такой миграции в результате дифференциации из многоклеточного тела возникают два типа клеток, причём

клетки одного типа образуют своеобразную ножку, а клетки другого типа – плодовое тело, внутри которого образуются споры (рис. 11.9, з). В конечном счёте споры рассеиваются в среде обитания (рис. 11.9, д), и при благоприятных условиях они прорастают, с тем чтобы превратиться в амёб. После этого начинается новый жизненный цикл.

Рассмотрим несколько подробнее стадию агрегации (рис. 11.10). В течение этого процесса наблюдаются следующие явления. Прежде всего, после установления условий нехватки питательных веществ некоторые клетки начинают синтезировать и выделять во внеклеточную среду химическое вещество, известное под названием циклического аденозинмонофосфата (цАМФ) и играющего роль своего рода сигнала. Его синтез и выделение происходят периодически, подобно химическим часам в системе Белоусова–Жаботинского, с чётким периодом при данных экспериментальных условиях. Диффундируя во внеклеточной среде, выделенный клетками «пионерами» цАМФ достигает поверхности соседних клеток. После этого происходят события двух типов. Во-первых, эти клетки направлено движутся в область повышенной концентрации цАМФ (так называемый *хемотаксис*). В результате возникает распределение плотности клеток, сильно напоминающее волновые картины в реакции Белоусова–Жаботинского (рис. 11.8). Во-вторых, процесс агрегации ускоряется за счёт способности клеток усиливать сигнал и передавать его дальше по среде. Это позволяет организму контролировать большую территорию и формировать многоклеточное тело, содержащее около 10^5 клеток.

Суммируя сказанное, можно отметить, что ответ системы на нехватку пищи приводит к новому уровню

организации, характеризуемому согласованным поведением большого числа клеток и позволяющему организму гибко реагировать на неблагоприятные изменения среды обитания.



Рис. 11.10. Концентрические и спиральные волны агрегирующих популяций клеток *Dictyostelium discoideum* на поверхности агара. Движущиеся к центру амёбы выглядят как белые полосы, а неподвижные – как тёмные полосы.

Процессы самоорганизации происходят и в человеческом обществе. Даже сам факт существования человеческого сообщества как структурной организации в природе, возникшей в результате кооперативного взаимодействия между отдельными индивидуумами с целью выживания, подтверждает это высказывание. Человеческое сообщество, являясь открытой системой, обменивается с окружающей природной средой энергией, веществом и информацией. Внутри человеческого сообщества, как и в остальной части природы, протекают процессы самоорганизации. Например, в человеческом сообществе в процессе эволюции возникли этносы, государства, социальные слои, трудовые коллективы, спортивные общества и т. п. В качестве примера процесса самоорганизации в обществе рассмотрим социалистическую революцию 1917 года в России.

К 1917 году в Российском обществе начала складываться революционная ситуация. Россия, являясь открытой системой, участвовала в это время в Первой мировой войне против Германии и её союзников. В войне Россия теряла большие и невозполнимые материальные и людские ресурсы, а взамен получала возвращающихся с войны физически и морально искалеченных людей и информацию о невозможности одержать победу в ближайшее время. Это разрушало экономику России, вело к обнищанию основной массы населения и разрушало нравственные устои общества, что создавало напряжённость во взаимоотношениях между социальными слоями в обществе.

То, что война приближала Российское общество к кризису, хорошо понимал лидер партии большевиков

В.И.Ленин (Ульянов) (1870–1924). В 1914 году в работе «Война и российская социал-демократия» Ленин писал: «Превращение современной империалистической войны в гражданскую войну есть единственно правильный пролетарский лозунг... Как бы ни казались велики трудности такого превращения в ту или иную минуту, социалисты никогда не откажутся от систематической, настойчивой, неуклонной подготовительной работы в этом направлении, раз война стала фактом». Большевики стали открыто выступать за поражение России в войне. С этой целью они проводили подрывную работу среди российских солдат и матросов на фронте, призывая их к прекращению военных действий и возвращению домой, а также организовывали выступления народных масс внутри страны, направленные на расшатывание устоев государственности. Большевики отказались от участия в программе гражданского мира и классового сотрудничества, предложенной рядом политических партий и направленной на выход России из сложной политической и экономической ситуации. Они встали на путь разрушения общественных отношений, руководствуясь положением «чем хуже, тем лучше».

Осенью 1917 года сложилась ситуация, когда по меткому выражению Ленина «низы не хотели», а «верхи не могли» жить по-старому. В обществе создалась гнетущая атмосфера безысходности, появились признаки хаоса и анархии. Это означало, что Российское общество перешло в состояние существенной неравновесности и неупорядоченности и приближалось к точке бифуркации, после которой Россия могла пойти по одному из двух альтернативных путей развития: капиталистическому, становясь индустриально

развитой страной, или социалистическому. Следует сказать, что к этому времени капитализм в России уже развивался. Однако в целом Россия оставалась ещё аграрной страной с феодальными пережитками. В этой ситуации на выбор пути развития России могли повлиять случайные возмущения в обществе в виде решительных действий представителей тех или иных социальных групп. Важность таких действий лучше других осознал Ленин, он же определил и момент времени их начала.

24 октября (по старому стилю) 1917 года Ленин направил послание в Центральный комитет партии большевиков, в котором говорилось: «...ни в коем случае не оставлять власти в руках Керенского и компании до 25-го, никоим образом; решать дело сегодня непременно вечером или ночью. История не простит промедления революционерам, которые могли победить сегодня (и наверняка победят сегодня), рискуя терять много завтра, рискуя потерять всё». По предложению Ленина 24 октября в Петрограде началось вооружённое восстание, в котором приняли участие отряды революционно настроенных рабочих, солдат и матросов. 25 октября 1917 года Временное правительство во главе с Керенским было низложено. Это явилось мощным импульсом к захвату власти большевиками по всей стране. По России прокатилась революционная волна, перешедшая в гражданскую войну, продолжавшуюся до 1920 года. Таким образом, сбылись планы большевиков по превращению империалистической войны в гражданскую. Ленин писал, что война явилась всесильным «режиссёром» революции или в соответствии с теорией Пригожина – управляющим параметром.

Вооружённое восстание 24 октября 1917 года стало тем возмущением в обществе, которое среди прочих оказалось настолько сильным, что запустило процесс бифуркации и определило социалистический путь развития общества. Процесс самоорганизации завершился к 1936 году построением социалистического общества, в котором были сформированы властные, политические, правовые и другие структуры. Однако по ряду причин, на которых мы не будем останавливаться, социалистический путь развития оказался неустойчивым, и в настоящее время мы являемся свидетелями и участниками процесса перехода России на капиталистический путь развития.

Литература к главе 11

1. *Дубнищева Т.Я.* Концепции современного естествознания: Учебник. – М.: ИКЦ «Маркетинг», Новосибирск: ООО «Издательство «ЮКЭА», 2001. – 832 с.

2. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. Введение. – М.: Мир, 1990. – 344 с.

3. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 312 с.

4. *Хакен Г.* Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с.

Г Л А В А 12

КОНЦЕПЦИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Устойчивость развития биосферы Земли, в том числе и человеческого сообщества, в настоящее время всецело зависит от уровня развития и характера взаимодействия пневматосферы и ноосферы нашей планеты. Показателем позитивного воздействия сферы духа на сферу разума является переход от сугубо прагматического «эгоистического» мышления, согласно которому удовлетворение всё растущих материальных потребностей общества осуществляется за счёт хищнической эксплуатации природных ресурсов, необратимо изменяющей биосферу, к планетарному мышлению, организующему взаимодействие человека с природой таким образом, чтобы земные оболочки находились в устойчивом равновесии друг с другом и с космосом.

12.1. Принципы устойчивого развития

Словосочетание «*устойчивое развитие*» («sustainable development») стало широко использоваться мировым сообществом после публикации в 1987 году доклада «Наше общее будущее», подготовленного Комиссией ООН по окружающей среде и развитию. Выводы этой комиссии послужили основой разработки концепции устойчивого развития нашей цивилизации, направленной на преодоление острых противоречий в отношениях между элементами системы человек – общество – биосфера и реализации стратегии биосферосовместимой деятельности человека.

Устойчивое развитие – это процесс, обеспечивающий экономический рост социоприродной системы любого уровня сложности, не нарушающий её безопасности и ведущий к повышению «качества жизни» как настоящих, так и будущих поколений. Понятие «безопасность» в данном случае используется в самом широком смысле – от личной безопасности до безопасности национальной, региональной и глобальной.

Концепция устойчивого развития предполагает переход к новому типу функционирования цивилизации, основанному на радикальных изменениях исторически сложившихся ориентиров в экономической, социальной, экологической, культурологической и других сферах деятельности человека. Концепция устойчивого развития является теоретической основой *парадигмы* устойчивого развития, представляющей собой модель постановки задач и их решения, а также методологию исследований. В основе концепции устойчивого развития лежит ряд принципов. Рассмотрим наиболее важные из них.

Принцип биосфероцентризма. Концепция устойчивого развития предполагает переход во взаимоотношении человек – природа от принципа антропоцентризма к принципу биосфероцентризма. Принцип антропоцентризма, действующий в течение многих столетий, определяет доминирующий статус человека в его взаимоотношениях с биосферой. Это означает чисто потребительское отношение к природе, которое неизбежно ведёт к экологической катастрофе. Выход из сложившейся кризисной ситуации находится в формировании новых духовно-нравственных ценностей человека, направленных на переориентацию

эпицентра развития с «человеческого» на «биосферное» измерение бытия.

Принцип коэволюции человека и биосферы. Принцип коэволюции (совместного развития) человека и биосферы выдвинул академиком Н.Н.Моисеевым. Он направлен на обеспечение основных потребностей человека при сохранении адаптационных возможностей естественных экологических систем как на локально-региональном, так и на глобальном уровне. Производственно-хозяйственная и социокультурная деятельность людей не должна приводить к деградационным изменениям естественных экосистем. Соблюдать принцип коэволюции особенно важно при условии продолжающегося мирового демографического роста и интенсификации потребления природно-ресурсного потенциала.

Принцип оптимизации потребностей. Возможности природно-ресурсного потенциала биосферы ограничены и поэтому наблюдающийся сейчас интенсивный рост общественных потребностей должен быть существенно замедлен, а в будущем возможно даже прекращён из-за угрозы деградации экосистем. Нормы потребления материальных благ должны быть при этом оптимизированы. Однако на пути реализации этого принципа существуют серьёзные трудности, связанные с сильно различающимися уровнями потребления в разных странах. Для развитых стран характерно сверхпотребление во всех его формах, а большинство населения развивающихся стран испытывает потребительский дефицит.

Анализ показывает, что если развивающиеся страны выйдут на уровень западных норм потребления, то глобальная экосистема может утратить своё равновесие. Решение этого противоречия лежит в некотором рациональном сближении норм потребления развитых и развивающихся стран с выходом на соответствующий регионально-мировой оптимум потребления, учитывающий национальные традиции, природно-климатические особенности, религиозные ограничения и т. п.

Для осуществления такого решения необходимо установление нового мирового экологического порядка, в соответствии с которым природно-ресурсное потребление будет основано на принципах равноправия и справедливости. Это означает, что каждая страна мирового сообщества должна будет получать определённую квоту потребления природных ресурсов. Если будет происходить превышение квоты потребления, то использование «квотной разницы» должно финансироваться дополнительно. Разница будет накапливаться в мировом экологическом фонде, ресурсы которого будут реализовываться на мероприятия по охране и восстановлению естественных экосистем и их природно-ресурсного потенциала.

Такой мировой экологический порядок может сложиться только на основе реализации стратегии долговременного и конструктивного международного сотрудничества, когда страны активно включатся в интеграционный процесс и произойдёт интернационализация производственно-хозяйственной и социокультурной деятельности при безусловном

сохранении региональных, национальных и религиозных особенностей.

В процессе перехода цивилизации на уровень устойчивого развития биосферы Земли будет происходить изменение мировоззрения людей, на основе которого утвердятся новый тип мышления – планетарное мышление.

12.2. Основные черты планетарного мышления

Планетарное мышление – это мышление, основанное на мировоззрении, согласно которому существует единое культурное пространство, объединяющее на основе взаимной дополнительности такие сферы человеческой деятельности, как наука, религия, философия, искусство, литература, и т. п., и направленное на обеспечение условий устойчивого развития биосферы Земли. Деление единого культурного пространства на отдельные области имеет условный характер. Оно происходит в сфере разума вследствие высокой степени абстрагирования, присущей рассудочной деятельности человека. Однако резкой границы между областями культуры не существует, области взаимно перекрываются и сосуществуют в диалектическом единстве.

Дифференциация культуры происходит естественным образом. Это создаёт условия для более глубокого изучения процессов, происходящих в той или иной области культуры. В результате добываются новые знания, обобщения которых позволяют открывать новые законы. Достижения на этом пути могут создавать у исследователей иллюзию абсолютной значимости конкретной области культуры по отношению к другим её областям. Это ведёт, в конечном

счёте, к антагонистическим противоречиям и конфронтации, аналогичным тем, которые наблюдаются между естественнонаучной и гуманитарной культурами, и перекосам при разработке и выполнении научно-технических программ, затрагивающих жизненные интересы больших групп населения планеты. В результате могут возникнуть существенные нарушения в коэволюционном развитии составляющих биосферы, способных привести к экологической катастрофе.

Информация о негативных изменениях в биосфере, как впрочем, и обо всех других изменениях, по системе обратной связи поступает в сферу разума и затем в сферу духа. Пневмасфера, воздействуя на ноосферу, интенсифицирует действие интеграционных процессов и запускает в действие механизм переоценки ценностей в планетарном масштабе. Происходит изменение мировоззрения людей и они начинают действовать в направлении возврата биосферы к состоянию устойчивого развития.

Данные процессы саморазвития и саморегулирования в настоящее время начинают широко исследоваться в рамках теории эволюционизма.

12.3. Универсальный эволюционизм

Термин «эволюционизм» используется в широком смысле для обозначения концепции развития, как представления об изменениях в неживой и живой природе и в человеческом обществе. Различают понятия *микроэволюционизма*, исследующего закономерности развития систем микромира, *макроэволюционизма*,

рассматривающего эволюционные процессы объектов и систем макромира, *мегаэволюционизма* или, как его ещё называют, *глобального эволюционизма*, изучающего развитие глобальных систем мегамира, например, таких как галактики и Вселенная, и *универсального эволюционизма*, выявляющего универсальные (всеобщие) закономерности эволюции любых систем, имеющих различную природу и относящихся к различным уровням структурной организации. Подробно рассмотрим принципы универсального эволюционизма.

Формирование научной концепции эволюционизма началось с работ Ч.Дарвина, посвящённых теории эволюции биологических систем. Эволюция (от лат. *evolutio* – развёртывание) – в широком смысле представления об изменениях в неживой природе, органическом мире, обществе, их направленности, порядке, закономерностях. Идея эволюции заключается в том, что определённое состояние какой-либо системы является результатом более или менее длительных изменений предшествовавшего её состояния. В узком смысле эволюция – представление о медленных, постепенных количественных изменениях, в отличие от революции.

Вслед за эволюционной теорией в биологии стали возникать эволюционные концепции в геологии, астрономии и других конкретных науках. В настоящее время установлено, что эволюционные процессы протекают во всех материальных объектах независимо от их природы и масштабно-структурных характеристик. Опыт показывает, что наряду с индивидуальными особенностями развития конкретных систем в их эволюции обнаруживается общность, сходные черты, универсальность. Это диктует

необходимость формирования концепции универсального эволюционизма.

На пути разработки концепции универсального эволюционизма достигнуты значительные успехи. Так, на основе синергетического подхода удаётся анализировать процессы самоорганизации в системах различной природы и превращение хаоса в порядок. В работах И.Р.Пригожина с коллегами показано, что в открытых нелинейных диссипативных системах могут протекать процессы самоорганизации, носящие универсальный характер, они не зависят от природы объектов, образующих систему. Подробно процессы самоорганизации в системах, имеющих физическую, химическую, биологическую и социальную природу, рассмотрены в главе 11 данной книги.

Существенный вклад в разработку теоретических основ универсального эволюционизма вносят теория катастроф, кибернетика и теория информации. Теория катастроф привлекается для описания качественных перестроек в системе – бифуркаций, возникающих как своеобразный ответ на плавные изменения внешних воздействий при наличии флуктуаций в системе. Симметрия, имевшаяся в системе, нарушается, и система начинает эволюционировать к состоянию с новой симметрией.

Кибернетика (от греч. *kybernētiké* – искусство управления) – наука об управлении, связи и переработке информации. Системы, изучаемые кибернетикой, носят название кибернетических. Они имеют самую различную природу, например, вычислительные системы, человеческий мозг, биологические популяции, социальные

группы и т. п. Кибернетические системы состоят из множества взаимосвязанных объектов, способных воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию. Теоретическое ядро кибернетики составляют теория информации, теория алгоритмов, теория оптимального управления и другие.

Разработка концепции универсального эволюционизма сопровождается аккумулярованием знаний многих областей науки. В то же время универсальный эволюционизм оказывает существенное влияние на формирование мировоззрения исследователей, занимающихся решением проблем в конкретных науках. Эволюционное мировоззрение становится важнейшим компонентом современного научного мышления, ориентирующим исследователей при разработке и реализации научно-технических проектов на гармонизацию отношений человека с биосферой.

12.4. Путь к единой культуре

В процессе продвижения человечества к состоянию устойчивого развития формируется новое мировоззрение, базирующееся на отказе от концепции «двух миров» (развитого и развивающегося, западного и восточного, Севера и Юга и т. п.) и провозглашении социокультурной многомерности цивилизации. В основе концепции устойчивого развития лежат представления о единстве мира, взаимосвязи западного и восточного принципов развития, универсальном характере интерпретации объективной реальности. Это способствует формированию *интегративной* культуры, стремящейся к объединению западных и восточных идеалов, традиционных и

современных подходов как выражение глобальной ориентации мирового развития, повышения степени устойчивости цивилизационного процесса при сохранении множественности социокультурных особенностей развития (христианские, исламские, индо-буддистские и другие традиции).

Переход к единой культуре сопровождается преодолением «непримиримых» противоречий «двух типов» культуры – естественнонаучной и гуманитарной, возникших в результате сложившихся отличительных особенностей естественнонаучного и технического знания с одной стороны и гуманитарного знания с другой стороны. Парадигма устойчивого развития цивилизации предполагает при решении практических задач, стоящих перед человечеством, переход развития науки от предметно-дисциплинарного к проблемно-дисциплинарному, что создаёт теоретико-методологические и социальные предпосылки для конструктивной реализации интегративных тенденций в системе современного естествознания, техникзнания и человекознания.

Сейчас активно идёт процесс взаимообогащения естественных и гуманитарных наук. Это находит отражение в гуманитарных экспертизах научно-технических программ и адаптации методологии естественнонаучного познания объективной реальности к научным исследованиям в гуманитарной области.

Важным компонентом культуры является искусство. Если наука руководствуется понятийным мышлением, то искусство ориентируется на образное мышление, характеризующее стиль художественного творчества.

Знания, добытые с помощью науки, носят объективный характер, а освещение действительности в произведениях искусства несёт большой заряд субъективности. При проведении научных исследований проявляется рассудочная деятельность человека, а при создании произведений искусства – его духовная деятельность. Следовательно, взаимодействие между наукой и искусством является отражением взаимодействия между сферой разума и сферой духа. Наука и искусство принадлежат целостности, называемой культурой, и в соответствии с принципом дополнительности являются взаимозависимыми. Достижения в области науки влияют на развитие искусства и наоборот.

Литература к главе 12

1. **Вернадский В.И.** Биосфера и ноосфера. – Рольф, 2002. – 576 с. – (Библиотека истории и культуры).

2. **Данилов В.С., Кожевников Н.Н.** Основные концепции современного естествознания: Учебное пособие для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 256 с.

3. **Дыбов А.М., Иванов В.А.** Концепции современного естествознания. Учебное пособие. – Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 1999. – 320 с.

4. **Лось В.А., Урсул А.Д.** Устойчивое развитие: Учебное пособие – М.: Агар, 2000. – 254 с.

5. Лучшие рефераты. Концепции современного естествознания. / Под ред. **С.И.Самыгина**. Серия «Банк рефератов». Ростов н/Д: Феникс, 2002. – 352 с.

6. *Тейяр де Шарден П.* Феномен человека: Сборник очерков и эссе. – М.: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 533 с.

СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ

Абиотические факторы – совокупность условий неорганической среды (климат, почва, рельеф местности и др.), влияющих на живые организмы, включая и человека.

Автотрофы – организмы, синтезирующие из неорганических веществ (воды, двуокиси углерода, окислов азота), используя солнечную энергию, органические соединения, необходимые для жизнедеятельности. К ним относятся зелёные растения (фототрофы), использующие энергию фотосинтеза; некоторые бактерии (хемотрофы).

Адаптация – приспособление живых организмов, в том числе и человека, к изменениям природной и социокультурной среды обитания.

Аденин – пуриновое основание, содержится во всех живых организмах в составе нуклеиновых кислот в клетках; одна из четырёх «букв» генетического кода.

Адроны – класс элементарных частиц, участвующих в сильном взаимодействии. К адронам относят барионы и мезоны.

Аминокислоты – класс органических соединений, служащих основным элементом построения растительных и животных белков.

Аннигиляция (лат. – исчезновение, уничтожение) пары – один из видов превращений элементарных частиц, происходящих при столкновении частицы с античастицей. При аннигиляции частица и античастица исчезают,

превращаясь в другие частицы, число и сорт которых лимитируются законами сохранения. Например, при малых энергиях столкновения в процессе аннигиляции пары электрон-позитрон возникают фотоны.

Античастицы – элементарные частицы, имеющие те же значения массы и других физических характеристик, что и их двойники-частицы, но отличающиеся от частиц знаками электрического заряда, магнитного момента и др. Античастицей электрона является позитрон, заряд которого положительный и равный заряду электрона по модулю.

Антропоцентризм – мировоззрение, в соответствии с которым человек является высшей целью мироздания; рассматривается как религиозно-философское и социокультурное обоснование обострения мировой экологической ситуации.

Бактерии – группа микроскопических, преимущественно одноклеточных организмов, обладающих клеточной стенкой, но не имеющих ядра и размножающихся делением.

Бактериофаг – вирус, поражающий бактерии.

Барионы – элементарные частицы, относящиеся к классу адронов, с полуцелым спином и массой не меньше массы протона. К барионам относятся нуклоны (протоны и нейтроны), гипероны и многие др.

Белок – высокомолекулярное соединение, состоящее из большого числа аминокислот, соединённых пептидными связями.

Биогеоценоз – сложная природная система, объединяющая на основе обмена веществ, энергии и информации совокупность живых организмов с неживыми компонентами среды обитания.

Биосфера – область распространения жизни на Земле, включая атмосферу, гидросферу и литосферу, заселённые живыми организмами. Состав, структура и энергетика биосферы определяются деятельностью живых организмов.

Биосфероцентризм – мировоззрение, в соответствии с которым целевой установкой цивилизационного процесса является сохранение биосферы, что выступает определяющим фактором выживания человека.

Биоценоз – совокупность растений, животных и микроорганизмов, населяющих участок среды с однородными условиями жизни (луг, лес, озеро, берег реки и т. д.).

Бифуркация – критическая пороговая точка, в которой происходит качественное изменение поведения объекта. Точка ветвления траектории движения (изменения) неравновесной системы в момент её структурной перестройки. В точках бифуркации система находится одновременно как бы в двух состояниях и предсказать её детерминированное поведение невозможно.

Близкодействие – передача взаимодействия посредством полей от точки к точке с конечной скоростью, не превышающей скорости света в вакууме.

Вакуум физический – наинизшее состояние квантовых полей, характеризующееся отсутствием каких-либо реальных частиц. Все квантовые числа физического вакуума (импульс, электрический заряд и др.) равны нулю. Однако в физическом вакууме возможны виртуальные процессы, наблюдать которые непосредственно невозможно, но которые приводят к ряду специфических эффектов при взаимодействии реальных частиц с физическим вакуумом.

Вероятность – числовая характеристика возможности появления какого-либо случайного события при тех или иных условиях.

Вещество – вид материи, обладающей массой покоя. Любое вещество состоит из элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов), которые образуют атомы, молекулы, тела.

Взаимодействие – воздействие тел или частиц друг на друга путём обмена виртуальными частицами (фотонами, гравитонами и др.).

Взрыв – освобождение большого количества энергии в ограниченном объёме за короткий промежуток времени, связанное с внезапным изменением состояния системы.

Вид – совокупность популяций особей, способных к скрещиванию с образованием потомства и обладающих рядом общих признаков.

Виртуальные частицы – частицы, рассматриваемые в квантовой теории поля, непрерывно возникающие и исчезающие в очень короткие промежутки времени. Эти промежутки времени связаны с энергией частиц соотношением неопределённости. Виртуальные частицы существуют только в промежуточных (имеющих малую длительность) состояниях и не могут быть зарегистрированы. Виртуальные частицы являются переносчиками взаимодействия (взаимодействующие тела обмениваются виртуальными частицами).

Вирусы – возбудители инфекционных болезней растений, животных и человека, размножающиеся только внутри живых клеток.

Витализм – идеалистическое учение в биологии, согласно которому жизнь объясняется наличием в организмах нематериального начала (жизненная сила, душа, энтелехия), якобы управляющего жизненными явлениями.

Внутренняя энергия – энергия физической системы, зависящая от её внутреннего состояния, она включает энергию хаотического движения всех микрочастиц системы (кинетическую энергию) и энергию взаимодействия всех частиц (потенциальную энергию).

Галактика – Млечный Путь – спиралеобразная уплощённая звёздная система, содержащая около 200 млрд звёзд, включая Солнце со всеми планетами.

Ген – материальный носитель наследственности, единица наследственной информации, отвечающая за формирование какого-либо признака, способная к воспроизведению и расположенная в определённом участке хромосомы.

Генетика – наука о законах наследственности и изменчивости организмов и методах управления ими.

Генетический код – единая система записи наследственной информации в молекулах нуклеиновых кислот в виде последовательности нуклеотидов.

Геном – совокупность генов, содержащихся в одинарном наборе хромосом данной растительной или животной клетки.

Генотип – совокупность всех генов организма, содержащихся в его хромосомах.

Генофонд – качественный состав и относительная численность разных форм различных генов в популяциях того или иного вида организмов.

Гетеротрофы – организмы, питающиеся органическими веществами. К ним относятся грибы, многие микроорганизмы, все животные и люди.

Гипотеза – научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого-то явления и требующее проверки на опыте и теоретического обоснования для того, чтобы стать достоверной научной теорией.

Глюоны – гипотетические частицы с нулевой массой, осуществляющие взаимодействия между кварками.

Гравитационный коллапс – катастрофически быстрое сжатие космологических массивных объектов под действием гравитационных сил.

Гуанин – пуриновое основание, содержится в составе нуклеиновых кислот в клетках, одна из четырёх «букв» генетического кода.

Дальнодействие – действие на расстоянии, при котором действие тел друг на друга передаётся мгновенно через пустоту на любые расстояния без каких-либо посредствующих звеньев.

Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) – молекула генетической информации, образует вещество хромосом и генов, состоит из двух полипептидных цепей, закрученных одна вокруг другой в спираль.

Диалектика – теория и метод познания явлений действительности в их развитии и самодвижении.

Динамическая система – математическое представление реальных систем (физических, химических, биологических и любых других), эволюция которых во

времени на бесконечном интервале времени однозначно определена начальными условиями.

Диссипативная структура – пространственно-временная структура, упорядоченность и когерентность которой определяется достаточным потоком внешней энергии и интенсивной диссипацией; состояние частичной упорядоченности вдали от равновесия.

Диссипация – переход энергии упорядоченного движения в энергию хаотического движения (теплоту).

Доминанта – основной, господствующий, определяющий признак.

Дух – понятие, означающее идеальное (нематериальное) начало. Дух человека проявляется через его волю, интуицию, чувства, нравственность, мораль и т. п.

Душа – понятие, выражающее воззрение на внутренний мир человека, в философии и религии – особая нематериальная субстанция, не зависящая от тела, в гилозоизме – изначальная основа мира как одушевлённого органического целого. У Платона – двигатель и организующее начало Космоса, внетелесная тонкая экзосоматическая система, информационно-энергетическое поле ноосферы.

Естественный отбор – особый механизм выживания и воспроизведения организмов в природе, отбор в ходе эволюции наиболее приспособленных к условиям среды и

гибель неприспособленных, следствие борьбы за существование.

Живое вещество – в концепции В.И.Вернадского совокупность всех живых организмов на Земле, включая человечество.

Закон – необходимое, существенное, устойчивое, повторяющееся соотношение между явлениями в природе и обществе.

Звёзды – светящиеся газовые (плазменные) шарообразные тела, подобные Солнцу. Массы звёзд находятся в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца; светимость – в интервале от 10^{-4} до 10^5 от светимости Солнца; радиусы – от 10 км (нейтронные звёзды) до 10^3 радиуса Солнца (сверхгиганты).

Знание – результат познания действительности, проверенный практикой, верное её отражение в мышлении человека.

Идеализация – мысленное представление об объектах и явлениях, не существующих в действительности, но имеющих прообразы в реальном мире.

Иерархия – расположение частей или элементов целого в порядке от высшего к низшему (или наоборот).

Инвариантность – неизменность, независимость математических отношений от некоторых физических условий. Например, при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой математическая форма представления законов Ньютона остаётся неизменной.

Интерпретация – истолкование, разъяснение смысла какой-либо знаковой системы (символа, высказывания, текста).

Интуиция – способность постижения истины путём непосредственного её усмотрения без обоснования с помощью доказательств.

Иррационализм – идеалистическое учение в философии, отрицающее возможность разумного логического познания действительности и признающее основным видом познания интуицию, откровение, веру.

Истина – адекватное отражение предметов и явлений действительности познающим субъектом, воспроизводящее их так, как они существуют вне и независимо от сознания. Истина всегда конкретна и критерием её является практика.

Информация – сведения об окружающем мире и протекающих процессах, получаемые органами чувств человека или устройствами и передаваемые людьми устными, письменными и техническими средствами. Свойство материи, благодаря которому она в лице человека познаёт самоё себя; служит мостом между живой и неживой природой, показателем развития материи.

Катастрофа – в общем случае внезапное бедствие; событие, влекущее за собой тяжёлые последствия, в синергетике – скачкообразное изменение, возникающее в виде внезапного ответа системы на плавные изменения внешних условий.

Квазар (англ. – квазизвёздный источник радиоизлучения) – космический объект, обладающий мощным электромагнитным излучением в широком диапазоне длин волн. Квазары находятся на большом удалении от Солнечной системы. Мощность излучения одного квазара в 10^3 – 10^4 раз превышает мощность излучения всех звёзд крупной галактики. Физическая природа активности квазаров ещё до конца не раскрыта.

Квант – частица, являющаяся носителем свойств какого-либо физического поля. Например, квант электромагнитного поля – фотон.

Кварки – элементарные частицы с дробным электрическим зарядом, которые в комбинации с антикварками образуют адроны. В свободном состоянии кварки не существуют.

Кибернетика – наука об общих принципах управления в машинах, живых организмах и обществе.

Клетка – элементарная живая система, основа строения и жизнедеятельности всех растений и животных.

Кодон – триплет соседних оснований в ДНК и информационной (матричной) РНК, кодирующий определённую аминокислоту.

Конфайнмент – удержание кварков внутри адронов.

Концепция – определённый способ понимания, трактовки каких-либо явлений, основная точка зрения, руководящая идея для их освещения; ведущий замысел, конструктивный принцип различных видов деятельности.

Козволюция – совместная эволюция нескольких систем, например, совместное развитие человека и биосферы.

Ламаркизм – концепция развития органического мира, созданная Ж.-Б.Ламарком, согласно которой все виды растений и животных постоянно изменяются под прямым воздействием меняющихся условий жизни.

Лептоны – элементарные частицы не участвующие в сильном взаимодействии. К лептонам относятся электроны, мюоны, тау-частицы и соответствующие им электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино.

Лизосомы – клеточные структуры, содержащие ферменты, способные расщеплять белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды.

Липиды – группа органических веществ, включающая жиры и жироподобные вещества. Входят в состав всех живых клеток.

Литосфера – верхняя твёрдая оболочка Земли, располагающаяся на мантии.

Личность – термин, обозначающий целостного человека в единстве его индивидуальных способностей и выполняемых им социальных функций.

Мезоны – нестабильные элементарные частицы с нулевым или целым спином, принадлежащие к классу адронов.

Менталитет – глубинный уровень, коллективного и индивидуального сознания, включающий и бессознательное, совокупность готовностей, установок и предрасположений индивида или социальной группы действовать, мыслить, чувствовать и воспринимать мир определённым образом; хранилище коллективной памяти социума.

Метод – способ достижения какой-либо цели, решения конкретной задачи; совокупность приёмов или операций практического или теоретического познания или освоения действительности.

Методология – учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности.

Микробы – общее название всех микроорганизмов – бактерий и грибов, исключая микроскопические водоросли и вирусы.

Митоз – способ деления клеток, обеспечивающий тождественное распределение генетического материала между дочерними клетками и преемственность хромосом в ряду клеточных поколений.

Мутация – внезапно возникшее естественное или искусственное изменение в наследственных структурах (хромосомах и генах), ответственных за хранение генетической информации и её передачу.

Наследственность – свойство организмов повторять в ряду поколений сходные типы обмена веществ и индивидуального развития в целом.

Наука – рациональная сфера человеческой деятельности, связанная с получением, систематизацией и реализацией объективного знания о действительности; система наук условно делится на естествознание, техникосзнание и обществознание (человекознание), науки фундаментальные и прикладные.

Негэнтропия – мера упорядоченности системы, отрицательная энтропия.

Нейтрино – стабильная незаряженная элементарная частица со спином $\frac{1}{2}$, относящаяся к лептонам.

Нейтрон – нейтральная элементарная частица со спином $\frac{1}{2}$, относящаяся к барионам, нейтроны вместе с протонами образуют ядра атомов.

Нейтронная звезда – космический объект, вещество которого состоит в основном из нейтронов. Нейтронные звёзды образуются в результате взрыва сверхновых как конечная стадия эволюции массивных звёзд.

Ноосфера – сфера разума; в учении В.И.Вернадского биосфера, преобразованная человеческим разумом и трудом в качественно новое состояние, в котором разумная человеческая деятельность становится определяющим фактором динамики общества и природы.

Нуклеиновые кислоты – высокомолекулярные органические соединения, образованные остатками нуклеотидов. В зависимости от того, какой углевод входит в состав нуклеиновой кислоты – дезоксирибоза или рибоза, различают дезоксирибонуклеиновую (ДНК) и рибонуклеиновую (РНК) кислоты.

Нуклеотид – органическое вещество, состоящее из основания (пуринового или пиримидинового), углевода (рибозы или дезоксирибозы) и остатка фосфорной кислоты; составная часть нуклеиновых кислот.

Нуклоны – обобщающее название протонов и нейтронов, из которых построены ядра.

Онтогенез – индивидуальное развитие организма, охватывающее все его изменения от момента зарождения до окончания жизни.

Органеллы – специализированные структуры в клетках животных и растений (лизосомы, рибосомы, митохондрии и др.), выполняющие те или иные специфические функции.

Открытые системы – системы, которые могут обмениваться веществом, энергией и информацией с окружающей средой.

Парадигма – научная теория, воплощённая в системе понятий, выражающих существенные черты действительности; исходная концептуальная модель постановки проблем и их решения, методов исследования, господствующих в течение определённого времени в научном сообществе, и дающих представление о мире. Смена парадигм происходит в ходе научных революций.

Параллакс – видимое изменение положения предмета (тела) вследствие перемещение глаза наблюдателя; в астрономии – видимое изменение положения небесного светила вследствие перемещения наблюдателя. По параллаксу небесных светил методами тригонометрии определяют расстояние до этих светил.

Парсек (сокр. от параллакс и секунда) – единица длины, применяемая астрономии, равная расстоянию, на котором параллакс составляет 1". Парсек в СИ обозначается пк. $1\text{пк} = 3,263 \text{ светового года} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$.

Пневмасфера – сфера духа; сфера духовной деятельности человека, определяемая волей, интуицией, чувством, нравственностью, моралью, верой и т. п. Пневмасфера диалектически взаимодействует с ноосферой. В результате такого взаимодействия происходит взаимообогащение и развитие обеих сфер.

Популяция – совокупность особей данного вида, занимающих территорию внутри ареала вида, свободно скрещивающихся между собой и относительно изолированных от соседних совокупностей того же вида. Обладает определённым генофондом и рассматривается как элементарная единица эволюции на популяционно-видовом уровне организации жизни.

Прокариоты – организмы, лишённые оформленного ядра (вирусы, бактерии, сине-зелёные водоросли).

Пульсары – космические источники импульсного электромагнитного излучения.

Разум – способность понимания и осмысления; деятельность через понимание сущности явлений и процессов, познание, для которого характерно творческое оперирование абстракциями и сознательное исследование их природы.

Рационализм – философское направление, признающее разум основой познания. Научное знание согласно рационализму достигается только посредством разума.

Редупликация (репликация) – удвоение молекул ДНК при участии специальных ферментов. Редупликация обеспечивает точное копирование генетической информации, заключённых в молекулах ДНК.

Реликтовое излучение – космическое электромагнитное излучение, связанное с эволюцией

Вселенной после её рождения, фоновое космическое излучение, спектр которого соответствует температуре 2,752 К.

Рибонуклеиновая кислота (РНК) – одна из нуклеиновых кислот, характерная составная часть цитоплазмы растительных и животных клеток.

Рибосомы – немембранные клеточные органеллы; являются обязательными структурными компонентами цитоплазмы клеток растений и животных; осуществляют функцию синтеза белковых молекул из аминокислот.

Самоорганизация – процесс спонтанного возникновения порядка и организации из хаоса и беспорядка в открытых неравновесных нелинейных системах. При поглощении энергии из среды степень хаотизации в системе увеличивается и при достижении некоторого критического состояния в точке бифуркации флуктуация переводит систему в новое устойчивое состояние с более высоким уровнем сложности и упорядоченности по сравнению с предыдущим.

Симбиоз – длительное сожительство организмов разных видов, приносящее им взаимную пользу.

Синергетика – новое направление междисциплинарных научных исследований с целью выявления общих закономерностей в процессах образования, устойчивости и разрушения упорядоченных временных и пространственных структур в сложных неравновесных системах различной природы (физической,

химической, биологической, экологической, социальной и др.).

Социум – общность людей, совместно проживающих на какой-то территории и входящих во взаимные контакты значительно чаще, чем с соседними поселениями; социальная система, общество с какими-либо особенностями социального устройства.

Техносфера – часть биосферы, преобразованная людьми с помощью прямого и косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человечества; техносфера – это здания, различного рода сооружения, системы коммуникаций, производственное оборудование, транспортные средства и т. д.

Тимин – пуриновое основание, содержится во всех живых организмах в составе ДНК; одна из четырёх «букв» генетического кода.

Универсум – философский термин, означающий «мир как целое».

Устойчивое развитие – экономический рост, обеспечивающий удовлетворение материальных и духовных потребностей как настоящих, так и будущих поколений при сохранении равновесия исторически сложившихся экосистем; основа «устойчивой цивилизации».

Устойчивость биосферы – сохранение равновесия глобальной экосистемы при воздействии деятельности технико-антропогенного характера.

Фауна – совокупность всех видов животных какой-либо местности или геологического периода.

Фенотип – совокупность всех признаков и свойств организма, сформировавшихся в процессе его индивидуального развития.

Ферменты – биомолекулы-катализаторы – вещества белковой природы, содержащиеся в животных и растительных организмах, направляющие, формирующие, регулирующие и многократно ускоряющие биохимические процессы в них.

Флора – совокупность всех видов растений какой-либо местности или геологического периода.

Флуктуация – случайное отклонение величины, характеризующей систему из большого числа частиц, от её среднего значения.

Фотон – квант света, квант электромагнитного поля, нейтральная элементарная частица с нулевыми массой покоя и спином.

Хроматин – вещество (нуклеопротеид) клеточного ядра, составляющее основу хромосом.

Хромосомы – структурные элементы ядра клетки, содержащие ДНК, в которых заключена наследственная информация организма. В хромосомах в линейном порядке расположены гены. Самоудвоение и закономерное распределение хромосом по дочерним клеткам при клеточном делении обеспечивает передачу наследственных свойств организма от поколения к поколению.

Центромера – участок хромосомы, удерживающий две её нити; во время деления центромера направляет движения хромосом к полюсам клетки.

Цивилизация – уровень общественного развития, материальной и духовной культуры.

Цитозин – пиримидиновое основание, содержится во всех живых организмах в составе нуклеиновых кислот; одна из четырёх «букв» генетического кода.

Чёрная дыра – космический объект, возникающий в результате сжатия тела гравитационными силами до размеров, меньших его гравитационного радиуса, когда из-за сильного гравитационного поля никакие частицы, в том числе и свет, не могут выйти за пределы гравитационного радиуса, и поэтому любому наблюдателю космический объект кажется «чёрным».

Эволюционизм – теория, определяющая развитие только как постепенное изменение, отрицающее скачкообразные переходы.

Эволюция – процесс непрерывного развития, изменения в неживой и живой природе и социуме, в их направленности и закономерностях; в биологии определяется наследственностью, изменчивостью и естественным отбором. В классической физике эволюция – это стремление к равновесию.

Экологическая система (экосистема) – основная функциональная единица в экологии (синоним биогеоценоза), включая совместно функционирующие организмы (биотическое вещество) на данном участке и элементы физической среды; поток энергии создаёт чётко определённые биотические структуры и круговорот веществ между живой и неживой средой. Биосфера – глобальная экосистема.

Экология – раздел общей биологии, изучающий взаимоотношения растений, животных, в том числе и человека, как между собой, так и с окружающей природной средой. Развивается социокультурное направление в экологии, выражающее потребность научного подхода к изучению взаимоотношений человека, общества и биосферы. Экология человека – изучение взаимоотношений человека, преимущественно как биологического существа, с окружающей природной средой; глобальная экология – изучение процессов взаимоотношений человека и биосферы на планетарном уровне; социальная экология – комплексное исследование взаимоотношений общества и биосферы.

Элементарные частицы – мельчайшие известные частицы физической материи, однако чёткого критерия «элементарности» частицы нет. Например, адроны состоят из кварков, кварки из протокварков и т. д. Тем не менее, в известной мере их можно считать некими «кирпичиками» мироздания на современном уровне познания материи.

Энтропия – понятие, введённое Р.Клаузиусом для определения меры необратимого рассеяния энергии в термодинамических процессах. В дальнейшем понятие энтропии стало применяться в статистической физике, в теории информации и других дисциплинах как мера неопределённости опыта, как вероятностная мера хаотичности, неупорядоченности процессов и структур.

Эукариоты – живые организмы, клетки которых содержат оформленное ядро, отделённое от цитоплазмы оболочкой.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
ГЛАВА 1. Общие представления о науке и её методологии	9
1.1. Наука как рациональная сфера человеческой деятельности	10
1.2. Классификация наук	13
1.3. Естествознание. Методы естественно-научного познания мира	14
1.4. Естественнонаучная и гуманитарная культуры	16
<i>Литература к главе 1</i>	21
ГЛАВА 2. Структурные уровни организации материи и фундаментальные взаимодействия	22
2.1. Современные представления об иерархических уровнях организации материи. Микро-, макро- и мегамиры	22
2.2. Этапы развития атомистической концепции	24
2.3. Фундаментальные взаимодействия в природе	31
<i>Литература к главе 2</i>	34
ГЛАВА 3. Концепции пространства и времени	36
3.1. Основные этапы развития представлений о пространстве и времени	36
3.2. Основы классической механики и их связь со свойствами пространства и времени	40
3.3. Пространство и время в специальной и общей теории относительности	45
<i>Литература к главе 3</i>	56
ГЛАВА 4. Симметрия и законы сохранения	57
4.1. Связь законов сохранения с пространственно-временными преобразованиями	59
4.2. Закон сохранения импульса	60

4.3. Закон сохранения энергии	63
4.3.1. Работа и кинетическая энергия	63
4.3.2. Потенциальная энергия	66
4.3.3. Полная механическая энергия	68
<i>Литература к главе 4</i>	70
ГЛАВА 5. Термодинамический и статистический методы анализа систем и процессов	71
5.1. Уравнение состояния. Нулевое начало термодинамики	71
5.2. Первое начало термодинамики	72
5.3. Второе начало термодинамики. Энтропия и её статистический смысл	74
5.4. Третье начало термодинамики	81
5.5. Гипотеза «тепловой смерти» Вселенной	82
5.6. Термодинамика открытых систем	83
<i>Литература к главе 5</i>	85
ГЛАВА 6. Концепция электромагнетизма	86
6.1. Взаимодействие зарядов. Основы электростатики	86
6.2. Электрический ток. Закон Ома	90
6.3. Магнитное поле движущихся зарядов	92
6.4. Электромагнитная теория Максвелла	95
6.5. Электромагнитные волны	99
6.6. Волновая оптика	101
6.7. Интерференция света	104
6.8. Дифракция света	106
<i>Литература к главе 6</i>	108
ГЛАВА 7. Квантовые свойства материи	109
7.1. Корпускулярно-волновой дуализм света и микрочастиц	109
7.2. Принцип неопределённости Гейзенберга и принцип дополнительности Бора	112
7.3. Вероятностно-статистический характер поведения микрочастиц	117
7.4. Релятивистская квантовая физика.	

Физический вакуум	122
7.5. Атомы, молекулы и вещество с точки зрения квантовой теории	124
7.6. Типы химических связей	130
<i>Литература к главе 7</i>	135
ГЛАВА 8. Астрономическая картина мира	137
8.1. Общие представления о Вселенной и её происхождении	137
8.1.1. Модели нестационарной Вселенной	138
8.1.2. Модель горячей Вселенной	141
8.1.3. Модель раздувающейся Вселенной	144
8.2. Звёзды и галактики	147
8.3. Солнечная система. Происхождение и строение Земли	154
<i>Литература к главе 8</i>	161
ГЛАВА 9. Биологическая картина мира	163
9.1. Гипотезы происхождения жизни	164
9.2. Основные принципы эволюции жизни	167
9.3. Появление человека на Земле и его эволюция	169
9.4. Биологическая клетка как элементарная единица живого	173
9.4.1. Строение клетки	174
9.4.2. Жизненный цикл клетки	178
9.4.3. Структурно-функциональная организация генетического материала	182
9.4.4. Использование генетической информации в процессах жизнедеятельности. Синтез белка	190
9.5. Виды живых систем. Свойства жизни	195
9.6. Основные уровни организации живого	199
<i>Литература к главе 9</i>	206
ГЛАВА 10. Концепции биосферы и ноосферы Земли	208
10.1. Современные представления о биосфере Земли	208

10.2. Учение Вернадского о ноосфере	212
10.3. Общие представления о пневмасфере	215
10.4. Космические и биологические циклы	218
<i>Литература к главе 10</i>	224
ГЛАВА 11. Концепция самоорганизации	226
11.1. Самоорганизующиеся системы и их свойства	226
11.2. Пороговый характер самоорганизации. Бифуркация	232
11.3. Самоорганизация в химических реакциях	238
11.4. Самоорганизация в живой природе и в человеческом обществе	241
<i>Литература к главе 11</i>	247
ГЛАВА 12. Концепция устойчивого развития	248
12.1 Принципы устойчивого развития	248
12.2. Основные черты планетарного мышления	251
12.3. Универсальный эволюционизм	252
12.4. Путь к единой культуре	254
<i>Литература к главе 12</i>	256
Словарь основных терминов	257