

С. Н. Милюкина

**ОСНОВЫ
СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Курс лекций



Витебск, 2012

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

С. Н. Милюкина

ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Курс лекций

Витебск
2012

УДК 5
ББК 2
О 75

Рецензент:

Шилина М.В., кандидат биологических наук, доцент кафедры
«Анатомии и физиологии» УО «ВГУ им. П.М. Машерова»

О 75 Основы современного естествознания : курс лекций /
С. Н. Милюкина. – Витебск : УО «ВГТУ», 2012. – 134 с.

ISBN 978–985–481–175–8

В курсе лекций рассмотрены важнейшие концепции современного естествознания: этапы развития естественнонаучной картины мира, современные представления о строении мира; эволюция представлений о пространстве, времени и материи; происхождение живой природы; синергетика и самоорганизация в различных системах. Изложенный материал способствует формированию целостного естественнонаучного мировоззрения, которое определяет практическую деятельность человека по взаимодействию с окружающим миром.

Курс лекций подготовлен в соответствии с учебной программой «Основы современного естествознания» и предназначен для студентов специальностей 1-26 02 02 «Менеджмент», 1-19 01 01 «Дизайн» дневной и заочной формы обучения. Может быть интересен и полезен интересующимся естественнонаучным познанием окружающего мира.

*Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ»,
протокол № 8 от 30 ноября 2011 г.*

УДК 5
ББК 2

ISBN 978–985–481–175–8

© Милюкина С.Н., 2012
© УО «ВГТУ», 2012

Содержание

Введение	4
Тема 1. Методы познания	
Естественнонаучное и гуманитарное знание. Подходы к познанию природы. Критерии научности. Динамика развития науки. Принцип соответствия.....	5
Тема 2. Краткая история развития естествознания и формирование механистической картины мира	
Античный период. Возрождение развития естествознания. Формирование механистической картины мира. Общая характеристика механистической картины мира.....	11
Тема 3. Структурные уровни организации различных форм материи	
Свойства и формы реализации материи. Концепция дискретности и непрерывности. Структурное строение материи. Движение как способ существования материи.....	17
Тема 4. Понятие энергии, законы сохранения	
Понятие энергии. Основы молекулярно-кинетической теории. Понятие температуры. Термодинамические законы.....	24
Тема 5. Пространство и время, физические взаимодействия	
Эволюция понятий пространства и времени. Взаимосвязь массы и энергии. Фундаментальные взаимодействия. Концепция близкодействия и дальнодействия. Создание единой теории фундаментальных взаимодействий. Фундаментальные постоянные. Антропный принцип. Связь законов сохранения и принципов симметрии.....	31
Тема 6. Электромагнитная картина мира	
Колебания и волны. Общие свойства волн. Звуковые волны. Световые волны. Спектр.....	43
Тема 7. Квантово-полевая картина мира, микромир	
Тепловое излучение. Корпускулярные свойства света. Строение атома. Корпускулярно-волновой дуализм. Принцип неопределённости. Элементарные частицы. Строение атомного ядра.....	58
Тема 8. Макромир	
Представление о строении молекул. Химические связи. Строение вещества в разных агрегатных состояниях. Развитие представлений о строении вещества. Общность и отличие живой и неживой материи. Структура и функции макромолекул белков, ДНК и РНК. Строение и функции клетки. Уровни организации живой материи.....	76
Тема 9. Мегамир	
Измерение расстояний. Звезды, их характеристики и эволюция. Галактики, их формы и строение. Эволюция Вселенной. Солнечная система. Земля.	100
Тема 10. Эволюция живой природы, синергетика	
Концепции происхождения жизни. Эволюция живой природы. Доказательства эволюции. Эволюционно-синергетическая парадигма. Основные понятия и принципы.....	118
Контрольные вопросы.....	136
Литература	145

Введение

Актуальность курса «Основы современного естествознания» созвучна потребностям в целостном взгляде на окружающий мир. Целостное отражение единства мира — это результат синтеза данных естественных наук: физики, астрономии, химии, биологии и др. Этот курс призван способствовать всестороннему развитию личности. Поэтому в программу введены важнейшие концепции современного естествознания: представления о пространстве, времени и материи; законы сохранения в мире; происхождение и эволюция Вселенной, жизни и человека; биосфера и экология; специфика самоорганизации, системных методов исследования и др.

Курс построен без традиционного деления на отдельные дисциплины и направлен на создание единой картины мира, которая включает терминологию, язык, сложившиеся понятия и современные достижения

В основе современного естествознания лежит убеждение в рациональном (законообразном) устройстве Вселенной. Изучивший курс должен четко представлять подлинное единство и целостность природы, то единое основание, на котором построено бесчисленное разнообразие предметов и явлений окружающего нас мира и из которого вытекают основные законы, связывающие микро-, макро- и мегамиры, Землю и Космос, физические и химические явления между собой и с жизнью и разумом.

"Без веры во внутреннюю гармонию нашего мира, — подчеркивал А. Эйнштейн, — не могло бы быть никакой науки".

Для студента-гуманитария особенно принципиально осознание проблем общественной жизни в их связи с основными концепциями и законами естествознания. При этом ключевые этапы развития естествознания показывают, каким образом протекал диалог науки и общества в разные исторические периоды, демонстрируя преемственность и непрерывность в изучении природы.

Концепциями современного естествознания являются основные закономерности рациональных связей окружающего мира, полученные естественными науками за последнее столетие.

Тема 1. Методы познания

Естественнонаучное и гуманитарное знание

Традиционно принято разделять всю имеющуюся научную информацию на два больших раздела:

- 1) естественнонаучную — знания об окружающей природе,
- 2) гуманитарную — знания о духовной жизни людей и обществе (от лат. *humanitas* — человеческая природа).

Различия между естественнонаучными и гуманитарными знаниями заключаются в том, что естественнонаучные знания основаны на разделении субъекта (человека) и объекта (природы, которую познает человек-субъект), а гуманитарные имеют отношение прежде всего к самому субъекту. В природе действуют объективные, стихийные и независимые от человека процессы, а в обществе ничего не совершается без сознательных целей, интересов и мотивации.

Согласно теории “двух культур” Ч. Сноу разрыв гуманитарного и естественнонаучного знания является чертой Нового времени. Существование “двух культур” иногда пытаются объяснить дефектами системы образования, которые, как кажется некоторым, легко исправить: достаточно дать студентам-гуманитариям какие-то (неизбежно поверхностные) знания о достижениях естественных наук. Однако корни дихотомии лежат глубже.

Естественные науки имеют дело с Природой в целом и с человеком, как природным телом. Гуманитарные дисциплины — с духовным миром человека. Различные по существу объекты требуют разных подходов: наука — мышление в понятиях, искусство — мышление в образах.

Дискуссия по проблеме взаимодействия науки и искусства в условиях современной научно-технической революции началась в 1959 г., после того как английский писатель, физик по образованию, Чарльз Сноу выступил в Кембридже (США) с лекцией “Две культуры и научная революция”.

Сноу выдвинул концепцию “двух культур”, доказывая, что духовный мир и практическая деятельность западной интеллигенции все явственнее поляризуются, раскалываясь на две противоположные части: на одном полюсе — художественная интеллигенция, на другом — ученые. Художественная интеллигенция считает, что ученые не представляют себе реальной жизни и им свойствен поверхностный оптимизм, тогда как ученые склонны считать, что у художественной интеллигенции нет дара провидения, что она проявляет странное равнодушие к участи человечества, ей чуждо все, что имеет отношение к разуму, и т. п. Сноу остро поставил многие болезненные вопросы и привлек к ним общественное внимание.

Однако различия между “точными” и “гуманитарными” науками — это иллюзия, так как по сути своей мир един. Для того, чтобы понять многие аспекты гуманитарных наук, нужны определенные естественнонаучные познания и наоборот. Глубокая общность науки и искусства определяется также и тем, что и то и другое есть и познание, и творчество. Стремление к познанию и творчеству запрограммировано в человеке генетически, оно является результатом необратимого эволюционного развития Вселенной в целом.

У человека имеются способности и к научному, и к художественному творчеству, но зачастую они проявляются неодинаково. На биологическом уровне это объясняется тем, что каждое полушарие нашего мозга воспринимает мир по своему: правое — в образно-эмоциональном виде, а левое — в рационально-логическом, и у разных людей деятельность полушарий мозга проявляется по-разному. При всём единстве и взаимодействии познавательной, рациональной и художественной, эмоционально-образной деятельности они редко достигают того “слияния”, к которому необходимо стремиться при воспитании гармонично развитой личности.

Эти различия обусловлены не только разными целями, предметами и объектами данных направлений познавательной деятельности, но и двумя основными способами процесса мышления, имеющими физиологическую природу. Сегодня достоверно известно, что мозг человека функционально асимметричен: правое его полушарие связано с образным интуитивным типом мышления, а левое — с логическим. Преобладание того или иного типа мышления определяет склонность человека к рациональному или художественному типу восприятия мира.

Подходы к познанию природы

Культура (от лат.: возделывание, воспитание, образование, развитие) — способ взаимодействия человека с окружающей средой. Вся совокупность практических проявлений культуры подразделяется на материальные и духовные ценности. Материальные ценности образуют материальную культуру, а мир духовных ценностей, включающий в себя науку, искусство, религию, формирует мир духовной культуры.

Наука и искусство имеют различные средства, задачи и цели. Принято считать, что наука способствует пониманию окружающего нас мира, искусство же стремится понять и выразить отношение человека и к окружающему миру, и к тому, как этот мир трактует наука, и, наконец, к тому, как отражает само искусство и человека, и науку, и весь окружающий мир.

В этом здании наука призвана служить постижению Истины, а искусство — воспевать, отвоевывать и создавать Красоту.

Достаточно вспомнить, что Истина красива, а Красота истинна, чтобы понять: все достижения человеческой культуры смыкаются в неразрывный круг. (Е.Седов).

Наука — это сфера человеческой деятельности, представляющая собой рациональный способ познания мира, в которой вырабатываются и теоретически систематизируются знания о действительности, основанные на эмпирической проверке и математическом доказательстве.

Существует определенная внутренняя структура и классификация современных наук (рис. 1).



Рисунок 1 – Классификация наук

Задачей фундаментальных наук является познание законов, управляющих взаимодействием базисных структур природы. Фундаментальные научные исследования определяют перспективы развития науки. Непосредственной целью прикладных наук является применение результатов фундаментальных наук для решения не только познавательных, но и социально-практических проблем.

Естествознание — это совокупность наук о природе, которые изучают мир в его естественном состоянии. Целью естествознания является познание законов природы и поиск путей их разумного практического использования. Предметом естествознания являются факты, закономерности, рациональные связи природных явлений, которые воспринимаются нашими органами чувств.

По методу изучения явлений природы естествознание может быть подразделено на эмпирическое и теоретическое. Отправной точкой любого из этих направлений научного исследования является получение научного, эмпирического факта.

Главным в *эмпирическом* направлении исследования в некоторых областях естествознания является *наблюдение* — это длительное, целенаправленное и планомерное восприятие предметов и явлений объективного мира. *Эксперимент* — это научно поставленный опыт, с помощью которого объект или воспроизводится искусственно, или ставится в точно учитываемые условия. Отличительной особенностью научного эксперимента является то, что его способен воспроизвести каждый исследователь в любое время. На основании эмпирических исследований делаются *эмпирические обобщения*, т. е. находятся аналогии в различиях.

На *теоретическом* уровне познания помимо эмпирических фактов требуются понятия, которые создаются заново или берутся из других разделов науки.

Понятие — есть мысль, отражающая предметы и явления в их общих, существенных чертах и свойствах сокращенно, концентрированно

(например, материя, движение, масса, энергия, растение, человек и др.).

Гипотеза — это научное предположение о непосредственно

наблюдаемых или вообще неизвестных формах связи явлений. При выдвижении какой-либо гипотезы принимается во внимание

не только ее соответствие эмпирическим данным, но и методологические принципы, получившие название критериев простоты, красоты, экономии мышления и т. п. Если гипотеза выдерживает эмпирическую проверку, то она приобретает статус закона природы, если нет — считается отвергнутой.

Закон — внутренняя причинная, устойчивая связь между явлениями и свойствами различных объектов, отражающая отношения между объектами. Например, периодический закон Д.И. Менделеева устанавливает связь между зарядом атомного ядра и химическими свойствами данного химического элемента. Совокупность нескольких законов, относящихся к одной области познания, называется *научной теорией*.

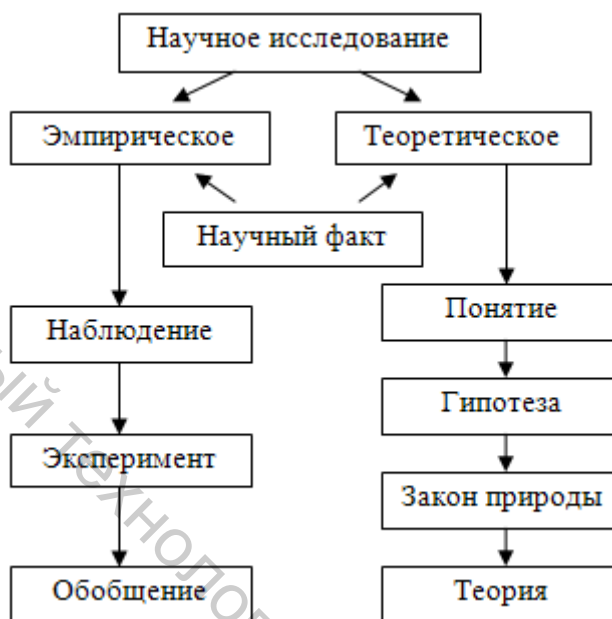


Рисунок 2 – Структура естественно-научного познания

Основные положения естественнонаучного познания:

- 1) в основе естественнонаучного познания лежит причинно-следственная связь, что означает связь между отдельными состояниями видов и форм материи в процессе её движения и развития;
- 2) истинность естественнонаучных знаний подтверждается экспериментом, опытом;
- 3) любое естественнонаучное знание относительно, т. е. необходимо определение границ соответствия, интервала адекватности.

Критерии научности

Довольно часто заслуженный авторитет науки используется для придания большего веса откровениям всякого рода пророков, астрологов, исследователей следов внеземных пришельцев и т. п. Внешняя наукообразная форма и использование полунаучной терминологии создают впечатление причастности к достижениям большой науки и еще не познанным тайнам Вселенной. Для разграничения псевдонаучных идей от собственно науки сформулировано несколько принципов.

Принцип верификации — научные положения должны допускать эмпирическую проверку.

Принцип фальсификации — научные положения должны быть опровергаемыми на практике.

К. Поппер, предложивший этот принцип, обратил внимание на значительную асимметрию процедур подтверждения и опровержения в познании: никакое количество падающих яблок не является достаточным для окончательного подтверждения истинности закона всемирного тяготения, однако достаточно всего лишь одного яблока, полетевшего прочь от Земли, чтобы этот закон признать ложным. Поэтому именно попытки фальсифицировать, т. е. опровергнуть теорию, должны быть наиболее эффективны в плане подтверждения ее истинности и научности.

Рациональное мышление — признание существования закономерных, доступных разуму причинных связей в природе и доказательства как главного средства обоснованности знания.

Характерные черты научного знания: универсальность, непротиворечивость, простота, объяснительный потенциал, наличие предсказательной силы.

Динамика развития науки

Существует множество моделей развития научного знания, однако наиболее известной является *парадигмальная концепция* Томаса Куна, предложенная в 60-х гг. XX века. Он ввёл принципиально новое понятие — парадигма (от греч. *paradigma* — пример, образец) — определённый набор предписаний, задающих характер видения мира. Парадигма определяет дух и стиль научных исследований.

Теория остается принятой научным обществом до тех пор, пока не подвергается сомнению основная парадигма научного исследования в данной области.

Старая парадигма проходит нормальную стадию развития, затем в ней накапливаются научные факты, не объяснимые этой парадигмой, происходит революция в науке и возникает новая парадигма, объясняющая все возникшие научные факты.

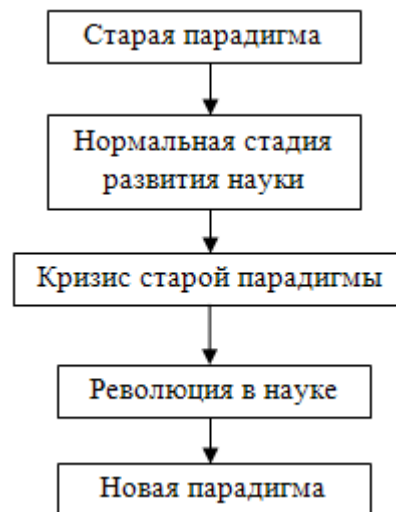


Рисунок 3 – Динамика развития науки

Принцип соответствия

Согласно Н. Бору сформулированный им принцип соответствия утверждает, что теории, справедливость которых экспериментально установлена для той или иной области естествознания, с появлением новых, более общих теорий не устраняются как нечто ложное, но сохраняют свое значение для прежней области явлений как предельная форма и частичный случай новых теорий. Т. е. развитие естествознания происходит, когда новое не просто отрицает старое, а отрицает с удержанием всего положительного, что было накоплено в старом.

С этой точки зрения процесс познания понимается как процесс движения к абсолютной истине через бесконечную последовательность относительных истин. Причем процесс движения к абсолютной истине происходит не плавно, не путем простого накопления фактов, а диалектически — через революционные скачки, при которых всякий раз преодолевается противоречие между накопившимися фактами и господствующей в данное время парадигмой.

Тема 2. Краткая история развития естествознания и формирование механистической картины мира

В целом ход развития естествознания — это путь от созерцания природы (античный период) через аналитическое расчленение (XV – XVIII вв.), когда был получен метафизический взгляд на природу, к синтетическому воссозданию картины природы в ее всесторонности, целостности и конкретности (XIX – XX вв.).

Античный период

Считается, что науки, составляющие естествознание, зародились в Древней Греции. Предшествующий этому период в развитии культуры можно назвать мифологическим. Древние философские системы носили крайне наивный характер. Индийцы, халдеи, египтяне до науки о природе дойти не сумели. Религиозно-мистические воззрения не могли породить идею о естественной закономерности явлений. Значительно глубже и последовательней осмысливали мир философы античной Греции. Вот почему древняя физика является почти целиком физикой греков.

Наука зародилась тогда, когда люди, осмысливая и систематизируя накопленный опыт, стали искать объяснения природы в ней самой.

В основе учения *ионийской школы* лежит единое первоначальное вещество, которое превращается во все другие вещества и порождает весь видимый мир – *очевидна связь с современными представлениями о едином поле*. Одни греческие учёные считали, что это вещество – вода, другие – воздух и т. д.

Гераклит из Эфеса (540, 530 – 470 до н. э.), представитель ионийской школы, высказал идею непрерывного изменения – *Panta rei – всё течет*:

“Никто не входил дважды в один и тот же поток, ибо воды его, постоянно текущие, меняются... Текут наши тела, как ручьи, и материя вечно возобновляется в них, как вода в потоке. И никто не был дважды в одной и той же реке. Ибо через миг и река не та, и сам он уже не тот”.

Пифагорейцев (Пифагор Самосский – 582 – 500 до н. э.) интересовало, главным образом, не первоначальное вещество, а распределение вещей в природе, их число и мера. Пифагорейцы первые выдвинули идею о шарообразности Земли, основываясь на требованиях геометрической гармонии: Земле придали наиболее совершенную форму.

Анаксагор (500 – 428 гг. до н. э.) выдвинул учение о неразрушимых элементах. Он не признает превращения вещества при видоизменении предметов, считая, что такое видоизменение происходит

от соединения и разъединения мельчайших, невидимых глазу частиц материи. Обычно книги по атомной физике начинаются с упоминания об атомах Демокрита, но это лишь развитие идеи Анаксагора. Более того, он на много веков предвосхитил закон сохранения массы, лежащий в фундаменте современного естествознания:

“Греки ошибочно полагают, будто что-либо начинается или прекращается; но все сводится к сочетанию или разъединению вещей, существовавших от века. Вернее было бы признать возникновение сочетанием, а прекращение разъединением”.

Левкипп (около 500 г. до н. э.) создал атомистическую теорию мира, которая впоследствии была развита и закончена Демокритом (род. ок. 470 г. до н. э.). Вселенная Демокрита – Левкиппа состоит из пустого пространства и бесконечного множества неделимых мельчайших частиц — атомов, отличающихся не качественно (как у Анаксагора), а лишь по своему очертанию, положению и распределению. Тела возникают и исчезают только за счет сочетания и разъединения атомов, так из ничего не может произойти ничего и ничто существующее не может исчезнуть. Движение атомов обусловлено не влиянием внешней силы, а силой, присущей самим атомам.

Если Демокрит был убежден в дискретности материи, то Аристотель (384 – 322 до н. э.) проповедовал обратное — ее непрерывность. Этот великий спор прошел сквозь всю историю естествознания и не закончился до сих пор.

Под природой Аристотель понимал совокупность физических тел, состоящих из вещества и находящихся в состоянии непрерывного движения или изменения. Совершенно и вечно лишь круговое движение, непосредственной причиной которого является пятое начало — эфир, из которого состоит небо. Идея эфира надолго сохранится в физике. Она будет совершенствоваться, видоизменяться, но суть ее останется прежней — неизменной и неосязаемой, как сам эфир.

Одним из основных методов познания по Аристотелю является индукция: от фактов, добытых опытом, к некоторым общим определениям и понятиям, при помощи которых можно будет объяснять факты. Общие принципы бытия: материя, форма, движущая причина и цель. В материи дана лишь возможность реального мира, в форме — осуществление этой возможности путем движений и изменений, идущих к определенной цели.

Аристотель пытался создать целостную картину природы, вскрыть общее единство мира. Его учение представляло собой законченную, внутренне замкнутую систему, которая нелегко поддавалась дальнейшему развитию. Да и авторитет Аристотеля был настолько велик, что мало кто решался на переоценку его учения, которым заканчивается творческий период греческой натурфилософии.

Отдельно следует упомянуть *идеи эволюционизма*, сформулированные в античности и составляющие основу современной теории эволюции:

- возникновение жизни — это естественный процесс, результат природных сил, а не "акта творения" внешних сил;
- мысль об изменении живых существ в результате борьбы противоположностей и выживании удачных вариантов;
- идея ступенчатого усложнения организации живой природы;
- представление о целостности организма и об эмбриогенезе как процессе новообразования;
- принципы классификации животных на основе сравнения по их строению.

Автором *первой гелиоцентрической системы* мира является Аристарх Самосский (320 – 250 до н. э.) — Земля вращается вокруг неподвижного Солнца. На возражение, что при таком вращении неподвижные звезды должны были бы изменять свое видимое положение, он указывал на громадное расстояние между Солнцем и звездами. Кроме того, Аристарх разработал научный метод определения расстояний до Солнца и Луны и их размеров, допускал суточное вращение Земли. Но гелиоцентрическая система не имела еще достаточных основ и была явно преждевременной. Геоцентризм настолько всех устраивал, что лучшие астрономы того времени не поддерживали Аристарха, и его учение было основательно забыто.

Клавдием Птолемеем (II в. н. э.) заканчивается античный период истории естествознания. В его труде "Альмагест" или "Великое построение" содержится обобщение всех достижений древней астрономии и разработанный им метод, пользуясь которым можно было рассчитать положение планет на любой заданный момент времени. Это сочинение дает стройную теорию планетных движений, но исходит из неверного принципа неподвижности Земли в центре мира. Авторитет его был признан единодушно и держался до XVII в. Греки, римляне, арабы и христиане одинаково чтили его. Не один еретик сгорел на костре за посягательство на его труд. Несколько столетий католическая церковь отстаивала учение Птолемея всеми принятыми на вооружение средствами, заморозив развитие.

Возрождение развития естествознания

Отличительной чертой следующего этапа развития естествознания является признание основополагающей роли опыта как самого ценного источника знаний о природе — *Фрэнсис Бэкон* (1561 – 1626). *Опыт, опыт и еще раз опыт* — это звучало как заклинание мрачных теней средневековья.

Рене Декарт (1596 – 1650) ключом к истинному знанию считал разум, умело нацеленный на исследование опять-таки данных опыта.

Барух Спиноза (1632 – 1677) провозгласил принцип “*natur causa sui*” — природа есть “причина самой себя”. Он считал, что природа — это вечная субстанция в бесконечном пространстве — она сама есть бог. Это важнейшее свойство субстанции — самой быть причиной существования и сущности всех вещей — встречается в одной из самых интересных гипотез двадцатого века — нелинейной теории поля Гейзенберга.

Естествознание пошло именно по этому пути. Самые фундаментальные представления о строении материи и свойствах времени и пространства базируются на принципе “*natur causa sui*”.

Формирование механистической картины мира

Одним из самых важных моментов в становлении современной науки является установление законов движения планет — законов Кеплера. Его предшественник, Николай Коперник блестяще завершил работу по созданию гелиоцентрической модели солнечной системы, начатую еще греками (Аристарх Самосский), в основе которой следующие утверждения:

1. В центре мира находится Солнце.
2. Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца в одном направлении и вращаются вокруг одного из своих диаметров.
3. Движение планет равномерное и происходит по круговым орбитам.

Учение Коперника произвело настоящую революцию во всем человеческом мировоззрении, т. к. он стер грань между “земным” и “небесным”.

Галилео Галилей впервые использовал подзорную трубу собственной конструкции для астрономических наблюдений. Он обнаружил фазы Венеры, наличие пятен на Солнце, открыл спутники Юпитера, горы на Луне, т. е. установил, что Луна имеет вполне “земную” природу — эти открытия имели огромное мировоззренческое значение, подтверждающее материальное единство мира. Таким образом, была поколеблена идея, идущая еще от Аристотеля, о принципиальном различии между “совершенными” небесными телами и несовершенными земными. Рассматривая движение свободного падения тел, Галилей первым ввел понятие инерции и сформулировал принцип относительности: во всех инерциальных системах отсчёта все физические явления протекают одинаково.

Иоганн Кеплер совершил следующий шаг — открыл эллиптическую форму орбит и законы, по которым планеты движутся вокруг Солнца. Наиболее важным для понимания общего устройства Солнечной системы был первый закон, утверждавший, что планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, а Солнце находится в фокусе одного из этих эллипсов. Второй закон гласит, что

каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причём за равные времена радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, заметает сектора равной площади.

Третий закон описывает динамику движения планет: квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся, как кубы больших полуосей орбит планет.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Но Кеплера не удовлетворяли открытые им законы, он хотел найти причину движения планет. Размышляя, он пришёл к выводу, что этим движением управляет Солнце, и впервые выдвинул идею дальнего действия.

Создание новой картины мира, основанной на уравнениях механики, завершил **Исаак Ньютон** (“Математические начала натуральной философии”, 1687 г.). Он открыл закон всемирного тяготения и сформулировал три основных закона механики, создал теорию движения небесных тел и теорию цветов. На памятнике Ньютона (1643–1727) в Кембридже выбиты слова: “Разумом он превосходил род человеческий”.

Учение Ньютона о массе и силе положило конец метафизике. Он разработал научные основы мироздания, именно поэтому его считают **“отцом физики”**.

Понятие массы — гениальный вклад Ньютона в построение основ современной физики. Все материальные тела обладают собственной массой. Материальные частички наделены силами притяжения и отталкивания, присущими всем видимым телам во Вселенной.

Понятие импульса — произведение массы тела на его скорость

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}.$$

Максимально используя работы предшественников, особенно детальные эксперименты и рассуждения Галилея, Ньютон полностью описал динамику движущихся тел.

Первый закон: (инерции) если на тело не действуют никакие внешние силы, либо действие этих сил скомпенсировано, то тело либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

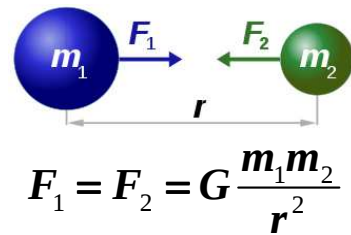
Второй закон: ускорение пропорционально результирующей силе, действующей на тело, и обратно пропорционально массе тела.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Третий закон: тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению.

$$\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$$

Закон всемирного тяготения: тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.



Открытие законов механики послужило основой для формирования механистической картины мира, согласно которой миром правят строгие однозначные законы, не допускающие никаких случайностей. Течение всех процессов определялось начальными условиями, а мир представлялся состоящим из вечных, неделимых частиц, движение которых всегда можно описать с помощью законов механики.

Детерминизм Лапласа: “Мы можем рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие ее прежних состояний и как причину для будущих. Разумное существо, которое могло бы знать в какой-то момент времени все действующие в природе силы, а также положения всех составных частей природы, смогло бы, при наличии достаточных аналитических способностей для оценки этих данных, охватить движение небесных тел и мельчайших атомов с помощью одной формулы. Ничто не укрылось бы от существа; прошедшее и будущее, в равной степени открытые, легли бы перед ним”.

Общая характеристика механистической картины мира

1. Жёсткий или однозначный (лапласовский) детерминизм, суть которого в признании точного и однозначного определения состояния механической системы ее предыдущим состоянием; объективный характер случайности отрицается.

2. Механический редукционизм: все наблюдаемые в природе превращения сводились к механике атомов и молекул — их перемещениям, столкновениям, сцеплениям, разъединениям; микромир аналогичен макромиру.

3. Отсутствие развития — мир в целом таков, каким он был всегда; все изменения в нём чисто количественные, а не качественные.

4. Мгновенность действия и дальнодействия: физические воздействия распространяются мгновенно, с бесконечно большой скоростью.

5. Абсолютность пространства и времени: пространство — пустоеместилище материи, время — чистая длительность процессов; они никак не связаны с движением тел.

Все эти принципы остаются справедливыми в области механических движений макротел, где скорости намного меньше скорости света.

Тема 3. Структурные уровни организации различных форм материи

Свойства и формы реализации материи

Материя (лат. *materia*) — все, из чего состоит окружающий мир, множество явлений, объектов и их систем, носитель всех разнообразных свойств, отношений, взаимодействий объектов и форм движения.

Все существующее в природе материально. Многообразные явления в мире представляют собой различные виды движения материи. *Движение* — это способ существования материи, любые изменения, происходящие с объектом с течением времени. *Информация* — это мера изменения материи, которая отражает состояние материи при ее движении.

Основные свойства материи: несотворимость и неуничтожимость, абсолютность и относительность, прерывность и непрерывность, конечность и бесконечность, активность, структурность, способность отражения и др.

Формы реализации материи: вещество, поле, физический вакуум.

Вещество — это физическое тело, представляющее собой единую систему материальных частиц, связанных между собой определенным образом и обладающих массой покоя. В зависимости от степени и способов взаимодействия этих частиц и связями между ними выделяют следующие агрегатные состояния вещества — это твердое, жидкое, газообразное, плазменное.

В 1927 г. английский физик Поль Дирак составил уравнение, которое описывало движение электрона с учетом законов квантовой механики и теории относительности, и получил формулу с двумя решениями: электрон с положительной энергией и электрон-двойник с отрицательной энергией. Частица и соответствующая ей античастица имеют одинаковые времена жизни, одинаковые массы, их электрические заряды равны, но противоположны по знаку. Античастицы могут собираться в антивещество, которое состоит из антиатомов, содержащих антипротоны, антинейтроны и позитроны. Частицы и их античастицы одинаково взаимодействуют с полем тяготения, что указывает на отсутствие "антигравитации". Антивещество является лидером среди всех известных веществ по плотности энергии и по дороговизне — 1 г антиводорода по оценкам 1999 г. стоил 62,5 триллиона долларов. При взаимодействии вещества и антивещества их масса превращается в энергию — такую реакцию называют **аннигиляцией**.

Несмотря на микроскопическую симметрию между частицами и античастицами, во Вселенной не обнаружены области со сколько-нибудь заметным содержанием антивещества. Ведется довольно много рассуждений на тему того, почему наблюдаемая часть Вселенной

состоит почти исключительно из вещества и существуют ли другие места, заполненные, наоборот, практически полностью антивеществом; но на сегодняшний день наблюдаемая асимметрия вещества и антивещества во Вселенной — одна из самых больших нерешенных задач физики. Предполагается, что столь сильная асимметрия возникла в первые доли секунды после Большого Взрыва.

Физическое поле — это специфическая форма распределения материи, характеризующая все точки пространства и времени и обладающая бесконечным числом степеней свободы, носитель всех видов взаимодействий, переносимых с конечной скоростью специфическими для каждого типа поля частицами — квантами поля: фотонами для электромагнитного, бозонами для слабого, гипотетическими гравитонами для гравитационного и т. д.

В зависимости от физического взаимодействия выделяют электромагнитное, гравитационное поле и поля сильного и слабого взаимодействия. В зависимости от математического описания характеристик поля выделяют скалярные, векторные, тензорные и спинорные поля.

Вещество и поле различаются по степени концентрации массы и энергии: очень большая — у частиц, и очень малая — у электромагнитного и гравитационного полей. В микромире это различие стирается — понятие частицы (вещество) и волны (поля) выступают как дополнительные характеристики, выражающие внутренне противоречивую сущность микрообъектов. Таким образом, можно считать, что материальная частица есть сконцентрированный и локализованный сгусток энергии.

Согласно современным представлениям универсальной формой материи, к которой могут быть сведены как вещества, так и классические поля, является **квантовое поле**. Квантовая теория поля даёт представление о физической неразложимости мира, о невозможности свести его к отдельным элементам — принцип целостности.

Физический вакуум — это состояние материи с наименьшей энергией квантового поля и отсутствием вещества. Обычных (реальных) частиц в пустом объеме нет, но квантовая теория предсказывает существование множества виртуальных частиц, которые способны при определенных условиях превращаться в реальные — согласно теории относительности энергия может переходить в массу. Т. о. вакуум в физике оказывается не пустым, а представляет собой море рождающихся и исчезающих виртуальных частиц — происходят так называемые нулевые колебания полей. Время жизни таких частиц чрезвычайно мало: для частиц с массой m_e оно составляет $\sim 10^{-21}$ с. Эта величина говорит не столько о “жизни”, сколько о кратковременном всплеске жизни этих частиц и связанных с ними полей.

На сверхмалых расстояниях свойства вакуума еще более загадочны: возникает связь квантовых эффектов с гравитационными. Сверхтяжелые виртуальные частицы создают вокруг себя заметное гравитационное поле, которое начинает искажать геометрию пространства. По всей вероятности, невозможность существования свободных кварков связана именно с колоссальными изменениями, которые одиночный кварк вызывает в вакууме.

Концепция дискретности и непрерывности

Учения о строении материи возникли ещё в античности — обсуждались две противоположные гипотезы:

- непрерывность вещества — нет предела делимости (Аристотель);
- дискретность вещества — атомизм Левкиппа-Демокрита, согласно которому материя состоит из атомов, которые есть предел ее физической делимости.

На самом деле атомы не являются мельчайшими частицами, они имеют сложную структуру и состоят из ядер и электронов, ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые, в свою очередь, состоят из кварков, т. е. вещество всё же имеет дискретное строение. Более того, в настоящее время принято считать, что не только вещество, но и другие виды материи — физические поля и физический вакуум — имеют дискретную структуру.

Однако обычно вещество воспринимается как непрерывная, сплошная среда, и для анализа и описания его свойств в большинстве случаев используется только его непрерывность. Физические поля при решении многих физических задач также принято считать непрерывными. Но при описании процессов микромира всё же необходимо учитывать дискретность материи. Таким образом, непрерывность и дискретность являются неотъемлемыми свойствами всех видов материи, т. к. при рассмотрении процессов на разных структурных уровнях необходимо принимать во внимание то непрерывные, то дискретные свойства материи.

Структурное строение материи

Важнейшее свойство материи — её структурная и системная организация, которая выражает упорядоченность существования материи в виде объектов различных масштабов и уровней, связанных между собой. В понятие системы входит совокупность элементов и связей между ними. Под элементом системы понимается компонент, который внутри данной системы рассматривается как неделимый; под структурной организацией материи — её иерархическое строение — любой объект от микрочастиц до организмов, планет и галактик является частью более сложного образования и сам может считаться

такowym, т. е. состоящим из неких составных частей. Доступная для наблюдения часть мира простирается в пространстве от 10^{-17} до 10^{26} м, а во времени — до $2 \cdot 10^{10}$ лет.

Непосредственно наблюдаемые нами тела состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из ядер и электронов, атомные ядра — из нуклонов, нуклоны — из кварков. На данный момент принято считать, что электроны и кварки не содержат более мелких частиц. С биологической точки зрения самая крупная живая система — биосфера — состоит из биоценозов, содержащих популяции живых организмов различных видов; популяции, в свою очередь, образованы отдельными особями, живой организм которых состоит из клеток со сложной структурой, включающих ядро, мембрану и другие составные части.

Материальные объекты образуют целостную систему лишь в том случае, если энергия связи между ними больше кинетической энергии каждого из них. Энергия связи — это энергия, которую необходимо затратить, чтобы полностью «расташить» систему на отдельные составляющие. Величина энергии связи природных систем на различных уровнях организации материи зависит от вида взаимодействия и характера сил, объединяющих материальные объекты в систему. Например, существование в течение миллиардов лет звёзд обуславливается устойчивым равновесием между энергией взаимного гравитационного притяжения частиц, стремящегося сжать вещество звезды, и энергией их теплового движения, приводящего к его рассеиванию; объединяющую роль в атомах и молекулах играет электромагнитное взаимодействие и др.

В современном естествознании множество материальных систем принято условно делить на микромир, макромир и мегамир.

Микромир — это мир очень малых объектов, размеры которых менее 10^{-10} м. К микромиру относятся молекулы, атомы и элементарные частицы, которые подчиняются законам квантовой механики, квантовой электродинамики, квантовой хромодинамики.

Макромир — это мир объектов, размеры которых находятся в пределах от 10^{-6} м до 10^3 м. К макромиру относятся макротела (твёрдые тела, жидкости, газы, плазма), индивид, вид, популяция, сообщество, биосфера. Поведение макроскопических тел, состоящих из микрочастиц, описывается классической механикой Ньютона, термодинамикой, статистической физикой, классической электродинамикой Максвелла.

Мегамир — мир объектов космического масштаба: планеты, звезды, галактики, Метагалактика. В звездах сосредоточено 97 % вещества нашей Галактики — Млечный Путь. Мегамир описывается законами классической механики с поправками, которые были внесены теорией относительности.

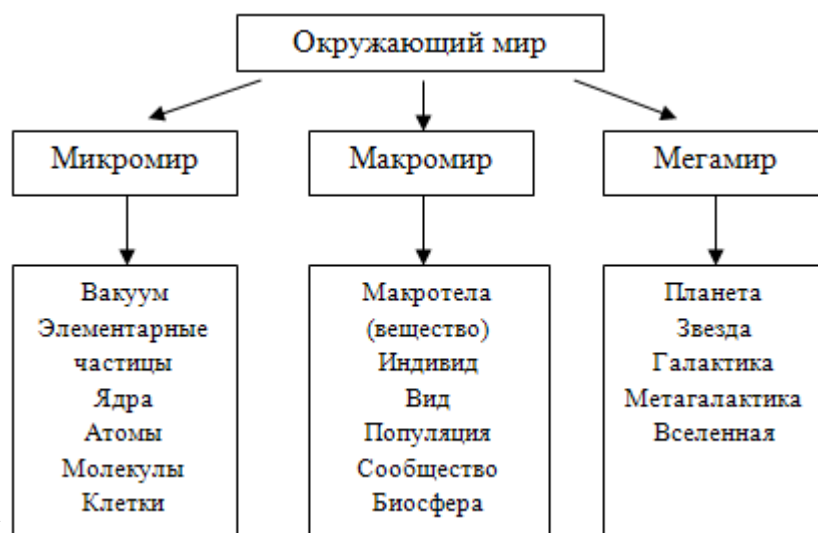


Рисунок 4 – Структурное строение мира

Материальные системы микро-, макро- и мегамира различаются между собой размерами, характером доминирующих процессов и законами, которым они подчиняются. При объяснении процессов в микромире используются квантовые теории, в макромире — классические теории.

Существенное различие между материальными объектами микро- и макромира заключается в тождественности микрочастиц и индивидуальности макросистем — в природе не существует двух совершенно одинаковых макросистем. Для микрочастиц выполняется **принцип тождественности**: состояния системы частиц, получающиеся друг из друга перестановкой частиц местами, нельзя различить ни в каком эксперименте — они рассматриваются как одно физическое состояние. Этот квантово-механический принцип характеризует одно из основных различий между классической и квантовой механикой. В классической механике можно проследить за движением отдельных частиц по траекториям и таким образом отличить частицы одну от другой. В квантовой механике тождественные частицы полностью лишены индивидуальности.

Важнейшая концепция современного естествознания заключается в материальном единстве всех систем микро-, макро- и мегамира, т. е. единой материальной основе происхождения всех объектов. Атомы везде одинаковы — на Земле и в космическом пространстве. Фундаментальные физические законы универсальны, а, значит, применимы к объектам всего мира, доступного нашему наблюдению. Так, с помощью законов сохранения энергии и импульса можно описать не только движение тел на Земле, но и взаимодействие элементарных частиц, и движение планет, звёзд и т. д. Универсальность фундаментальных законов подтверждается экспериментальными результатами многочисленных исследований различных свойств

материальных объектов микро-, макро- и мегамира и свидетельствует о материальном единстве природы и Вселенной в целом.

Движение как способ существования материи

Вся материя в мире находится в состоянии непрерывного движения в многообразных формах и разновидностях. В вакууме происходит движение виртуальных частиц; в ядрах протоны и нейтроны вращаются вокруг своих осей; в атомах электроны вращаются вокруг своих осей и вокруг ядер; в кристаллах атомы и молекулы совершают колебания вблизи положений равновесий; в жидкостях к колебательным движениям атомов и молекул добавляется их поступательное движение; в газах происходит непрерывное, беспорядочное, хаотическое движение молекул и атомов. Макроскопические тела также находятся в состоянии непрерывного движения: Земля вращается вокруг своей оси со скоростью 0,5 км/с на экваторе; вокруг Солнца со скоростью 30 км/с; вместе с Солнечной системой вокруг ядра нашей Галактики со скоростью 240 км/с; вместе с нашей Галактикой Земля участвует в движении расширяющейся Метагалактики с огромной скоростью порядка 1000 км/с.

Все эти движения происходят в инерциальных системах отсчета, каждая из которых имеет свою определенную скорость, которая передается любому материальному телу данной системы независимо от движения этих тел относительно нее. Причём эти инерциальные системы неразрывно связаны, образуя структурную "лестницу". Реальное движение тел, находящихся на разных уровнях структур движения, является сложным относительным движением, т. к. любое материальное тело обладает всеми скоростями предыдущих уровней движения. Так, общая скорость движения Земли складывается из скорости вращения вокруг оси, обращения вокруг Солнца, движения Солнечной системы и движения нашей Галактики.

Итак, движение есть способ существования материи, это любое изменение, превращение или переход материи из одного состояния в другое. Движение характеризуется следующими свойствами: объективность, универсальность, несотворимость и неуничтожимость, относительность и абсолютность, прерывность и непрерывность и т. д. Т. е. как и материя, обладает внутренней противоречивостью, которая проявляется в виде единства противоположностей.

Правомерно говорить о двух основных типах движения:

- с сохранением качественного состояния объекта;
- с изменением качественного состояния, т. е. развитие объекта.

Развитие может осуществляться в рамках соответствующего вида материи — эволюция звёзд, формирование новых видов живых организмов и т. д. А может осуществляться в виде переходов от одного

уровня материи к другому — формирование из элементарных частиц атомов и молекул, переход от неорганической природы к биологическим уровням организации.

Соответственно иерархии структур материи существуют качественно разнообразные формы ее движения: взаимопревращения элементарных частиц и полей, ядерные превращения, внутриатомные процессы, химические превращения, молекулярные процессы, геологическая форма движения, органическая жизнь, общественная жизнь, различные космические процессы и т. д.

Особое место в современных классификациях занимают так называемые общие формы движения: механическая, физическая, химическая, биологическая и социальная, — реализующиеся на различных структурных уровнях материи и представляющие собой общие способы существования материи. Мерой различных форм движения и взаимодействия материи является **энергия**.

Тема 4. Понятие энергии, законы сохранения

Понятие энергии

Понятие энергии позволило рассматривать все явления природы и процессы с единой точки зрения, объединить все явления. Закон сохранения и превращения энергии — один из всеобщих законов, справедливых для живой и неживой природы.

Открытие законов сохранения в природе началось с установления М.В. Ломоносовым и А.Л. Лавуазье закона сохранения массы вещества в химических процессах: сумма масс исходных веществ равна сумме масс продуктов химической реакции. Гельмгольц сформулировал закон сохранения и превращения механической энергии: приращение кинетической энергии тела равно убыли его потенциальной энергии — и связал его с принципом невозможности создания вечного двигателя. Джоуль экспериментировал с проводниками электрического тока и открыл закон, по которому количество теплоты, выделенной током, пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению — закон превращения электрической энергии в тепловую (Джоуля-Ленца). И, наконец, в книге «Органическое движение в связи с обменом веществ» (1845 г.) Р. Майер последовательно и систематично изложил учение о сохранении и превращении энергии, в котором рассматривал различные виды энергии: кинетическую, потенциальную, их сумму — механическую энергию, а также тепловую, электрическую, химическую энергии. Он считал, что все эти виды энергии могут взаимопревращаться при условии неизменности общего количества энергии.

Полная энергия тела E складывается из кинетической энергии движения тела как целого, $E = E_k + E_p + U$ из его потенциальной энергии во внешнем поле сил и внутренней энергии.

Первые две составляющие полной энергии тела являются разновидностями механической энергии. Кинетическая энергия E_k — мера механического движения тела, измеряемая той работой, которую может совершить тело при его торможении до полной остановки. Потенциальная энергия E_p определяется как свойство системы материальных тел совершать работу при изменении положения или конфигурации тел в системе.

Итак, работа является мерой изменения энергии, а энергию можно рассматривать как способность тела совершать работу. Причем применительно к механическим процессам полная энергия замкнутой консервативной системы тел, равная сумме их потенциальной и кинетической энергии, остается величиной постоянной — выполняется закон сохранения механической энергии, а всякое изменение

потенциальной и кинетической энергии есть их взаимопревращение из одной в другую (рис. 5).

Важным является выполнение закона сохранения энергии именно в замкнутых системах. *Изолированная* система не может обмениваться с окружающей средой ни веществом, ни энергией. Если происходит обмен только энергией, систему называют *закрытой*, а если энергией и веществом, — *открытой*.

Внутренняя энергия — это кинетическая энергия теплового движения частиц тела и их взаимная потенциальная энергия, в которую включают и энергию колебательного движения атомов в молекулах, и внутриатомную энергию.

Величину внутренней энергии U можно увеличить двумя эквивалентными способами — совершая над телом механическую работу A или сообщая ему количество теплоты Q :

$$\Delta U = A + Q.$$

Теплота может передаваться от тела к телу, переходить в работу, возникать при трении, но при этом она не является сохраняющей величиной. Установление эквивалентности теплоты и работы как разных форм энергии позволило измерять их энергетическими единицами — в международной системе единиц СИ единицей работы и теплоты является джоуль.

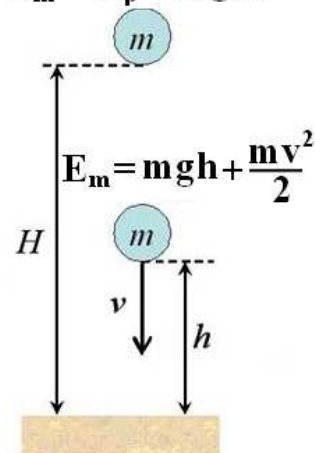
Основы молекулярно-кинетической теории

Для характеристики интенсивности движения частиц в твёрдых телах, жидкостях и газах используется температура, которую измеряют при помощи термометров. Первый термометр с чёткими показателями сделал гданьский стеклодув Г.Д. Фаренгейт:

0 °F — температура смеси воды, поваренной соли и льда,
32 °F — таяния льда,
212 °F — кипения воды,
96 °F — человеческого тела.

Эта шкала распространилась с 1714 г. и сейчас принята во многих странах, в том числе в США. В 1742 г. шведский астроном А. Цельсий предложил за 0° взять температуру кипения воды при нормальном давлении, а за

$$E_m = E_p = m g H$$



$$E_m = E_k + E_p = \text{const}$$

Рисунок 5 – Закон сохранения механической энергии

Шкала Кельвина	Шкала Цельсия	Шкала Фаренгейта
373 К	100 °C	212 °F
	37,7 °C	100 °F
273 К	0 °C	32 °F
	-17,7 °C	0 °F
	-51 °C	-60 °F
0 К	-273,15 °C	-459,4 °F

$$T (\text{K}) = t (^\circ\text{C}) + 273$$

Рисунок 6 – Сравнение температурных шкал

100° — температуру таяния льда. Позже шведский ботаник К. Линней переставил на шкале Цельсия точки 0 и 100, и появился бытовой термометр с этой шкалой.

Для идеального газа температура — есть мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул $E_{к.ср.} = (3/2) \cdot kT$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. В данном равенстве используется понятие абсолютной температуры (или термодинамической), введённой лордом Кельвином. При $T = 0$ К средняя кинетическая энергия равна нулю, т. е. при абсолютном нуле прекращается поступательное движение молекул.

Таким образом, для газов температура, введённая как степень нагретости, определяется скоростью беспорядочного движения молекул, но так как в любой момент времени разные молекулы имеют различные скорости, используют среднее значение.

Все процессы в макросистемах являются результатом совокупного действия огромного числа молекул, поэтому описываются усреднёнными кинетическими и динамическими параметрами, определяющими свойства макросистемы. Такое описание называется статистическим. К концу XIX в. была создана последовательная теория, описывающая свойства большой совокупности атомов и молекул — **молекулярно-кинетическая теория (МКТ)**, или статистическая механика, в основе которой лежат следующие положения:

- Любое тело — твёрдое, жидкое или газообразное — состоит из большого числа очень малых частиц — молекул, которые взаимодействуют друг с другом. Сила этого взаимодействия имеет электромагнитную природу и зависит от расстояния между молекулами.
- Молекулы любого вещества находятся в беспорядочном, хаотическом, не имеющем какого-либо преимущественного направления движении, интенсивность которого определяется их скоростью и характеризуется температурой вещества.
- Внутреннюю энергию тела составляет сумма кинетической энергии движения молекул, потенциальной энергии их взаимодействия и всех прочих энергий этой системы.

Размеры молекул газов малы по сравнению с расстояниями между ними и их слабым взаимодействием можно пренебречь, поэтому свойства реальных газов близки к свойствам идеального и описываются газовыми законами. Так, согласно закону Авогадро, количества любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковый объем, который при нормальных условиях равен 22,4 л. А уравнение Менделеева-Клапейрона описывает поведение газов: $PV = (m/\mu)RT$, где m — масса газа; μ — его молекулярная масса; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная.

Подобные универсальные законы для жидкостей или твёрдых тел отсутствуют, т. к. частицы, из которых они состоят, находятся на

близких расстояниях и взаимодействуют между собой с силами, меняющимися в очень широких пределах.

Термодинамические законы

Параллельно развивался и другой подход к описанию свойств макросистем — термодинамический, в котором не учитывается молекулярное строение тел и состояние системы описывается *параметрами состояния* — температурой T , давлением P и объёмом V . Между параметрами существует связь, выражаемая уравнением состояния, которая установлена из опыта и не получена теоретически. Так, для идеальных газов эта связь выражается уравнением Менделеева-Клапейрона, а для реальных — уравнением Ван-дер-Ваальса. Эти параметры также часто называют *функциями состояния* системы.

Система может находиться в равновесном и неравновесном состоянии. Если при отсутствии внешних воздействий параметры состояния постоянны неограниченное время, то состояние **равновесное**, если нет — неравновесное. Переход системы из одного состояния в другое через последовательность промежуточных состояний называется *процессом*. Все термодинамические процессы в отличие от механических являются необратимыми. Если привести в соприкосновение два тела с различной температурой, то более нагретое тело будет отдавать тепло менее нагретому. Обратный процесс — самопроизвольный переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому — никогда не произойдёт. Необратимы и все механические процессы, сопровождающиеся трением. Трение вызывает замедление движения тел, при котором кинетическая энергия переходит в тепло. Замедление эквивалентно приближению к состоянию равновесия, при котором движение тел отсутствует.

Термодинамика изучает превращения энергии во всех её формах и основывается на четырёх утверждениях, которые включили в себя огромный опыт человечества по превращению энергии, — **началах термодинамики**. Исторически первым установлено второе начало, потом — первое и третье, а последним — нулевое.

Нулевое начало термодинамики — равенство температур во всех точках есть условие термодинамического равновесия систем. Всякая предоставленная сама себе система стремится перейти в состояние термодинамического равновесия и, достигнув его, сама по себе из него не выходит.

Первое начало термодинамики — количество теплоты Q , сообщённое системе, идёт на увеличение её внутренней энергии U и на совершение системой работы A , т. е. $Q = U + A$. Это закон сохранения и превращения энергии для термодинамических процессов. Отсюда следует невозможность вечного двигателя первого рода, который совершал бы работу «из ничего», без внешнего источника энергии.

Причём при наличии внешнего источника часть энергии неизбежно переходит в тепловую, что является причиной невозможности полного превращения энергии внешнего источника в полезную работу.

Второе начало термодинамики — теплота не может самопроизвольно переходить от менее нагретого тела к более нагретому телу — так выглядит его первоначальная формулировка. В 1865 г. Р. Клаузиус ввёл понятие энтропии (от греч. entropia — поворот, превращение) как функции состояния системы, характеризующей меру хаоса, которая для всех естественных процессов возрастает. И с учётом нового понятия второе начало термодинамики формулируется как **закон возрастания энтропии**: в замкнутой системе энтропия S возрастает и максимально возможное её значение достигается в тепловом равновесии.

Закон возрастания энтропии устанавливает направленность термодинамических процессов — энергия превращается из одной формы в другую так, чтобы энтропия возрастала. Направление потока превращения энергии во Вселенной задается главным образом гравитацией, преобладающей в космосе количественно и имеющей почти нулевую энтропию. Энергию и энтропию называли «царица мира и ее тень». Все виды энергии классифицируют в порядке возрастания «ценности»: высший класс у тех, которые способны превращаться в большее число форм энергий — им присущи минимальные хаос и энтропия; средний класс — у химической энергии; а низший — у тепловой. Самопроизвольные превращения энергии с ее деградацией и ростом энтропии — это преобразования от высших форм к низшим. Отсюда следует закон о невозможности вечного двигателя второго рода — за счёт энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии, невозможно совершение никакой работы. Этот закон имеет вполне логичное объяснение — без внешнего вмешательства энергия не может повышать своё качество, т. е. невозможен самопроизвольный переход тепловой энергии в механическую, с которым связано понятие работы.

Количественной характеристикой теплового состояния системы является термодинамическая вероятность W , равная числу микроскопических способов, с помощью которых это состояние может быть достигнуто. Система, предоставленная самой себе, стремится перейти в состояние с большим значением W . Больцман установил связь между термодинамической вероятностью и энтропией системы: $S = k \cdot \ln W$, где k — постоянная Больцмана. Эта формула высечена на памятнике Больцману.

При обратимых процессах энтропия не изменяется, а при необратимых возрастает, что является следствием перехода системы от менее вероятного состояния к более вероятному — равновесному, т. е. всегда выполняется соотношение $\Delta S \geq 0$. Можно считать, что рост

энтропии в замкнутой системе есть мера необратимости какого-либо процесса в ней. С законом возрастания энтропии известный физик и астроном А. Эддингтон связал стрелу времени. Все необратимые процессы могут идти только в направлении вперед во времени, тогда как обратимые — в обе стороны, но почти все процессы являются необратимыми.

В середине XIX в. активно обсуждалась проблема *«тепловой смерти»* Вселенной, которая заключалась в том, что согласно закону возрастания энтропии со временем все формы движения должны перейти в тепловые. Переход же теплоты от горячих тел к холодным приведёт к тому, что температура всех тел во Вселенной сравняется, т. е. наступит полное тепловое равновесие, и все процессы во Вселенной прекратятся — наступит «тепловая смерть». Ограниченность такого вывода заключается в том, что второе начало термодинамики применимо только для замкнутых систем, в то время как наша Вселенная таковой не является.

Третье начало термодинамики утверждает, что нельзя охладить вещество до температур абсолютного нуля посредством конечного числа шагов. Понимание этого начала требует представлений об атомном строении вещества, тогда как остальные являются обобщением опытных данных и не содержат сведений о какой-либо структуре вещества. Это утверждение сформулировано В.Г. Нернстом и иначе называется тепловой теоремой.

Классическая термодинамика базируется на вышеизложенных четырёх термодинамических законах, которые выполняются в замкнутых системах. Однако большинство реальных систем являются открытыми и неравновесными, а, следовательно, необходимо обобщение теории на системы, которые обмениваются с окружающей средой веществом или энергией.

Биолог-теоретик Л. Барталанфи для неравновесных открытых систем, каковыми являются все живые организмы, ввёл понятие локального или текущего равновесия для стационарного состояния открытой системы. В подобных стационарных состояниях характеристики системы не зависят от времени, поэтому постоянна и энтропия S . Однако потоки и силы в открытой системе отличны от нуля, поэтому энтропия всё время возникает, и условие её постоянства будет выполняться только при поступлении в систему извне отрицательной энтропии (негэнтропии), которая компенсирует её производство внутри системы.

В стационарном неравновесном состоянии выполняется теорема о минимуме производства энтропии (И. Пригожин), которая отражает внутреннюю устойчивость неравновесных систем, её своеобразную инерционность. Если какие-то граничные условия не позволяют системе прийти в устойчивое равновесие, где $\Delta S = 0$, она придет в состояние с

минимальным производством энтропии. Система, выведенная внешним воздействием из состояния с минимальным производством энтропии, стимулирует развитие процессов, направленных на ослабление внешнего воздействия — *принцип Ле Шателье-Брауна*. В результате система будет эволюционировать в новое стационарное состояние, в котором изменение потока энергии будет меньше первоначального.

Принцип локального равновесия и теорема о минимуме производства энтропии в равновесных состояниях были положены в основу термодинамики необратимых процессов, при помощи которой становится возможным исследование открытых систем.

Достоинство термодинамики состоит в том, что она позволяет рассмотреть общие свойства равновесных систем и общие закономерности установления равновесия, получить многие сведения о веществе, не зная в полной мере его внутреннюю структуру. Ее законы применимы к любому веществу, к любым системам, включающим электрические и магнитные поля и излучение, поэтому вошли в физику газовых и конденсированных сред, геофизику и физику Вселенной, химию и технику, а также используются в биологии и управлении процессами.

Тема 5. Пространство и время, физические взаимодействия

Эволюция понятий пространства и времени

В истории науки известны две концепции пространства: неизменное пространство какместилище материи (взгляд Ньютона) и пространство, свойства которого связаны со свойствами находящихся в нем тел (взгляд Лейбница). Согласно Ньютону, пространство и время абсолютны. Абсолютное пространство существует независимо от находящихся в нём физических объектов и может быть совершенно пустым, являясь как бы мировой ареной, где разыгрываются физические процессы; время во всех точках такого пространства текло и течет одинаково.

Специальная теория относительности (СТО), опубликованная в 1905 г., объединила пространство и время в единый континуум пространство – время.

Основу СТО составляют два постулата:

1. Принцип относительности: все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отчета.

2. Принцип постоянства скорости света: скорость света в пустоте одинакова во всех инерциальных системах отчета (ИСО) и не зависит от движения источников и приемников света. Скорость света в вакууме — предельная скорость в природе (что противоречит закону сложения скоростей в механике).

Первый постулат СТО является обобщением принципа относительности Галилея на все физические законы вообще (а не только на законы механики), а второй основывается на результатах опыта Майкельсона-Морли (1881 г.), показавших, что скорость света абсолютна, постоянна и равна 300 000 км/с.

Существование предельной скорости учитывает релятивистская механика, согласно которой переход от одной ИСО к другой осуществляется по преобразованиям Лоренца, содержащих преобразования Галилея как предельный случай, когда скорости $v < c$.

Следствия преобразований Лоренца:

— относительность линейных размеров тел

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$
 где l — длина стержня, движущегося со скоростью v , оказывается меньше, чем длина покоящегося стержня l_0 .

— относительность одновременности событий

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$
 где Δt — промежуток времени по часам в неподвижной системе отсчета, Δt_0 — промежуток времени по часам, движущимся вместе с объектом со скоростью v .

Из преобразований Лоренца следует, что в системе отсчета, движущейся со скоростью соизмеримой со скоростью света, физические процессы замедляются (относительно неподвижной системы!).

В 1901 г. молодой немецкий физик В. Кауфманн экспериментально доказал, что масса электронов, самопроизвольно испускаемых радиоактивными элементами и движущихся со скоростью многих тысяч километров в секунду, изменяется, и её изменения определяются скоростью, с которой движется электрон.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — масса покоящегося тела, а m — масса тела, движущегося со скоростью v .

Иными словами, масса тела также является величиной относительной и возрастает с увеличением скорости тела.

Таким образом, из СТО следует относительность одновременности двух событий, происшедших в разных точках пространства, относительность линейных размеров тел в разных системах отсчёта и относительность массы.

Ещё одним важнейшим следствием СТО является знаменитая формула Эйнштейна о взаимосвязи массы и энергии

$$E = mc^2, \quad \text{где } E \text{ — энергия, которой обладает тело массой } m.$$

В 1916 г. А. Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности (ОТО), которая обобщает СТО на ускоренные, т. е. неинерциальные системы отсчёта.

Основные принципы ОТО:

- распространение принципа относительности на все движущиеся системы (а не только на инерциальные);
- ограничение применимости принципа постоянства скорости света областями, где гравитационными силами можно пренебречь (там, где гравитация велика, скорость света замедляется).

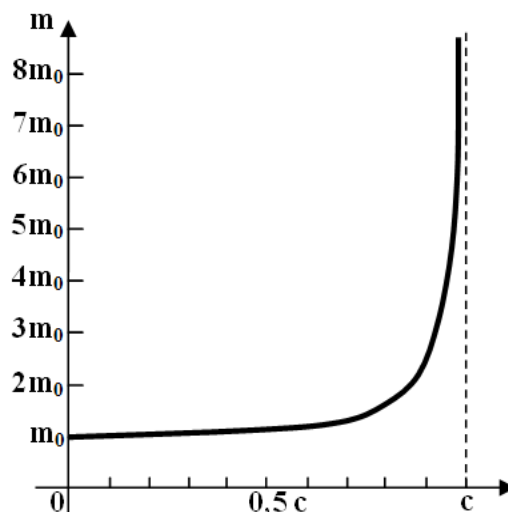


Рисунок 7 – Зависимость массы движущегося тела от скорости

Следствия ОТО:

1. Свойства пространства-времени зависят от движущейся материи.

2. Луч света, обладающий инертной, а, следовательно, и гравитационной массой, должен искривляться в поле тяготения.

3. Частота света под действием поля тяготения должна уменьшаться.

Искривление луча света, проходящего в поле тяготения Солнца, было обнаружено при наблюдении положения звезд во время солнечного затмения в 1919 г. Изменение частоты света под действием поля тяготения было зафиксировано в 1923 – 1926 гг. при изучении Солнца — линии солнечного спектра смещались в сторону красного цвета (красное смещение). Эти эффекты явились убедительным подтверждением ОТО.

В ОТО показана взаимосвязь пространства и времени, относительность пространственных и временных соотношений в материальном мире, поэтому её часто называют теорией структуры “пространства-времени”, а также современной теорией гравитационного поля.

Согласно этой теории, геометрические свойства пространства, изменение его геометрии со временем, а также скорость течения самого времени зависят от распределения и движения вещества — материи. В свою очередь, движение материи и распределение её в пространстве зависят от его геометрии. Оба процесса взаимосвязаны и самосогласованы: распределение и движение материи изменяют геометрию пространства-времени, а изменение геометрии пространства-времени определяет характер распределения и движения в нем материи. Это означает, что и пространство, и время не абсолютны, а относительны. В сильном поле тяготения происходит искривление пространственно-временного континуума — чем больше масса, тем сильнее искривление пространства и больше замедление времени.

Для каждой массы существует свой определенный *гравитационный радиус*, при сжатии до которого сила тяготения стремилась бы к бесконечности. Но даже для астрономических масс он очень мал: для массы Земли это всего один сантиметр.

Фундаментальные взаимодействия

В природе существуют качественно различные системы связанных объектов — ядра, атомы, макротела, звездные системы, т. е. существует нечто такое, что скрепляет части системы в целое. Чтобы "разрушить" систему частично или полностью, нужно затратить энергию. Взаимное влияние частей системы происходит посредством обмена квантами определённых полей (гравитационного,

электрического, магнитного и других), а иногда и информацией, и характеризуется энергией взаимодействия.

В классической физике взаимодействие определяется силой, с которой один материальный объект действует на другой. Большинство сил, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, представляют собой силы контактного типа, возникающие при соприкосновении. Поэтому исторически первой появилась **концепция близкодействия**, согласно которой взаимодействие материальных объектов осуществляется опосредованно.

Создание Ньютоном теории всемирного тяготения, согласно которой все планеты действуют друг на друга с определенными силами, несмотря на то, что они не соприкасаются, и между ними нет никакой материальной среды, которая могла бы передавать действие сил, привело к возникновению **концепции дальнегодействия**. Для описания гравитационного взаимодействия пришлось ввести понятие о “действии на расстоянии”. И долгое время считалось, что взаимодействие материальных объектов, находящихся даже на большом расстоянии друг от друга, передаётся через пустое пространство мгновенно.

К настоящему времени экспериментально подтверждена концепция близкодействия: взаимодействия передаются посредством физических полей с конечной скоростью, не превышающей скорости света в вакууме. В квантовой теории поля она дополняется утверждением, что при любом взаимодействии происходит обмен особыми частицами — квантами поля.

Принято считать, что любые взаимодействия каких угодно объектов могут быть сведены к ограниченному классу четырех основных видов фундаментальных взаимодействий: сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному.

Интенсивность взаимодействия характеризуют с помощью константы взаимодействия, которая представляет собой безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия. Отношение значений констант дает относительную интенсивность соответствующих взаимодействий. По своей величине основные взаимодействия располагаются в следующем порядке:

сильное (ядерное) — электрическое — слабое — гравитационное.

Кратко охарактеризуем каждый из этих четырех видов взаимодействий.

Сильные (ядерные) взаимодействия. Наличие в ядрах одинаково заряженных протонов и нейтральных частиц говорит о том, что должны существовать взаимодействия, которые гораздо интенсивнее электромагнитных, иначе ядро не могло бы образоваться.

Эти взаимодействия проявляются лишь на расстояниях менее 10^{-15} м и скрепляют нуклоны в ядре и кварки внутри нуклонов. Нуклон-нуклонная сила не является “чистой” силой притяжения. На расстояниях порядка 10^{-16} м она становится силой отталкивания. Переносчиком этого взаимодействия являются глюоны, которые были открыты с появлением ускорителей. Ядерные взаимодействия являются самыми сильными среди всех четырёх — константа сильного взаимодействия имеет величину порядка 1. Мы до сих пор не знаем природы ядерных сил во всех деталях, и их разгадка является одной из главных проблем современной ядерной физики.

Электромагнитные взаимодействия обусловлены существованием в природе электрических зарядов. Благодаря этим взаимодействиям существуют атомы (притяжение электронов и протонов), молекулы, силы трения, упругости, поверхностного натяжения жидкости и т. д. Внутри вещества преобладают именно эти взаимодействия, которые и определяют все явления, наблюдаемые в молекулах и атомах: химические связи, излучение света, намагничивание и пр. Гравитационные взаимодействия здесь не сказываются из-за их малой силы, а слабые и сильные — из-за их короткого радиуса действия. Электромагнитные же силы действуют на любом расстоянии — радиус их действия равен ∞ , и они во много раз сильнее гравитационных — константа электромагнитного взаимодействия равна 10^{-3} . Переносчиками взаимодействия являются фотоны, имеющие нулевую массу покоя и приобретающие ее при движении со скоростью света. Они фиксируются приборами, как и электромагнитные волны, причем, различаются длиной волны и частотой.

Слабые взаимодействия существуют между любыми парами элементарных частиц, проявляются в процессах распада нестабильных атомных ядер и элементарных частиц, а также при любом взаимодействии нейтрино с веществом. Радиус их действия составляет примерно 10^{-18} м, а константа слабого взаимодействия $\sim 10^{-15}$. Переносчиками этого взаимодействия являются векторные бозоны, обнаруженные в 1983 г. и имеющие массу в 100 раз больше протона и нейтрона. Благодаря этому взаимодействию возможны термоядерные реакции и образование атомных ядер в недрах звезд — звездный нуклеосинтез, взаимопревращение нейтронов и протонов, переход между кварками в нуклонах. Это взаимодействие виртуально (на короткое время) превращает каждый протон ядра в нейтрон, позитрон и нейтрино, а каждый нейтрон — в протон, электрон и антинейтрино, вызывая переходы между разными типами кварков и бета-распады нуклонов в ядрах.

Гравитационные взаимодействия проявляются в притяжении любых материальных объектов, имеющих массу, т. к. именно массы тел

являются источником гравитации. Эти взаимодействия универсальны, т. е. применимы к любым микро- и макрообъектам. Однако они существенны лишь для тел огромных астрономических масс и для формирования структуры и эволюции Вселенной как целого, т. е. для мегамира. Исследование конкретных небесных объектов (звезд, пульсаров, квазаров и др.) невозможно без привлечения всех видов фундаментальных взаимодействий. В процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет, т. к. очень быстро ослабевает для объектов с малыми массами. Радиус гравитационного взаимодействия равен бесконечности, но оно является самым слабым из всех — константа гравитационного взаимодействия имеет значение порядка 10^{-39} . Переносчиками тяготения являются гравитоны, которые пока не открыты и вряд ли будут открыты, пока в нашем распоряжении не будет весов с точностью не менее 10^{-14} кг.

Гравитационное взаимодействие количественно было изучено одним из первых и установлено, что оно подчиняется закону всемирного тяготения (И. Ньютон, 1687 г.). В современном понятии существует поле тяготения с гравитационными волнами, скорость распространения которых приблизительно равна скорости распространения света в вакууме.

Таблица 1 — Характеристики фундаментальных взаимодействий

Вид взаимодействия	Сила взаимодействия (отн. ед.)	Полевой квант	Область проявления
Сильные (ядерные)	1	Глюоны	Атомные ядра, фундаментальные частицы
Электромагнитные	10^{-3}	Фотоны	Атомы, электротехника
Слабые	10^{-15}	Z^0 , $W(\pm)$ - бозоны	Радиоактивный распад, распадные процессы
Гравитационные	10^{-39}	Гравитоны	Массивные тела

Создание единой теории фундаментальных взаимодействий

Первой из теорий взаимодействий стала теория электромагнетизма, созданная Максвеллом в 1863 г. Затем в 1915 г. Эйнштейн сформулировал общую теорию относительности, описывающую гравитационное поле. В первой половине XX в. были предприняты многочисленные попытки построения единой теории фундаментальных взаимодействий. Однако задача значительно усложнилась в связи с открытием слабого и сильного взаимодействий, а также квантованием теории.

В 1967 г. была создана теория электрослабого взаимодействия, объединившая электромагнетизм и слабые взаимодействия, её авторы С. Вайнберг, Ш. Глэшоу, А. Салам. В 1973 г. была предложена теория сильного взаимодействия — квантовая хромодинамика (КХД). На основе этих теорий была построена так называемая **Стандартная Модель**, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия. Таким образом, все фундаментальные взаимодействия описываются двумя общепринятыми теориями: общей теорией относительности и Стандартной Моделью, которые пока объединить не удалось из-за трудностей создания квантовой теории гравитации. Однако попытки продолжаются и используются различные подходы: теории петлевой квантовой гравитации, струн, М-теория и т. д.

В четырех измерениях объединить все фундаментальные взаимодействия казалось невозможным, и были предприняты попытки введения дополнительных измерений. В начале 80-х гг. было предложено 11 измерений, а ещё позднее фундаментальные разработки включали уже 26 измерений: из них 4 основных измерения — Эйнштейна, остальные были названы квантовыми измерениями. Такое многомерное построение мира из разного числа измерений использовано в теориях великого объединения (ТВО) и теории супергравитации.

Однако главной проблемой оставалось определение частиц как точек и искажение ими пространства-времени, и решение стали искать с помощью идей более высоких симметрий. Так, наряду с супергравитацией появилась теория струн, в которой частицам вместо точки сопоставляется одномерная струна, помещённая в многомерное пространство. Эта теория, заменив точечные частицы крошечными энергетическими петлями, устранила абсурдности, возникающие при расчетах. У каждой струны, имеющей планковский размер (10^{-35} м), может быть бесконечно много типов (или мод) колебаний. Вибрация этих струн может генерировать все силы и частицы.

Развитие этих представлений в теории суперструн не только учитывает возможность существования силы тяжести, но и утверждает это существование, т. е. тяжесть — это следствие теории суперструн. Кроме того, суперструны позволяют понять хиральность, тогда как супергравитация не может объяснить разницы между левым и правым — в ней поровну частиц каждой направленности. Число размерностей, соответствующее непротиворечивости теории, равно 506 и оно не окончательно, не исключено появление и более сложных геометрических образов. Однако непосредственному обнаружению множество дополнительных размерностей недоступно, т. к. все они, кроме трёх, в момент Большого Взрыва свернулись до планковских размеров. Итак, согласно теории суперструн геометрия Вселенной на больших расстояниях евклидова и трёхмерна, а на планковских —

неевклидова и многомерна. Уязвимость этой теории в том, что пока она опирается лишь на умозрительные суждения. Однако для учёных достаточно, что она работает и дает результаты, подтверждающиеся экспериментом.

Согласно современным представлениям, все четыре взаимодействия объединяются в одно при очень высоких температурах и, соответственно, энергиях. Так, объединение электромагнитного и слабого взаимодействий наблюдается в ускорителях при энергиях 100 ГэВ и $T = 10^{12}$ К. Теоретики предсказывают, что объединение электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий будет наблюдаться при энергии 10^{15} ГэВ, а при 10^{19} ГэВ к ним присоединится и гравитационное. Таких энергий пока не было зафиксировано нигде во Вселенной. Считается, что в момент Большого Взрыва во Вселенной было одно фундаментальное взаимодействие, а четыре появилось при расширении и охлаждении Вселенной.

В настоящее время продолжают разрабатываться Теории Всего Сущего (ТВС), которые должны объединить описание всех фундаментальных взаимодействий между частицами.

Фундаментальные постоянные

Фундаментальные постоянные — это такие константы, в которых содержится информация о наиболее общих, основополагающих свойствах материи. Основные свойства Вселенной объясняются значениями нескольких фундаментальных постоянных:

G — гравитационная постоянная, характеризующая гравитационное взаимодействие;

h — постоянная Планка, которая определяет минимальное изменение физической величины, называемое действием;

c — скорость света, максимально возможная скорость распространения любых взаимодействий в природе;

e — элементарный заряд, минимально возможное значение электрического заряда, существующего в природе в свободном состоянии;

m_p, m_e — массы протона и электрона и др.

Они являются едиными для всех участков Метагалактики и с течением времени не меняются, по этой причине их называют мировыми постоянными. Наличие констант в законах природы отражает относительную неизменность тех или иных сторон реальной действительности, проявляющуюся в наличии закономерностей.

Некоторые безразмерные комбинации мировых постоянных играют очень важную роль в формировании структуры и свойств Вселенной:

— размер пространственной оболочки для атомных явлений определяется комбинацией $\hbar^2/(m_e c^2)$, где $\hbar = h/(2\pi)$;

— характерные энергии для атомных явлений определяются комбинацией $m_e c^4 / \hbar^2$;

— предельная масса стационарных астрофизических объектов составляет $(\hbar c / G)^{3/2} \cdot m_N^{-2}$, где m_N — масса нуклона и т. д.

Интенсивность фундаментальных взаимодействий также определяется безразмерными комбинациями мировых постоянных:

$$\begin{aligned}\alpha_g &= \frac{G m_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-39} && \text{— гравитационное,} \\ \alpha_w &= \frac{g_f m_p c^2}{\hbar} \approx 10^{-15} && \text{— слабое,} \\ \alpha &= \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} && \text{— электромагнитное,} \\ \alpha_s &= \frac{g_s^2}{\hbar c} \approx 1 && \text{— сильное.}\end{aligned}$$

Таким образом, электромагнитное взаимодействие примерно в 137 раз слабее сильного, а гравитационное в 10^{39} меньше сильного. Кроме того, константы взаимодействий определяют насколько быстро идут превращения одних частиц в другие в различных процессах.

Исследования показывают, что Вселенная, в которой мы живем, удачно приспособлена для нашего существования. Даже небольшие изменения фундаментальных постоянных приводят к качественным изменениям свойств Вселенной, в частности, к невозможности существования сложных структур, а значит, и самой жизни. Существует удивительное согласование энергии расширения Вселенной и ее гравитационной энергии, константы фундаментальных взаимодействий имеют такие значения, что обеспечивают возможность возникновения галактик и звезд.

Например, если бы константа гравитационного взаимодействия была на 8 – 10% меньше, то звезды вообще не успели бы возникнуть к нашему времени; а если больше на 8 – 10%, звезды, наоборот, эволюционировали бы слишком быстро. Константа электромагнитного взаимодействия тоже не может существенно отклоняться от своего значения — 1/137. Если бы, например, она была 1/80, то все частицы, обладающие массой покоя, аннигилировали, и Вселенная состояла бы только из безмассовых частиц. Константа сильного взаимодействия отвечает за протекание ядерного синтеза в недрах звезд с образованием углерода и кислорода, которые служат материалом для формирования звезд второго поколения типа Солнца и планетных систем. И даже небольшого изменения константы сильного взаимодействия было бы достаточно, чтобы жизнь на Земле оказалась невозможной. Если бы

масса электрона была в 3 – 4 раза больше, то время существования нейтрального атома водорода исчислялось бы несколькими днями. А это привело бы к тому, что галактики и звезды состояли бы преимущественно из нейтронов, и многообразие атомов и молекул в их современном виде просто не существовало бы.

Трёхмерность нашего пространства также не случайна. В пространстве N измерений точечные источники взаимодействуют с силой $F \sim 1/r^{N-1}$, где r — расстояние между источниками. Было установлено, что устойчивые движения двух тел, взаимодействующих по такому закону, отсутствуют при $N > 3$, а, следовательно, не существовало бы замкнутых орбит планет и, естественно, Солнечной системы и человека, была бы невозможна атомная структура вещества.

Таким образом, если бы величины фундаментальных констант несколько отличались от их значений, то свойства Вселенной были бы совсем другими. Наша реальная Вселенная поразительно приспособлена для возникновения и развития в ней существующей формы жизни. В этом заключается суть **антропного принципа**: жизнь является неотъемлемой частью Вселенной, естественным следствием ее эволюции.

Можно сказать, что нам просто повезло — константы в Метагалактике оказались благоприятствующими для возникновения жизни и поэтому мы существуем и познаем Вселенную. Но наряду с нашей Метагалактикой вполне могут существовать и другие — с иными константами, другим распределением материи, геометрией и, возможно, с другими размерностями пространства, совершенно неподходящими для жизни. Другие Метагалактики — это "миры иных констант", и вполне возможно, что в некоторых из них есть и разумные существа. Возможность согласованного изменения всего набора физических констант и параметров Вселенной так, чтобы получить модели других вселенных, в которых выполнены если не достаточные, то хотя бы необходимые условия для возникновения сложных структур и жизни является интересной, но пока неразрешимой задачей.

Связь законов сохранения и принципов симметрии

Среди всех физических законов своей всеобщностью и в высшей степени фундаментальностью выделяются законы сохранения — энергии, импульса, момента импульса и ряда других величин. Эти законы неразрывно связаны со свойствами симметрии природы.

Симметрия в переводе с греческого языка означает "соразмерность, пропорциональность, одинаковость в расположении частей". Свойства симметрии природы выражаются в неизменности вида физических законов, т. е. в их инвариантности при некоторых преобразованиях. В 1918 г. Эмми Нетер доказала теорему о том, что различным симметриям физических законов соответствуют

определенные законы сохранения. По выражению Р. Фейнмана, "среди наиболее мудрейших и удивительных вещей в физике эта связь — одна из самых интересных и красивых".

Рассмотрим симметрию физических законов, которые связаны со свойствами пространства и времени:

1. Свойство однородности времени — симметрия по отношению к сдвигу начала отсчета времени — проявляется в физическом эквиваленте разных его моментов и приводит к **закону сохранения энергии**. Этот закон выполняется для систем, находящихся в неизменных во времени внешних условиях, которые создаются стационарными внешними полями. Действительно, выбор начала отсчета времени несущественен, если только неизменны во времени внешние условия, в которых находится система.

2. Свойство однородности пространства — симметрия по отношению к сдвигу начала координат — означает эквивалентность всех точек физического пространства и приводит к **закону сохранения импульса**. Т. е. явление, произошедшее в одной области пространства, повторится без изменений, если будет вызвано в другом месте. При этом необходимо перенести в новое место всю совокупность факторов, обуславливающих явление. Закон сохранения импульса соблюдается только для изолированных систем.

3. Свойство изотропности пространства — симметрия по отношению к повороту координатных осей — выражает физическую эквивалентность направлений в пространстве и приводит к **закону сохранения момента импульса**. Так, в повернутой установке, аппаратуре, лаборатории и т. д. все процессы протекают точно так же, как и до поворота. При этом повороту должно быть подвергнуто все, определяющее течение процесса. Этот закон также соблюдается только для изолированных систем.

4. Свойство инвариантности — симметрия по отношению к переходу от покоя к состоянию равномерного и прямолинейного движения — заключается в физической эквивалентности покоя и равномерного прямолинейного движения и приводит к **закону сохранения инерции**. Все процессы происходят независимо от того, покоится система или движется равномерно и прямолинейно, если только переход от одного состояния к другому осуществляется со всем существенным окружением. Закон сохранения инерции выполняется только для изолированных систем.

Следует также упомянуть о *симметрии относительно зеркального отражения*, которая означает, что физические законы не меняются при замене левого на правое, а правого на левое, и связана с *законом сохранения пространственной чётности*, и *симметрии частиц и античастиц*, связанной с *законом сохранения зарядовой чётности*. Однако оба этих закона сохранения не вполне универсальны, поскольку

соответствующие им симметрии нарушаются в слабых взаимодействиях.

Трёхмерность пространства предопределяет векторную природу импульса и момента импульса; законы сохранения этих величин — векторные законы. Одномерность времени предопределяет скалярную природу энергии и соответствующего закона сохранения.

Тот факт, что закон сохранения энергии вытекает из однородности времени, означает, что течение времени само по себе не может вызвать изменение физических состояний системы. Связь закона сохранения импульса со свойством однородности пространства означает, что перемещения системы недостаточно для изменения ее состояния; последнее может произойти только в результате взаимодействия данной системы с другими системами. Связь закона сохранения момента импульса со свойством изотропности пространства означает, что поворот системы в пространстве не изменяет ее свойств.

Законы сохранения универсальны, т. к. их область применения выходит за рамки любых частных теорий (гравитации, электромагнетизма и т. д.), практически обособленных друг от друга в современной физике. Они занимают в науке особое место и являются наиболее глубокими, фундаментальными законами природы, к которым, возможно, сведутся в будущем все закономерности естествознания.

Тема 6. Электромагнитная картина мира

Колебания и волны

В окружающем нас мире часто приходится сталкиваться с периодическими (или почти периодическими) процессами, которые повторяются через одинаковые промежутки времени — такие процессы называют *колебательными*. При наличии упругих сил, силы тяжести возникают механические колебания; в электрических цепях реализуются электрические колебания (напряжений и сил токов). Колебания могут иметь разную природу, но они обладают общими чертами и подчиняются общим закономерностям, что позволяет рассматривать различные колебательные процессы с единой точки зрения.

Значительную роль при изучении любых колебаний — особенно в акустике и оптике — играют *гармонические колебания*, которые описываются функцией, изменяющейся по закону синуса или косинуса:

$$x(t) = x_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где x — смещение тела от положения равновесия,

x_m — амплитуда колебаний, т. е. максимальное смещение от положения равновесия,

$(\omega t + \varphi_0)$ — фаза колебаний, ω — циклическая или круговая частота колебаний, t — время, φ_0 — начальная фаза.

Минимальный интервал времени, через который происходит повторение движения тела, называется периодом колебаний $T = 2\pi/\omega$. Частота колебаний $f = 1/T$ показывает, сколько колебаний совершается за 1 с и измеряется в герцах (Гц).

Механическими колебаниями называются периодические (или почти периодические) изменения физической величины, описывающей механическое движение (скорость, перемещение, кинетическая и потенциальная энергия и т. п.). Примерами простых механических колебательных систем могут служить груз на пружине или математический маятник.

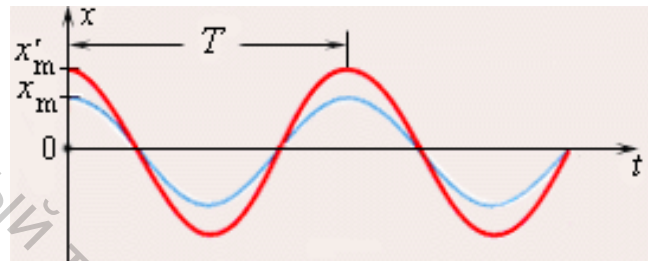


Рисунок 8 – Гармонический колебательный процесс

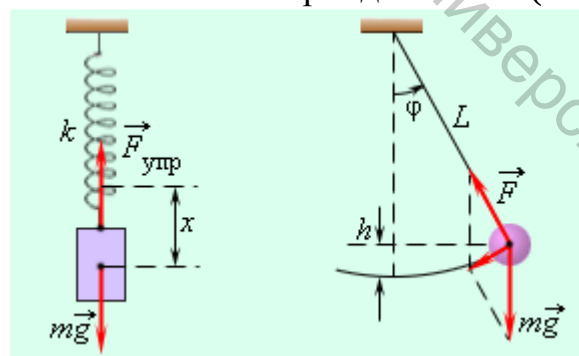


Рисунок 9 – Механические колебательные системы

Математический маятник состоит из точечной массы, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити. После выведения системы из устойчивого состояния – отклонения маятника – система начинает совершать колебания около положения равновесия. За период колебаний выполняется закон сохранения и превращения механической энергии. Период колебаний маятника при малых амплитудах, когда колебательный процесс можно считать линейным, определяется его длиной и не зависит от массы маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ где } \omega_0 - \text{собственная частота колебательной системы.}$$

Колебания под действием внешней, периодически изменяющейся силы, называют *вынужденными*; если же колебания происходят после выведения системы из состояния равновесия (математический маятник), то это — свободные или *собственные* колебания системы, которым соответствуют собственные частоты, зависящие от свойств системы. Собственные колебания являются не только самыми распространёнными, но и самыми важными с точки зрения теории колебаний, т. к. условия возникновения и характер всех других типов колебаний, которые могут возникнуть в данной системе, существенно зависят от характера собственных колебаний системы.

Если на систему подействовать периодически меняющейся силой, то система откликнется малыми колебаниями, частота которых будет совпадать с частотой вынуждающей силы, но если частота этой силы совпадёт с одной из собственных частот системы, то амплитуды колебаний резко возрастут — такое явление называется резонансом. Т. о. явление резонанса — это резкое возрастание амплитуд вынужденных колебаний, происходящее при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой системы или при приближении к ней. Применение явления резонанса имеет место при настройке радиоприемника на частоту передающей станции.

В реальных условиях любая колебательная система находится под воздействием сил трения (сопротивления). При этом часть механической энергии превращается во внутреннюю энергию теплового движения атомов и молекул, и колебания становятся *затухающими* (рис. 10).

Такие колебания можно описать уравнением:

$$x(t) = x_m e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0).$$

В данном случае амплитуда $x_m e^{-\beta t}$, где β – коэффициент затухания, τ – время затухания, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в $e \approx 2,7$ раз.

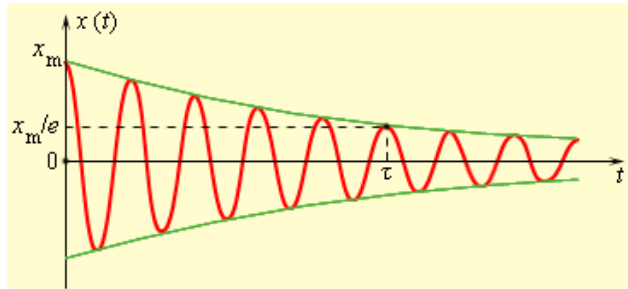


Рисунок 10 – Затухающий колебательный процесс

В 1822 г. французский математик и физик Ж.Б. Фурье доказал, что любое повторяющееся движение можно рассматривать как результат сложения простых гармонических колебаний, а любое волновое движение — как сумму простых гармонических волн. Это утверждение лежит в основе изучения повторяющихся явлений в самых разных областях.

Волны — это изменение состояния среды, распространяющееся в ней без переноса вещества и несущее с собой энергию и импульс. В процессе распространения волны частицы среды лишь совершают колебания около положений равновесия. Важнейшие характеристики волн — энергия, импульс и скорость, а также длина волны и частота.

Длиной волны λ называют расстояние между двумя соседними точками, колеблющимися в одинаковых фазах.

$$\lambda = vT = v/f, \quad \text{где } \lambda \text{ — длина волны, } v \text{ — скорость распространения волны, } T \text{ — период, } f \text{ — частота.}$$

Волновой фронт — геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе. Он отделяет область пространства, вовлеченную в волновой процесс, от той, где колебания еще не возникли. В зависимости от типа волновой поверхности волны могут быть плоскими или сферическими. В плоской волне амплитуда постоянна, а в сферической — убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

Волны переносят энергию любой величины от одной точки к другой, распространяясь с конечной скоростью, зависящей от среды: так, световые волны распространяются со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с (в вакууме), звуковые (в воздухе) — 344 м/с.

Как и колебания, волновые процессы различной физической природы (звук, электромагнитные волны, волны на поверхности жидкости и т. д.) имеют много общего. Распространение волн различной физической природы можно описывать с помощью одинаковых математических уравнений — в этом проявляется единство материального мира.

В **продольных волнах** частицы перемещаются вдоль направления распространения волны, например, распространение звука в воздухе или волн сжатия-растяжения в пружине. Продольные механические волны могут распространяться в любых средах — твердых, жидких и газообразных.

В **поперечных волнах** частицы перемещаются перпендикулярно направлению распространения волны — в электромагнитных волнах направления электрического и магнитного полей перпендикулярны направлению распространения волны.

В твердых телах распространяются продольные волны, но в случае неоднородной плотности могут распространяться и поперечные.

Бегущая волна — волновое движение, при котором поверхность равных фаз перемещается с конечной скоростью, постоянной для однородной среды. Уравнение бегущей волны:

$y(x, t) = A \cos \omega(t - x/v) = A \cos (\omega t - kx)$, где $k = \omega/v$ — волновое число.

Волны, бегущие во встречных направлениях, при определенных условиях могут образовать **стоячую волну**.

Практически такая волна возникает при отражениях от преград и неоднородностей в результате наложения

отражённой волны на падающую. Согласно принципу суперпозиции колебания, вызванные встречными волнами, складываются. В стоячей волне существуют неподвижные точки, которые называются узлами. Посередине между узлами находятся точки, которые колеблются с максимальной амплитудой — пучности.

В струне, закреплённой на обоих концах, стоячая волна возникает только в том случае, если длина L струны равняется целому числу длин полуволн: $L = n(\lambda/2)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$

В стоячей волне нет потока энергии. Колебательная энергия, заключенная в отрезке струны между двумя соседними узлами, не транспортируется в другие части струны.

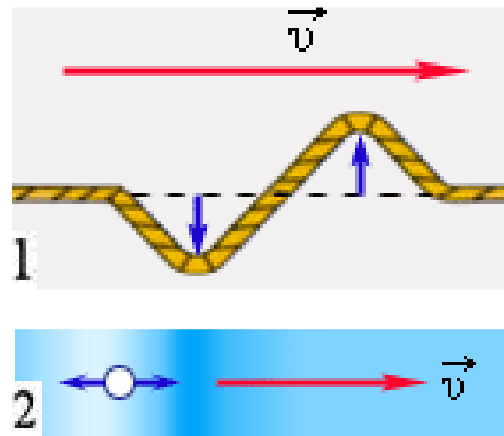


Рисунок 11 – Распространение волнового импульса:

1 – поперечного,
2 – продольного

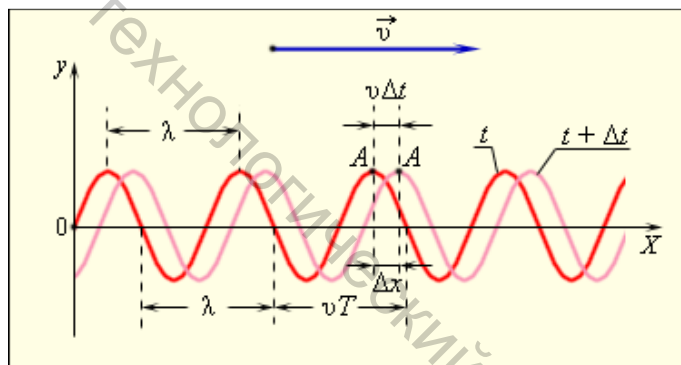


Рисунок 12 – Бегущая волна

Колебания струн, закрепленных на обоих концах, создают звуки всех струнных музыкальных инструментов. Очень похожее явление возникает при звучании духовых инструментов, в том числе органных труб.

Понятие стоячих волн, появившееся в науке о звуковых колебаниях, распространилось и на другие колебательные системы, благодаря чему была решена задача теплового излучения, приведшая к созданию квантовой гипотезы.

С использованием этой модели и волновой механики сумели описать строение атома. В современной теории атом рассматривается как система, обладающая определенными формами стоячих волн с характеристическими частотами. Вместо орбит в модели атома Бора теперь вводят замкнутые кольца стоячих волн. Чем дальше орбита, тем большее число пучностей должно войти в это кольцо. По тому же принципу строятся модели для атомного ядра.

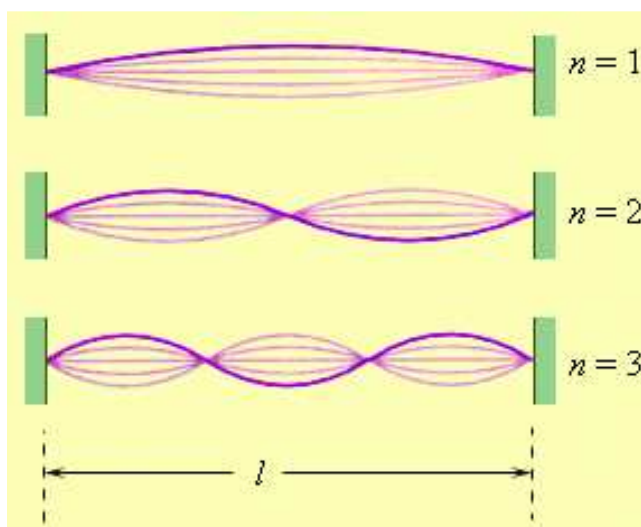


Рисунок 13 – Моды колебаний струны, закрепленной на обоих концах

Общие свойства волн

1. *Отражение* — волны любого происхождения обладают способностью отражаться от границы раздела двух сред. При этом падающая и отражённая волны лежат в одной плоскости, а угол падения равен углу отражения.

2. *Преломление* — при прохождении через границу раздела двух сред волны способны изменять направление своего распространения из-за попадания в среду с другой скоростью распространения.

Закон преломления гласит: отношение синусов углов падения и преломления, равное отношению скоростей распространения в первой и второй средах, есть величина постоянная и называется *показателем преломления*:

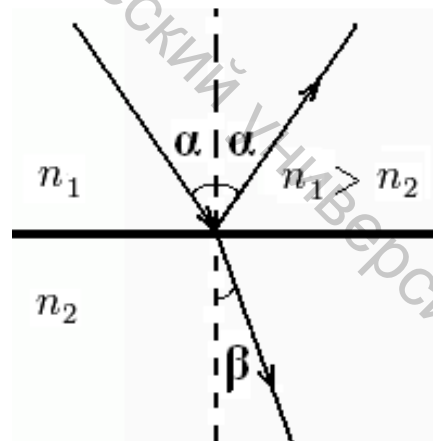


Рисунок 14 – Законы отражения и преломления

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Закон преломления был экспериментально установлен голландским ученым В. Снеллиусом в 1621 г.

3. *Интерференция* — взаимное усиление или ослабление амплитуды двух или нескольких когерентных волн, при котором энергия волн перераспределяется в пространстве. Сопровождается чередованием максимумов и минимумов интенсивности в пространстве. Результат интерференции — интерференционная картина — зависит от разности фаз накладываются волн. Интерферировать могут все волны, однако устойчивая интерференционная картина будет наблюдаться только в том случае, если волны имеют одинаковую частоту.

4. *Дифракция* — отклонение волны от прямолинейного распространения при огибании препятствий. Условие наблюдения явления дифракции: размеры препятствий должны быть сравнимы с длиной волны.

5. *Поляризация* — нарушение симметрии распределения возмущений в поперечной волне относительно направления её распространения, свойственна только поперечным волнам. В продольной волне поляризация возникнуть не может, так как возмущения в этом типе волн всегда совпадают с направлением распространения.

6. *Дисперсия* — зависимость фазовой скорости волн от частоты или длины волны.

7. *Эффект Доплера* — зависимость частоты волны от скорости движения источника волн относительно наблюдателя (1842 г.).

Указанные свойства имеют место для всех типов волн. Более подробно для световых волн они будут рассмотрены далее.

Звуковые волны

Звуковыми волнами или просто звуком принято называть волны, воспринимаемые человеческим ухом. Диапазон звуковых частот лежит в пределах приблизительно от 20 Гц до 20 кГц. Волны с частотой менее 20 Гц называются *инфразвуком*, а с частотой более 20 кГц — *ультразвуком*.

Волны звукового диапазона могут распространяться в газах, жидкостях и твердых телах, при этом скорость их распространения определяется инертными и упругими свойствами среды. Так, скорость звука в воздухе составляет ~ 340 м/с, в воде ~ 1480 м/с и в стали ~ 5000 м/с, при этом она не зависит ни от амплитуды, ни от частоты колебаний, пока упругие деформации подчиняются закону Гука. Однако

волны в газообразной среде – среде нашего обитания – представляют особый интерес. При распространении звука в газе атомы и молекулы колеблются вдоль направления распространения волны. Это приводит к изменениям локальной плотности ρ и давления P , по этой причине звуковые волны в газе часто называют волнами плотности или волнами давления. Изучением звуковых явлений занимается раздел физики, который называют *акустикой*.

При восприятии различных звуков человеческое ухо оценивает их прежде всего по уровню громкости, зависящей от потока энергии или интенсивности звуковой волны. Интенсивность звука I определяется как скорость потока энергии через единичное поперечное сечение и связана с давлением P , плотностью среды ρ и скоростью звука v соотношением $I = P^2/(2\rho v)$. Воздействие звуковой волны на барабанную перепонку зависит от звукового давления, т. е. амплитуды колебаний давления P_0 в волне. Человеческое ухо является совершенным созданием Природы, способным воспринимать звуки в огромном диапазоне интенсивностей: от слабого писка комара до грохота вулкана. Порог слышимости соответствует значению $P_0 \sim 10^{-5}$ Па, а наименьшая интенсивность составляет $I_{min} = 10^{-12}$ Вт/м². При таком слабом звуке молекулы воздуха колеблются в звуковой волне с амплитудой всего лишь 10^{-9} м! Болевой порог соответствует значению $P_0 \sim 10$ Па ($10^{12} I_{min}$). Таким образом, человеческое ухо способно воспринимать волны, в которых звуковое давление изменяется в миллион раз. Интенсивность звука часто оценивают по шкале децибел (дБ) $\beta = 10 \lg(I/I_{min})$. Тогда порог слышимости составляет 0 дБ, а концерт рок-музыки — 120 дБ. Санитарная норма соответствует 30 – 40 дБ.

Еще одной характеристикой звуковых волн является **высота** звука, которая определяется частотой колебаний: она тем выше, чем больше частота. Интервалу волн длиной от 20 м до 1,6 см, воспринимаемых ухом, соответствует диапазон частот $16 \div 20\,000$ Гц соответственно. Колебания в гармонической звуковой волне воспринимаются человеческим ухом как музыкальный тон. Колебания высокой частоты воспринимаются как звуки высокого тона, колебания низкой частоты – как звуки низкого тона. Звуки, издаваемые музыкальными инструментами, а также звуки человеческого голоса могут сильно различаться по высоте тона и по диапазону частот. Так, например, диапазон наиболее низкого мужского голоса – баса – простирается приблизительно от 80 до 400 Гц, а диапазон высокого женского голоса – сопрано – от 250 до 1050 Гц.

Интересно, что воспринимаемый нами диапазон звуков шире того, который используется для речи или пения ($100 \div 1000$ Гц). Но когда высокие частоты гаснут, как правило, в недорогих акустических системах, то теряются яркость и красота звучания, а если гаснут низкие

частоты, звук кажется монотонным, хотя высота тона воспринимается верно.

Когда говорят о частоте звука, издаваемого струнами любого музыкального инструмента, то имеется в виду частота f_0 основного тона, но в колебаниях струн могут присутствовать и гармоники, частоты f_n которых удовлетворяют соотношению: $f_n = nf_0$, ($n = 1, 2, 3...$). Поэтому звучащая струна может излучать целый **спектр** волн с кратными частотами. Амплитуды A_n этих волн зависят от способа возбуждения струны (смычок, молоточки); они определяют музыкальную окраску звука или **тембр**. Аналогично обстоит дело с духовыми музыкальными инструментами. Трубы духовых инструментов являются акустическими резонаторами, то есть акустическими колебательными системами, способными возбуждаться (резонировать) от звуковых волн определенных частот. Поэтому звуки, издаваемые трубами духовых инструментов, состоят из целого спектра волн с кратными частотами — *акустического спектра*.

Звук со сложной неповторяющейся временной зависимостью: согласные звуки речи, скрип, шорох, вибрации машин — называют **шумом**. Шум приводит к снижению внимания, замедлению реакций человека, угнетает центральную нервную систему, вызывает изменения скорости дыхания и пульса, способствует нарушению обмена веществ, возникновению сердечно-сосудистых заболеваний, язвы желудка и гипертонической болезни.

Замечательную *связь между числами и законами музыкальной гармонии* открыл еще Пифагор. Он использовал монохорд — струну, закрепленную на одном конце и перекинутую через острие ножа, так что к ней можно было подвешивать гири, создавая различные натяжения. Тогда было известно и об ощущениях, вызываемых разными комбинациями тонов: одни были приятными, другие — диссонирующими. Пифагор доказал, что приятные сочетания создают струны с одинаковым натяжением, длины которых находятся в отношении 2:1, два таких тона отличаются на интервал в одну октаву. Интервал 3:2 получил название квинты. Он отметил, что приятные сочетания связаны с простыми числами, характеризующими отношение длин. Таким образом, высота тона закрепленной струны связана с ее длиной. Для одной и той же струны, колеблющейся с одной, двумя, тремя и более пучностями, частоты колебаний находятся в пропорции 1:2:3 и т. д. Уменьшение длины струны в 2 раза приводит к повышению тона рождаемого ею звука на октаву. На основании подобных закономерностей Пифагор разработал теорию музыкальной гаммы и гармонии. Пифагор и его последователи — пифагорейцы — верили, что в основе природы лежат математические закономерности, по законам гармонии строили и космологическую систему.

Световые волны

Первые представления о природе света возникли у древних греков и египтян. По мере изобретения и совершенствования различных оптических приборов (зеркала, микроскопа, зрительной трубы) эти представления развивались и трансформировались. В конце XVII века существовали две теории света: корпускулярная (И. Ньютон) и волновая (Р. Гук и Х. Гюйгенс).

Согласно *корпускулярной теории*, свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами. Ньютон считал, что движение световых корпускул подчиняется законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика от плоскости. Преломление света объяснялось изменением скорости корпускул при переходе из одной среды в другую.

Волновая теория рассматривала свет как волновой процесс, подобный механическим волнам. В основу волновой теории был положен **принцип Гюйгенса**, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, становится центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени. С помощью принципа Гюйгенса были также объяснены законы отражения и преломления.

Таким образом, обе теории объясняли прямолинейное распространение света, законы отражения и преломления. Весь XVIII век стал веком борьбы этих теорий. Однако в начале XIX столетия ситуация коренным образом изменилась. Английский физик Т. Юнг и французский физик О. Френель исследовали явления интерференции и дифракции света, исчерпывающее объяснение которых могло быть дано только на основе волновой теории. Корпускулярная теория была отвергнута и восторжествовала волновая теория, однако вопрос о природе световых волн оставался открытым. В 60-е гг. XIX века Максвеллом были установлены общие законы электромагнитного поля, которые привели его к заключению, что свет — это электромагнитные волны.

Итак, свет представляет собой плоские поперечные электромагнитные волны, в которых происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей. Уравнение плоской световой волны записывается в виде:

$$\begin{aligned} E &= E_m \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \\ B &= B_m \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \end{aligned}$$

где E_m и B_m — амплитуды колебаний векторов напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля; $(\omega t - kz + \varphi_0)$ — фаза колебаний, ω — круговая частота, t — время, $k = \omega/v = \omega n/c = 2\pi n/\lambda$ —

волновое число, z – расстояние от источника волн до точки наблюдения, φ_0 – начальная фаза.

Векторы напряжённостей электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{B}$ полей перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

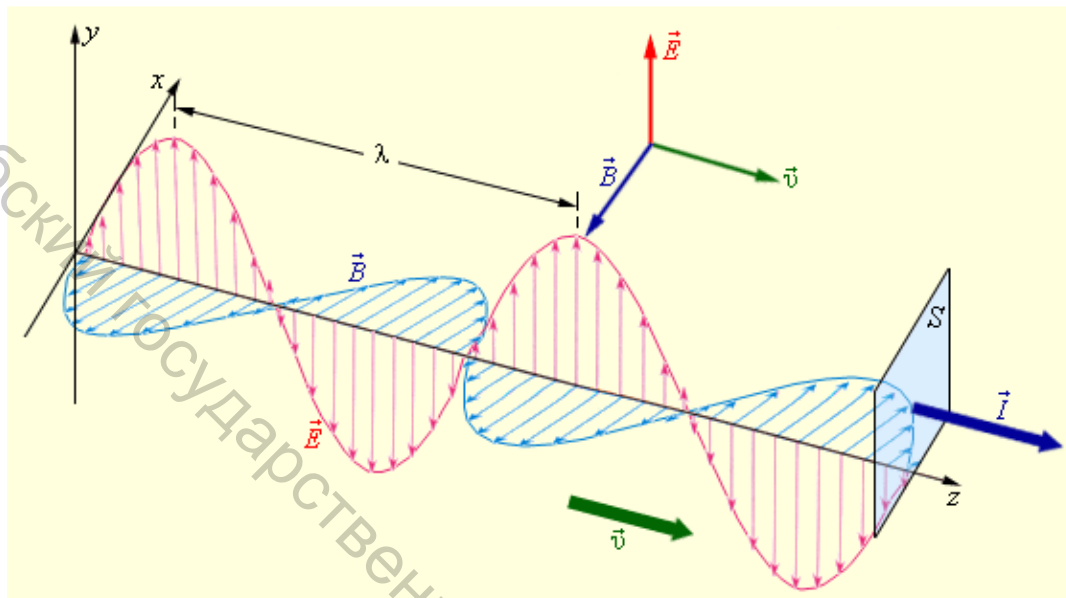


Рисунок 15 – Электромагнитная волна

В электромагнитной волне происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей, которые описываются системой уравнений электромагнитного поля – уравнениями Максвелла. Из теории электромагнитного поля (ЭМП) вытекает ряд важных выводов:

1. Источниками электрического поля являются постоянные электрические заряды и переменные магнитные поля.
2. Источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды и переменные электрические поля.
3. Переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, а переменное электрическое поле – переменное магнитное.

Таким образом, переменные электрические и магнитные поля – это проявление единого электромагнитного поля. ЭМП способно существовать в отсутствии электрических зарядов, и изменение его состояния носит волновой характер.

Электромагнитные волны могут распространяться в любой среде – жидкой, твердой, кристаллической, газообразной и даже в вакууме, в отличие от звуковых волн. В веществе электромагнитные волны распространяются с *конечной скоростью v* :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}, \text{ где } \epsilon \text{ и } \mu - \text{ диэлектрическая и магнитная}$$

проницаемости вещества, характеризующие его электрические и магнитные свойства, ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные: $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,25664 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Скорость электромагнитных волн в вакууме ($\epsilon = \mu = 1$):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Электромагнитные волны переносят **энергию**. Электромагнитную энергию, переносимую волной за единицу времени через поверхность единичной площади, называют интенсивностью $I = \Delta W / (S \cdot \Delta t)$. Из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать давление на поглощающее или отражающее тело. Первые эксперименты по определению этого давления были выполнены П.Н. Лебедевым в 1900 г. Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения электромагнитной теории Максвелла.

Существование давления электромагнитных волн позволило сделать вывод о том, что электромагнитному полю присущ механический **импульс**. А наличие электромагнитного импульса позволяет ввести понятие электромагнитной **массы**.

Таким образом, ЭМП обладает всеми признаками материальных тел — энергией, конечной скоростью распространения, импульсом, массой. Это говорит о том, что электромагнитное поле является одной из форм существования материи.

Раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом называется *оптикой*. Учение о свете принято делить на геометрическую, волновую и квантовую оптику.

Основные законы **геометрической оптики** были известны задолго до установления физической природы света. В основе геометрической оптики лежит представление о световых лучах, закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно, законы отражения и преломления света.

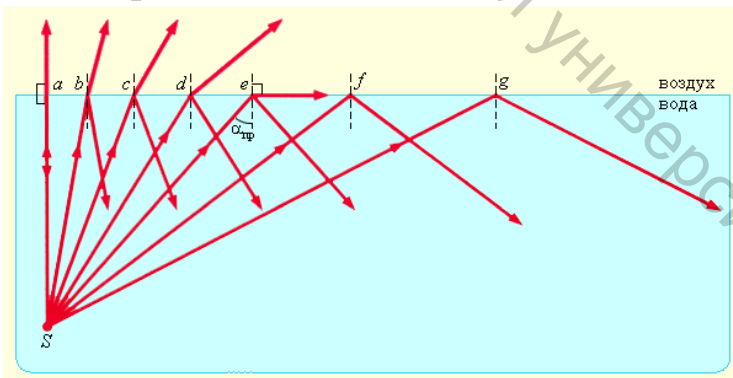


Рисунок 16 – Полное внутреннее отражение света на границе вода-воздух; S – точечный источник света

Абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в среде: $n = c/v$. Среду с меньшим абсолютным показателем преломления называют оптически менее плотной. При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную $n_2 < n_1$ (например, из воды в воздух) можно наблюдать явление полного отражения, то есть исчезновение преломленного луча. Это явление наблюдается при углах падения, превышающих некоторый критический угол α_{np} , который называется предельным углом полного внутреннего отражения – при $\alpha = \alpha_{np}$ $\sin \beta = 1$.

Так, для границы раздела вода-воздух $\alpha_{np} = 48,7^\circ$.

Явление полного внутреннего отражения применяется во многих оптических устройствах. Но наиболее интересным и практически важным применением является создание волоконных световодов, которые представляют собой тонкие (от нескольких микрометров до миллиметров) произвольно изогнутые нити из оптически прозрачного материала (стекло, кварц). Свет, попадающий на торец световода, может распространяться по нему на большие расстояния за счет полного внутреннего отражения от боковых поверхностей.

В **волновой оптике** рассматриваются явления, в которых проявляются волновые свойства света — интерференция, дифракция, поляризация и др.

Интерференция наблюдается при наложении двух или нескольких когерентных (с постоянной разностью фаз) световых волн, в результате чего происходит перераспределение энергии в пространстве, так что в одних местах пространства возникают максимумы интенсивности света, а в других — минимумы.

Первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, был опыт Юнга (1802 г.). Свет от источника, в качестве которого служила узкая щель S , падал на экран с двумя близко расположенными щелями S_1 и S_2 (рис. 17). При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками S_1 и S_2 , находятся в фазе, но в точке наблюдения P фазы этих волн уже различны, т. к. волны проходят разные расстояния r_1 и r_2 . Если в разность оптических длин путей $\Delta = r_2 - r_1$ точно укладывается целое число λ , т. е. $\Delta = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$), то в точке P одновременно окажутся максимумы обеих волн (волны придут в фазе), и амплитуды возрастут. Если же разность хода составляет нечётное число полуволн $\Delta = (2m + 1)\lambda/2$, то максимумы одной волны окажутся в точке P смещёнными на $\lambda/2$ относительно максимумов другой волны, т. е. — в противофазе. В результате наложения этих волн на экране $\mathcal{E}$ наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников S_1 и S_2 распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название *принципа суперпозиции* волн. Из картины проведенного опыта Юнг первым измерил длины волн, составляющие белый свет, и получил 0,7 мкм для красного цвета и 0,42 мкм для фиолетового.

Юнг был первым, кто понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников, т.к. они не будут когерентными. Он интуитивно угадал, что для получения интерференции света нужно волну от одного источника разделить на две когерентные волны и затем наблюдать на экране результат их сложения – так делается во всех интерференционных схемах.

При использовании белого света интерференционные полосы оказываются окрашенными в различные цвета спектра. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на асфальте, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых бабочек и жуков – все это проявление интерференции света.

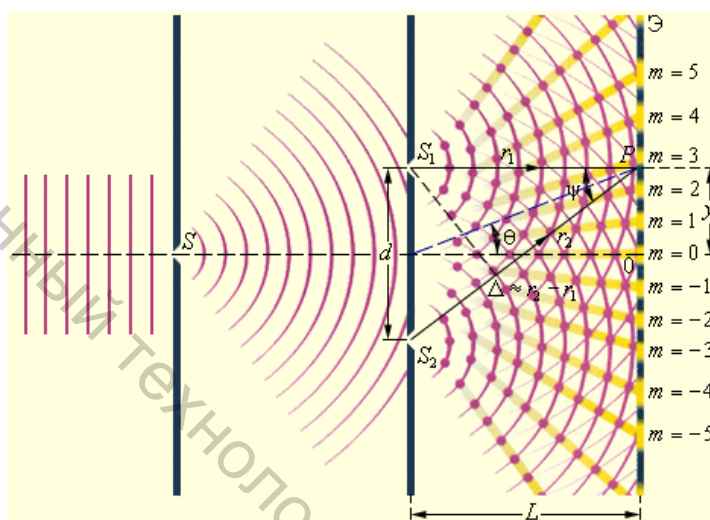


Рисунок 17 – Схема интерференционного опыта Юнга

Дифракцией света называется отклонение света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий. Как показывает опыт, свет при определенных условиях может заходить в область геометрической тени. Дифракция света наглядно проявляется, когда длина падающей световой волны λ сравнима с размерами препятствий или отверстий. Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина – система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

При распространении электромагнитной волны в ней совершают колебания вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ и вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$, которые взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной распространению волны. Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$, поэтому его называют световым вектором. Если при распространении электромагнитной волны световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют **линейно поляризованной** или плоско поляризованной. Плоскость, в которой колеблется световой вектор, называется плоскостью колебаний, а плоскость, в которой совершает колебания вектор магнитной индукции $\vec{B}$ — плоскостью поляризации. Явление поляризации имеет место только для поперечных волн из-за асимметрии относительно направления распространения. Для продольных волн направление распространения луча является осью симметрии, поэтому в продольной волне все направления в плоскости, перпендикулярной лучу, равноправны.

Квант света, излученный атомом, поляризован всегда. Однако свет, испускаемый обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. п.), в каждый момент состоит из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора в излучаемых этими атомами волнах. Поэтому в результирующей волне вектор беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными — такой свет называется неполяризованным. Световой луч можно уподобить нити, состоящей из множества свитых волнистых волокон — для поляризации луча надо привести этот хаос в порядок, что и делают поляризационные фильтры.

Дисперсия света наблюдается в виде разветвления света в спектр, например, при прохождении его через призму. Ньютон провел много опытов с призмой, восхищаясь яркими цветами спектра. Он выделил диафрагмой зеленый луч и направил его на другую призму, но луч уже не разложился на составляющие. Такие лучи Ньютон назвал монохроматическими (от греч. *monochromatos* — одноцветный).

Все среды обладают дисперсией — зависимостью показателя преломления от длины волны или от частоты ω (кроме абсолютного вакуума). Обычно n растет с увеличением ω , но бывает и наоборот, тогда дисперсию называют аномальной. Дисперсия искажает форму сигнала при распространении в среде.

Спектр

Спектр — это совокупность значений какой-либо величины, характеризующей систему или процесс. В физике используют

частотный спектр электромагнитных или акустических колебаний, спектр энергий, импульсов или масс. Он может быть дискретным или непрерывным (сплошным). Спектр электромагнитных колебаний является сплошным.

Свет играет чрезвычайно важную роль в нашей жизни. Подавляющее количество информации об окружающем мире человек получает с помощью света. Свет пересекает огромные пространства, доставляя нам сведения о Солнце и звездах, и этим он отличается от звука, которому обязательно нужна среда от источника до нашего уха, чтобы быть «услышанным».

В оптике как разделе физики под светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие диапазоны спектра электромагнитного излучения – инфракрасный (ИК) и ультрафиолетовый (УФ). По своим физическим свойствам видимый свет принципиально неотличим от электромагнитного излучения других диапазонов – различные участки спектра отличаются друг от друга только длиной волны λ и частотой ν .

Для измерения длин волн в оптическом диапазоне используются единицы длины: нанометр (нм) — $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ и микрометр (мкм) — $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$. Видимый свет занимает диапазон приблизительно от 400 нм до 780 нм или от 0,40 мкм до 0,78 мкм.

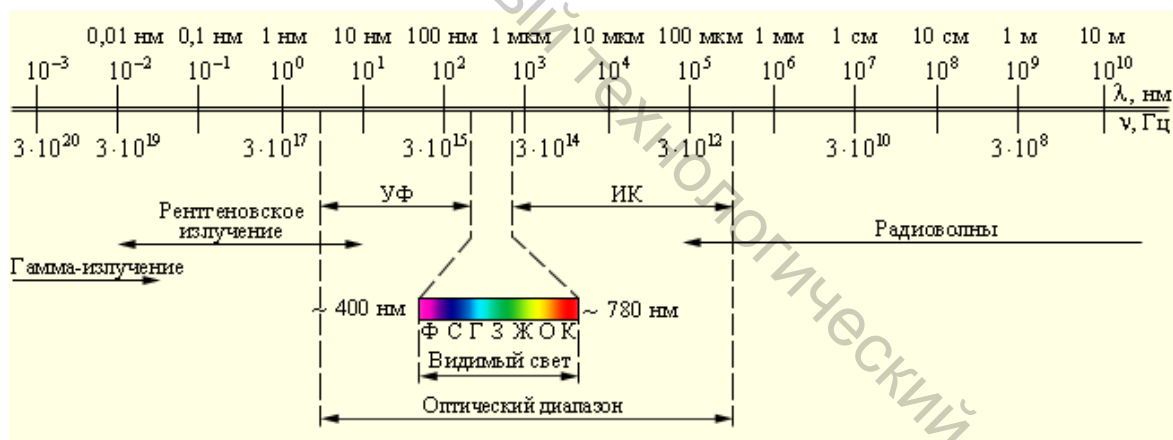


Рисунок 18 – Шкала электромагнитных волн

Электромагнитная теория света позволила объяснить многие оптические явления, такие как интерференция, дифракция, поляризация и т. д. Однако эта теория не завершила понимание природы света. Уже в начале XX века выяснилось, что эта теория недостаточна для истолкования явлений атомного масштаба, возникающих при взаимодействии света с веществом. Для объяснения таких явлений, как излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона и др. потребовалось введение квантовых представлений. Наука вновь вернулась к идее корпускул – световых квантов.

Тема 7. Квантово-полевая картина мира

Тепловое излучение

Тепловое излучение — наиболее распространенный в природе вид электромагнитного излучения, которое совершается за счет энергии теплового движения молекул в веществе, поэтому понижает температуру тела. Однако наряду с излучением происходит и поглощение теплоты, в результате температура тела может поддерживаться постоянной – в этом случае говорят, что тело находится в *тепловом равновесии*.

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то, как показывает опыт, такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. Тела обмениваются энергией только путем испускания и поглощения лучистой энергии. В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга, и в пространстве между телами плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел. Это излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется **равновесным** или черным **излучением**. Плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав зависят только от температуры.

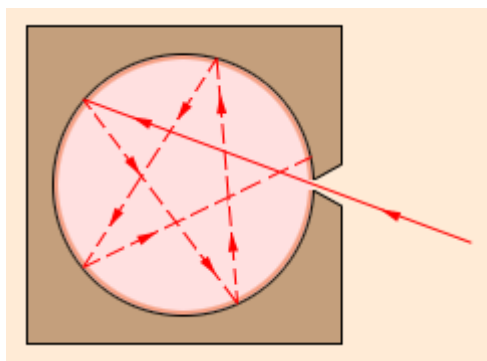


Рисунок 19 – Модель абсолютно чёрного тела

Модель абсолютно черного тела, поглощающего все падающее на него излучение не отражая, предложил Г. Кирхгоф (1862). Если тело отражает все падающее на него излучение, его называют белым. Все реальные тела являются серыми. К излучению черного тела близки поверхности звезд и сажа, а к белому — свежий снег.

При заданной температуре собственное тепловое излучение абсолютно черного тела, находящегося в состоянии теплового равновесия с излучением, должно иметь тот же спектральный состав, что и окружающее это тело равновесное излучение. В противном случае равновесие между абсолютно черным телом и окружающим его излучением не могло бы установиться. Интенсивность излучения любого тела может быть определена исходя из излучения черного тела, если известны поглощение и показатель преломления данного тела (1859). Поэтому задача свелась к исследованию равновесного излучения, и проблема излучения черного

тела стала одной из центральных в физике, приведя к созданию квантовой теории.

Закон равновесного теплового излучения установил Кирхгоф: отношение испускательной способности тела к поглощательной не зависит от природы излучающего тела, а является функцией от частоты и температуры — *функция Кирхгофа* $K(f, T)$, которая универсальна для всех тел. Для абсолютно черного тела она равна его испускательной способности. Он вывел этот закон из второго начала термодинамики и показал, что состояние равновесия характеризуется вполне определенным распределением плотности энергии излучения, заключенной в этой полости.

В 1884 г. Л. Больцман впервые применил понятия термодинамики (давление P и температуру T) к тепловому излучению и получил, что энергия равновесного излучения пропорциональна T^4 , а давление — $1/3$ объемной плотности энергии. Такую же зависимость на основе анализа экспериментальных данных получил ранее Дж. Стефан в 1879 г. Закон Стефана-Больцмана о суммарной энергии спектра имеет вид: $R = \sigma T^4$, где R — суммарная спектральная светимость, $\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана-Больцмана.

Лорд Рэлей и Дж. Джинс, объясняя тепловое излучение на основе классической электромагнитной теории, получили, что при распределении энергии излучения по длинам волн на долю длинных волн приходится лишь небольшая часть энергии, которая быстро растет с уменьшением длины волны. Рэлей считал распределение энергии по степеням свободы системы равномерным и получил формулу, в которой удельная интенсивность излучения оказалась пропорциональной квадрату частоты и абсолютной температуре (1900). Спектральная плотность росла с частотой, и возникал парадокс — полная энергия, излучаемая черным

телом при всех температурах бесконечна! Этот парадокс получил название «ультрафиолетовой катастрофы», т. к. излучаемая энергия обращалась в бесконечность с увеличением частоты (в ультрафиолетовом диапазоне). Для малых частот формула Рэрея отвечала экспери-

менту, но с увеличением частоты экспериментальная кривая имела горб, который при повышении температуры поднимался и сдвигался влево.

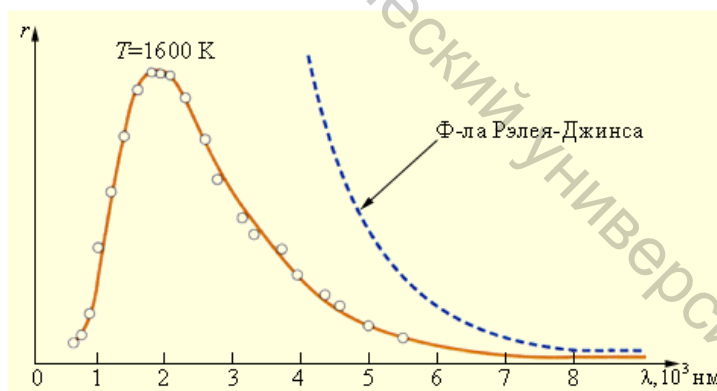


Рисунок 20 — Сравнение закона распределения энергии по длинам волн $r(\lambda, T)$ с формулой Рэрея-Джинса

Это означало, что распределение излучаемой энергии имеет максимум на некоторой длине волны, и чем горячее тело, тем дальше максимум сдвигается в видимую область к синему концу спектра. В 1893 г. В. Вин установил **закон смещения**, согласно которому длина волны λ_m , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре $\lambda_m = b/T$, где $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ м·К — постоянная Вина. Продолжив исследования законов теплового излучения Вин в 1896 г. получил формулу, описывающую распределение энергии в спектре черного тела, но позже выяснилось, что она справедлива только для коротких длин волн.

Поскольку закон Вина годился только для коротких волн, а формула Рэлея — для длинных, ученик Больцмана М. Планк поставил достаточно скромную цель — получить эмпирическую формулу, которая бы переходила в предельных длинах волн в формулы Рэлея и Вина. Планк ввел поправку в теорию Рэлея: интеграл, который становится бесконечным по мере уменьшения длин волн, он заменил суммой элементов, которые сгруппировал так, что сумма оставалась конечной. **Гипотеза Планка** состояла в следующем: процессы излучения и поглощения электромагнитной энергии нагретым телом происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а дискретно, конечными порциями — квантами.

Квант — это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По теории Планка, энергия кванта E прямо пропорциональна частоте света:

$$E = hf, \quad \text{где } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \text{ — постоянная Планка.}$$

Формула, полученная Планком, хорошо описывает спектральное распределение излучения черного тела при любых частотах и прекрасно согласуется с экспериментальными данными. Из неё можно вывести законы Стефана-Больцмана и Вина, а при $hf \ll kT$ формула Планка переходит в формулу Рэлея-Джинса. Так Планк совершил шаг от формулы Рэлея к эмпирическому закону Вина и огромный скачок в понимании не только микромира, но и всей природы.

Результаты своих исследований Планк доложил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества — этот день считается днем создания квантовой физики. Поскольку понятие кванта действия послужило в дальнейшем ключом к пониманию всех свойств атомной оболочки и атомного ядра, то этот день можно считать началом всей атомной физики, химии и биологии, началом новой эры в естествознании.

Корпускулярные свойства света

Следующий шаг в развитии квантовых представлений сделал А. Эйнштейн. Когда утвердилась теория электромагнитного поля Максвелла, обнаружились световые явления — фотоэлектрический эффект, эффект Комптона и др., которые не могли быть объяснены с ее помощью.

Явление *фотоэффекта*, которое состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света, впервые наблюдал Г. Герц в 1887 г. Законы фотоэффекта, полученные из опытов, показали, что между пластинами возникает электрический ток, который сначала быстро растет, а затем переходит к насыщению. Причем фототок насыщения зависит только от мощности падающего на пластину светового потока. Энергия испускаемых электронов определяется частотой падающего света и природой вещества, и не зависит от интенсивности поглощаемого излучения. Эти законы не соответствовали представлениям волновой теории света — волна не может выбивать электроны из катода.

В 1905 г. Эйнштейн, расширив гипотезу Планка, пришёл к выводу, что свет не только излучается и поглощается дискретными порциями — квантами, но и состоит из них, т. е. свет имеет прерывистую (дискретную) структуру. Назвав кванты электромагнитного излучения *фотонами*, он стал рассматривать световой поток как поток квантов с энергией $E = hf$, падающих на пластинку. Энергия порции света затрачивается на совершение работы по вырыванию электрона и сообщению ему кинетической энергии:

$$hf = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Если величина $E = hf < A_{\text{вых}}$, то эффект не наблюдается; значит, со стороны больших длин волн существует предел, зависящий от облучаемого тела. Красная граница фотоэффекта — определенная длина волны излучения, начиная с которой наблюдается ток, — связана с разной работой выхода фотоэлектрона из разных металлов. Если же величина $E = hf > A_{\text{вых}}$, то энергия освобожденного электрона равна энергии кванта, уменьшенной на работу выхода. При этом скорость фотоэлектронов увеличивается с частотой падающего излучения и не зависит от его плотности.

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах — корпускулах. Но это не был механический возврат к корпускулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой — фотон сочетает в себе свойства и

частицы, и волны одновременно. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом — корпускулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название корпускулярно-волнового дуализма.

Строение атома

Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества возникло еще в античные времена, но только в XVIII веке трудами А. Лавуазье, М.В. Ломоносова и других ученых была доказана реальность существования атомов. Но вопрос об их внутреннем устройстве даже не возникал, и атомы по-прежнему считались неделимыми частицами. В 1833 г. при исследовании явления электролиза М. Фарадей установил, что ток в растворе электролита — это упорядоченное движение заряженных частиц — ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл. На основании исследований Фарадея можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

В 1897 году Дж. Томсон открыл электрон и измерил отношение заряда электрона к массе e/m . Опыты Томсона подтвердили вывод о том, что электроны входят в состав атомов. С открытия электрона — мельчайшей порции электричества или «атома электричества» — атом перестал считаться неделимым (Дж. Томсон, 1897 г.), начался век атомной физики. Из многочисленных опытов с пропусканием электронов через вещество Дж. Томсон заключил, что число электронов в атоме связано с величиной атомной массы. Но в нормальном состоянии атом должен быть электрически нейтрален, поскольку вещество, состоящее из атомов, нейтрально, и поэтому в каждом атоме количества зарядов разных знаков равны. Атом нейтрален, значит, в нем должны быть другие частицы с положительным зарядом, которые еще не были открыты.

Поскольку масса электрона составляет примерно $1/2000$ массы атома водорода, то масса положительного заряда должна быть в 2000 раз больше массы электрона. Например, у водорода почти вся масса связана с положительным зарядом. Идея о строении всех атомов из атомов водорода высказывалась еще в 1815 г. английским врачом У. Праутом.

Открытие спектрального анализа и Периодической системы химических элементов свидетельствовали о том, что атом — это сложная структура с внутренними движениями составных частей. Стали появляться и модели его строения.

Первая попытка создания модели атома на основе накопленных экспериментальных данных (1903 г.) принадлежала Дж. Томсону. Он

считал, что атом представляет собой электронейтральную систему шарообразной формы радиусом, примерно равным 10^{-10} м. Положительный заряд атома равномерно распределен по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него — так называемая «пудинговая» модель.

Первые прямые эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены учеником Томсона Э. Резерфордом и его сотрудниками Э. Марсденом и Х. Гейгером в 1909 – 1911 гг. Результаты этих опытов привели Резерфорда к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро, диаметр которого не превышает $10^{-14} - 10^{-15}$ м, а масса составляет не менее 99,95 % массы атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.

Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил *планетарную модель атома*, согласно которой в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, а вокруг ядра, подобно планетам, под действием кулоновских сил со стороны ядра вращаются электроны; в целом атом нейтрален (рис. 21).

Планетарная модель атома, предложенная Резерфордом, несомненно явилась крупным шагом вперед в развитии знаний о строении атома, однако она оказывалась несовместимой с электродинамикой Максвелла. По законам классической электродинамики, движущийся с ускорением заряд должен излучать электромагнитные волны, уносящие энергию. За короткое время ($\sim 10^{-8}$ с) все электроны в атоме Резерфорда должны растратить всю свою энергию и упасть на ядро. То, что этого не происходит в устойчивых состояниях атома, показывает, что внутренние процессы в атоме не подчиняются классическим законам. Получалось, что с признанием модели атома Резерфорда следует пересмотреть классическую электродинамику, которая уже стала основой электромагнитной картины мира. Резерфорд понимал, что “его” атом обречен.

Но в 1913 году Резерфорду пришел пакет от молодого Нильса Бора с наброском его первой работы по квантовой теории строения атома. В этой статье Бор писал: “...существование мира постоянно

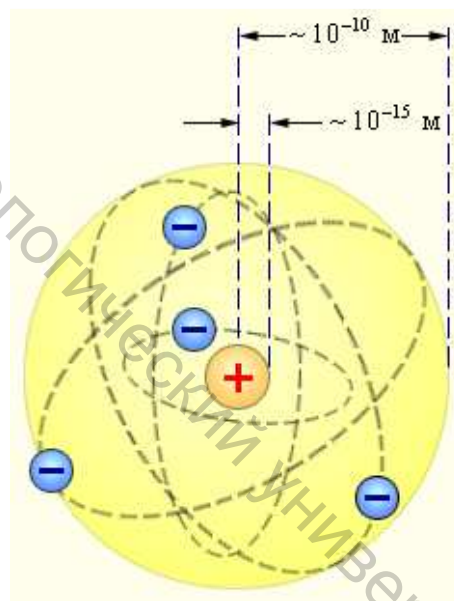


Рисунок 21 – Планетарная модель атома Резерфорда

доказывает, что атом — устойчивая система. Значит, электроны, вращаясь вокруг ядра, вопреки Максвеллу-Лоренцу, не излучают непрерывно. Так, если это не происходит и они, обессиленные, не падают на ядро, не проще ли предположить, что в атоме есть пути, на которых электроны не растрачивают энергию: стационарные орбиты! Только покидая такую орбиту, электрон начинает излучать...” По существу в этих словах выражено содержание знаменитых постулатов Бора, с которых и началась квантовая механика — новая физика.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.

Второй постулат Бора (правило частот) формулируется следующим образом: при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$hf_{nm} = E_n - E_m.$$

Правильность предположений Бора могло подтвердить только хорошее согласие с экспериментом. Простейший из атомов, атом водорода явился своеобразным тест-объектом для теории Бора — ко времени создания теории он был хорошо изучен экспериментально. Было известно, что он содержит единственный электрон, а ядром атома является протон — положительно заряженная частица, заряд которой равен по модулю заряду электрона, а масса в 1836 раз превышает массу электрона.

Еще в начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в видимой области излучения атома водорода, так называемый линейчатый спектр. Впоследствии закономерности, которым подчиняются длины волн (или частоты) линейчатого спектра, были хорошо изучены количественно (И. Бальмер, 1885 г.). Совокупность спектральных линий атома водорода в видимой части спектра была названа серией Бальмера. Позже аналогичные серии спектральных линий были обнаружены в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. В 1890 г. И. Ридберг получил эмпирическую формулу для частот спектральных линий:

$$f_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где } R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц} — \text{постоянная Ридберга.}$$

Для серии Бальмера $m = 2$, $n = 3, 4, 5, \dots$.

Для ультрафиолетовой серии (Лаймана) $m = 1$, $n = 2, 3, 4, \dots$.

До Бора механизм возникновения линейчатых спектров и смысл целых чисел, входящих в формулы спектральных линий водорода и ряда других атомов, оставались непонятными. Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой энергетических уровней, каждый из которых соответствует определенному стационарному разрешённому состоянию. Состояние с наименьшей энергией E_1 определили как основное состояние, а остальные разрешенные — как возбужденные. Пороговая энергия равна разности между первым возбужденным и основным состояниями. Так возникло представление о *квантах энергии*. Ряд разрешенных значений энергий атома обычно называют его спектром. То, что электрон может находиться только на определенных орбитах, сразу объясняло линейчатый спектр атомов — электрон испускает свет только при переходе с одной орбиты на другую, т. е. дискретными порциями, и не излучает, находясь на дозволенной орбите.

Постулаты Бора определили направление развития квантовой физики атома, но они не содержали рецепта определения параметров стационарных состояний (орбит) и соответствующих им значений энергии E_n . Правило квантования, приводящее к согласующимся с опытом значениям энергий стационарных состояний атома водорода, Бором было угадано. Он предположил, что момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка. Для круговых орбит **правило квантования Бора** записывается в виде:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

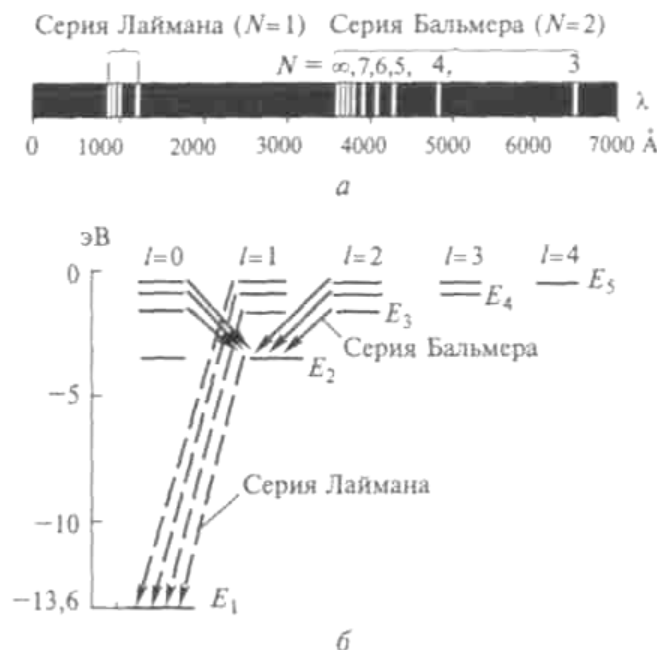


Рисунок 22 – Спектральные серии атома водорода:

а – возможные линии в спектре,
б – переходы, отвечающие сериям Лаймана и Бальмера

Здесь m_e – масса электрона, v_n – скорость электрона на n -ной орбите, r_n – радиус n -ной стационарной круговой орбиты, целое число n называется **главным квантовым числом**.

Правило квантования Бора позволяет вычислить радиусы стационарных орбит электрона в атоме водорода и определить значения энергий. Радиус первой орбиты называется боровским и равен $r_1 = a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м.

Полная механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положительно заряженного ядра, отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии $E_n < 0$. При $E_n \geq 0$ электрон удаляется от ядра, т. е. происходит *ионизация*. При больших квантовых числах $n \gg 1$ дискретные уровни постепенно сближаются, и возникает плавный переход в область непрерывного спектра, вытекающего из классической физики.

Таким образом, законы квантовой механики при больших значениях квантовых чисел переходят в законы классической механики. Это так называемый *принцип соответствия*, сформулированный Бором: всякая новая теория является развитием предыдущих теорий и полностью её не отвергает, а лишь указывает границы её применимости.

Прекрасное согласие боровской теории атома водорода с экспериментом служило веским аргументом в пользу ее справедливости. Стали понятны процессы поглощения и испускания энергии веществом; сходства и отличия химических элементов, внутренний смысл Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева, природа химической связи и механизмы химических реакций; появились совершенно новые приборы, в которых движение электронов играли определяющую роль. Однако попытки применить эту теорию к более сложным атомам не увенчались успехом. Кроме того, Бор не смог дать физическую интерпретацию правилу квантования — это было сделано десятилетием позже де Бройлем на основе представлений о волновых свойствах частиц.

Корпускулярно-волновой дуализм

Французский физик Луи де Бройль в 1924 г. предложил рассматривать дискретные состояния электрона в атоме как волновые явления. Де Бройль предположил, что каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по окружности около ядра атома. Стационарная орбита возникает в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра. Другими словами, стационарная орбита соответствует круговой стоячей волне де Бройля на длине орбиты. Это предположение дало возможность объяснить, почему электрон при своем движении вокруг

ядра не излучает энергию (стоячая волна не излучает и не поглощает энергию).

В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн λ , т. е. $n\lambda_n = 2\pi r_n$. Подставляя в это соотношение длину волны де Бройля $\lambda = h/p$, где $p = m_e v$ — импульс электрона, получим:

$$n\lambda_n = n \frac{h}{p} = n \frac{h}{m_e v_n} = 2\pi r_n$$

или

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}.$$

Таким образом, боровское правило квантования связано с волновыми свойствами электронов. В 1927 г. Дэвис и Джермер доказали, что электрон обладает волновыми свойствами — свойствами интерференции и дифракции.

В 1926 г. Э. Шредингер вывел фундаментальное уравнение квантовой механики — волновое уравнение, в которое входит функция $\psi(x, y, z)$, зависящая от трех координат движения электрона и являющаяся аналогом амплитуды. Квадрат волновой функции имеет определенный физический смысл — он характеризует вероятность нахождения электрона в данной точке атомного пространства с координатами x, y, z . Из уравнения Шредингера следует, что нельзя говорить о какой-то определенной боровской орбите, по которой движется электрон. Более правильно говорить об электронном облаке, а именно, о его наибольшей плотности в каком-то месте атома. И там, где плотность наибольшая, там и есть наибольшая вероятность нахождения данного электрона. Сказать же точно, где он находится в данный момент времени в атоме, мы не можем потому, что это невозможно вообще. И представить себе электрон мы не можем, потому что в нашем мире нет наглядных объектов, с которыми можно было бы его сопоставить.

Пространство вокруг ядра, в котором наиболее вероятно находится электрон, называется орбиталью. Эти орбитали и есть решения уравнения Шредингера, которые характеризуются тремя квантовыми числами n, l, m :

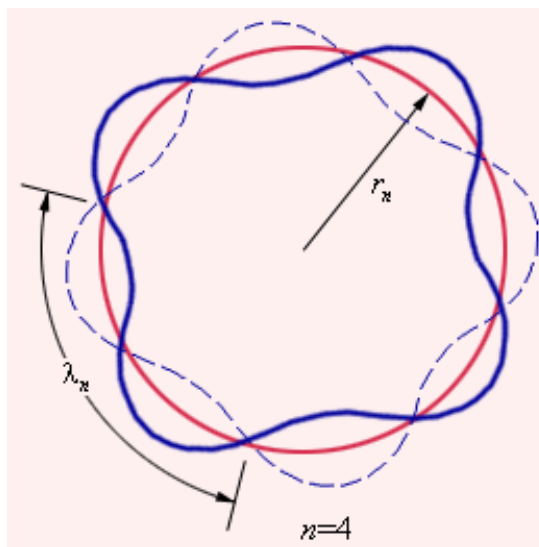


Рисунок 23 – Иллюстрация идеи де Бройля возникновения стоячих волн на стационарной орбите для случая $n = 4$

n — главное квантовое число, которое определяет размер атома (n принимает значения от 1 до бесконечности) и показывает энергетический уровень электрона в атоме. Чем больше n , тем более высокой энергией обладает электрон. Если $n \gg 1$, то энергетический уровень образует не дискретный спектр, а сплошной, то есть, это уже объект макромира.

l — орбитальное квантовое число, которое характеризует форму электронного облака, изменяется от 0 до $(n-1)$, т.е. зависит от главного квантового числа, и определяет значение момента количества движения электрона по орбите.

m — магнитное квантовое число, показывает ориентацию электронного облака в атоме при взаимодействии магнитного поля электрона с внешним магнитным полем и магнитными полями соседних электронов.

Кроме того, электрон, как находящийся внутри атома, так и свободный, имеет некий внутренний, так называемый собственный момент импульса, называемый *спином* $S = sh$, где s — спиновое квантовое число, которое может принимать значения $\pm 1/2$.

Таким образом, электрон в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами n, l, m, s , выражающими четыре физических величины: энергию, орбитальный момент количества движения, его проекцию на выделенное направление в пространстве (направление магнитного поля) и такую же проекцию спинового момента.

В 1928 г. Паули сформулировал принцип, позволивший объяснить расположение атомных электронов по оболочкам: в атоме не может быть электронов, у которых все квантовые числа равны, т. е. не может быть двух электронов в одинаковых энергетических состояниях — **принцип Паули**.

Итак, электрон как и фотон сочетает в себе свойства и частицы, и волны одновременно. Позже было доказано, что такая двойственность присуща вообще всем микрообъектам.

Впервые *гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма* выдвинул Луи де Бройль: любой микрообъект может проявлять как волновые, так и корпускулярные свойства. Он развил представления Эйнштейна о двойственной природе света, распространив их на вещество. Для этого он объединил формулу Планка $E = hf$ и формулу Эйнштейна $E = mc^2$ и получил соотношение, показывающее, что любой частице при определенных массе и скорости соответствует своя длина волны $\lambda = h/p$.

Обычно под частицей мы понимаем нечто локализованное в пространстве — согласно классической теории, частица в каждый данный момент занимает вполне определенное положение и имеет точно определенную скорость движения. Однако волну нельзя локализовать в пространстве, и поэтому любое измерение положения

объекта, обнаруживающего волновые свойства, принципиально сопряжено с неопределенностью.

Соотношения, которые дают возможность увидеть, как связаны между собой неопределенности при определении координаты и импульса, энергии и времени жизни микрообъекта были введены в 1927 г. В. Гейзенбергом.

1. Для частиц, обладающих корпускулярно-волновым дуализмом нельзя одновременно определить точно и координату, и импульс. Чем точнее определяется координата, тем менее точно можно определить импульс.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}, \quad \text{где } \Delta x \text{ — это неопределенность нахождения координаты, а } \Delta p \text{ — неопределенность нахождения импульса.}$$

2. Изменение энергии и среднее время жизни возбужденной частицы также нельзя измерить одновременно.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}, \quad \text{где } \Delta E \text{ — средняя ширина энергетического уровня, а } \Delta t \text{ — среднее время жизни микрообъекта.}$$

Если эти произведения сравнимы с постоянной Планка, то поведение частицы описывается квантовой механикой. Если они много больше постоянной Планка, то поведение частицы описывается классической механикой. Но ни для какого движения в природе эти произведения не будут меньше постоянной Планка.

Принцип неопределенности Гейзенберга является одним из проявлений корпускулярно-волнового дуализма излучения и вещества. Принципиальная неопределенность некоторых величин есть следствие применения классических понятий к описанию неклассических объектов. Квантовая теория не может предсказать результат отдельного события, а лишь предсказывает вероятность того или иного результата — в этом и состоит основной смысл принципа неопределенности.

Соотношение неопределенностей — частный случай и конкретное выражение общего **принципа дополнительности**, сформулированного Н. Бором в 1927 г.: получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих частицу, неизбежно связано с потерей информации о других величинах, дополнительных к первой.

Бор применял этот принцип во многих областях. Так, например, физическая картина явления и его математическое описание дополнительные. Создание физической картины требует пренебрежения

детальями и уводит от математической точности, а попытка точного математического описания затрудняет его ясное понимание.

Таким образом, борьба идей дискретности и непрерывности материи завершилась слиянием обеих идей в представлении о корпускулярно-волновых свойствах элементарных частиц.

Элементарные частицы

Элементарными называют частицы, входящие в состав прежде «неделимого» атома. Первыми были обнаружены электрон, протон, нейтрон и фотон — квант электромагнитного поля. Из первых трех строили вещество, а фотон осуществлял взаимодействие между ними. Считали, что они ни на что далее не могут быть разложены и потому являются «первичными кирпичиками» мироздания. Потом оказалось, что эти элементарные частицы имеют внутреннюю структуру и могут друг в друга превращаться.

Позднее было открыто еще много частиц, претендующих на «элементарность». Более того, у каждой частицы, кроме фотона, оказалась еще и античастица. На данный момент насчитывается уже более трёхсот элементарных частиц.

Всё наблюдаемое вещество состоит из фотонов, лептонов (электроны, мюоны, нейтрино) и кварков. Помимо переносимых фотонами электромагнитных взаимодействий существуют сильные ядерные взаимодействия, связывающие кварки в барионы (протоны, нейтроны и пр.) и мезоны и слабые ядерные взаимодействия, которые ответственны за распад частиц. Все они описываются единой нелинейной теорией, обобщающей уравнения Максвелла.

Основными характеристиками элементарных частиц являются масса, электрический заряд, спин, среднее время жизни, магнитный момент, пространственная четность, барионный заряд и квантовые числа.

Массу покоя элементарных частиц определяют по отношению к массе покоя электрона m_e , самой маленькой из масс покоя. Так, нейтрон и протон тяжелее электрона почти в 2000 раз, а фотоны вообще не имеют массы покоя. По массе частицы делят на лептоны (электрон и нейтрино), мезоны — с массой от 1 до 1000 m_e и барионы (протоны, нейтроны, гипероны и др.) — с массой более 1000 m_e .

Электрический заряд Q может принимать значения от нуля до $\pm nq_e$, где q_e — заряд электрона, n — целые числа. Каждой частице, кроме фотона, нейтрино и двух мезонов, соответствует частица с противоположным зарядом, или античастица. В 1963 г. была высказана гипотеза о существовании частиц с дробным зарядом — кварков.

Спин — одна из важнейших характеристик элементарных частиц. Она определяется собственным моментом импульса частицы. Спин фотона равен 1 — это означает, что частица примет тот же вид после

полного оборота на 360° . Частица со спином $1/2$ примет прежний вид при обороте, в 2 раза большем, т. е. на 720° . Спин протона, нейтрона и электрона — $1/2$. Существуют частицы со спином $3/2$, $5/2$ и т. д. Частица со спином, равным нулю, одинаково выглядит при любом угле поворота. В зависимости от значения спина все частицы делят на две группы:

— фермионы (в честь Э. Ферми) — с полуцелыми ($1/2$, $3/2$, ...) спинами, которые составляют вещество и, в свою очередь, делятся на лептоны (от греч. leptos — легкий) и кварки. Кварки входят в состав протонов, нейтронов и других подобных им частиц, называемых в совокупности адронами (от греч. adros — сильный).

— бозоны (в честь Ш. Бозе) — это частицы с целыми спинами (0, 1, 2), которые являются переносчиками взаимодействий. Каждое из четырёх видов взаимодействий переносится своим типом бозонов: фотоны — электромагнитные взаимодействия, гравитоны — гравитационные взаимодействия, восемь глюонов переносят сильные ядерные взаимодействия, связывающие кварки, и промежуточные векторные бозоны переносят слабые взаимодействия, ответственные за некоторые распады частиц.

Существует три поколения лептонов:

- первое поколение: электрон, электронное нейтрино;
- второе поколение: мюон, мюонное нейтрино;
- третье поколение: тау-лептон, тау-нейтрино;

плюс соответствующие античастицы, т. е. всего их 12.

Таким образом, в каждое поколение входит отрицательно заряженный (с зарядом $-1e$) лептон, положительно заряженный (с зарядом $+1e$) антилептон и нейтральные нейтрино и антинейтрино. Все они обладают ненулевой массой, хотя масса нейтрино весьма мала по сравнению с массами других элементарных частиц.

Среди лептонов наиболее известны электрон и нейтрино — самый распространенный лептон во Вселенной и в то же время самый неуловимый. Мюон — тоже широко распространенный в природе лептон. Это нестабильная частица, которая за две миллионные доли секунды распадается на электрон и два нейтрино. Фоновое космическое излучение по большей части состоит из мюонов. Третий заряженный лептон — тау-лептон, который тяжелее электрона в 3500 раз был обнаружен в конце 70-х гг.

Кварк — фундаментальная частица, обладающая электрическим зарядом, кратным $q_e/3$, и не наблюдающаяся в свободном состоянии. Кварки являются точечными частицами вплоть до масштаба примерно $0,5 \times 10^{-19}$ м, что примерно в 20 тысяч раз меньше размера протона.

Существует три поколения кварков:

- первое поколение: нижний, верхний;

- второе поколение: странный, очарованный;
- третье поколение: прелестный, истинный;

плюс соответствующие античастицы, т. е. всего их 12.

В каждом поколении один кварк обладает зарядом $+2/3 q_e$, а другой — $-1/3 q_e$. Кварки могут соединяться тройками, составляя барионы, либо парами: кварк — антикварк, составляя мезоны (промежуточные частицы). Тогда в комбинации они дадут заряд 0 или 1.

Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях. Для калибровочного описания сильного взаимодействия постулируется, что кварки обладают дополнительной внутренней характеристикой, называемой «цвет». Сильные взаимодействия (обмен глюоном) могут изменять цвет кварка, но не меняют его аромат. Слабые взаимодействия, наоборот, не меняют цвет, но могут менять аромат.

Необычные свойства сильного взаимодействия приводят к тому, что одиночный кварк не может удалиться на какое-либо заметное расстояние от других кварков, а значит, кварки не могут наблюдаться в свободном виде — это явление получило название **конфайнмент**. Разлететься могут лишь «бесцветные» комбинации кварков — адроны.

Адронов существует очень много, поэтому часто их считают не элементарными частицами, а составленными из других. Они бывают электрически заряженными и нейтральными. Все адроны участвуют в сильном, слабом и гравитационном взаимодействиях. Среди них самые известные — протон и нейтрон. Остальные живут очень мало, распадаясь за 10^{-6} с за счет слабого взаимодействия или за 10^{-23} с — за счет сильного.

Все обычное вещество состоит из частиц первого поколения. Протон, например, состоит из двух «верхних» кварков и одного «нижнего», нейтрон — из двух «нижних» и одного «верхнего». А из сильно связанных протонов и нейтронов состоит атомное ядро, окружённое электронным облаком.

Строение атомного ядра

В протонно-нейтронной модели ядро характеризуется *зарядовым числом* Z или атомным номером — порядковым номером в периодической таблице Менделеева. Заряд ядра равен Ze , где e — элементарный заряд. По современным измерениям заряд протона в точности равен элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а масса протона $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$ кг.

Число нейтронов обозначают символом N . Протоны и нейтроны принято называть нуклонами. Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) называют массовым числом $A = Z + N$.

Ядра химических элементов обозначают символом A_ZX , где X – химический символ элемента.

Ядра с одинаковым Z и разными A называют *изотопами*. Большинство элементов в природе встречается именно в смеси изотопов.

Масса любого ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

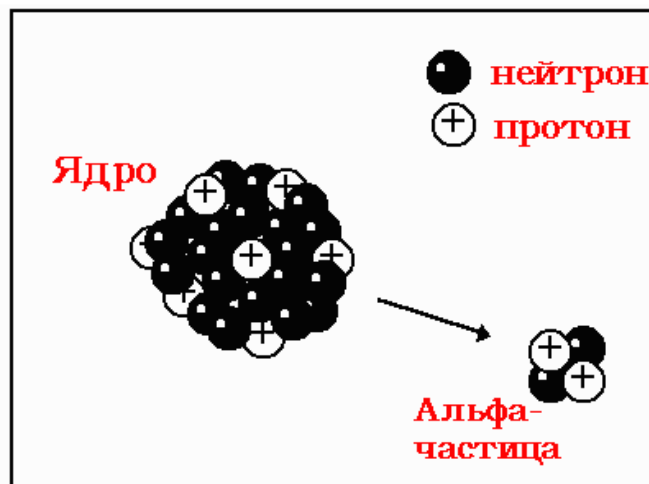


Рисунок 24 — Состав атомного ядра

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

Разность масс $\Delta M = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})$ – называется дефектом массы.

По дефекту массы можно определить энергию, выделившуюся при образовании данного ядра, т. е. энергию связи ядра $E_{\text{св}} = \Delta Mc^2$.

Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы. Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц в виде излучения γ -квантов.

Энергию связи, приходящуюся на один нуклон $E_{\text{св}}/A$ называют *удельной энергией связи*. Удельная энергия связи нуклонов у разных атомных ядер неодинакова. При переходе к тяжелым элементам наблюдается уменьшение удельной энергии связи, что объясняется увеличением энергии кулоновского отталкивания протонов (рис. 25).

Наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра элементов средней части системы Менделеева. Это означает, что существуют две возможности получения положительного энергетического выхода при ядерных превращениях:

- деление тяжелых ядер на более легкие;
- слияние легких ядер в более тяжелые.

В обоих этих процессах выделяется огромное количество энергии. В настоящее время оба процесса осуществлены практически: реакции деления и термоядерные реакции.

Почти 90 % из 2500 известных атомных ядер нестабильны. Нестабильное ядро самопроизвольно превращается в другие ядра с испусканием частиц — это свойство ядер называется **радиоактивностью**.

Явление радиоактивности было открыто в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем. В последующие годы было установлено, что радиоактивные ядра могут испускать частицы трех видов: положительно и отрицательно заряженные и нейтральные. Эти три вида излучений были названы α -, β - и γ -излучениями. Они сильно отличаются друг от друга

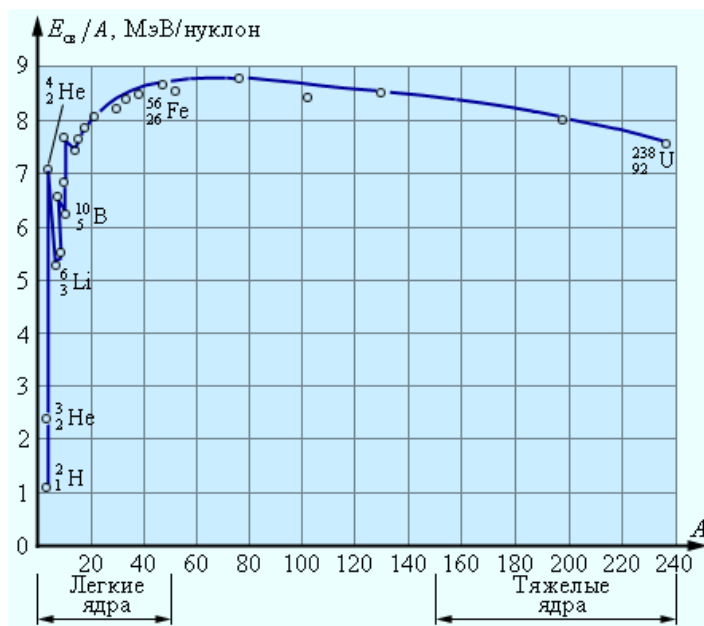


Рисунок 25 – Удельная энергия связи ядер

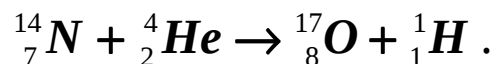
по способности ионизировать атомы вещества и, следовательно, по проникающей способности. Наименьшей проникающей способностью обладает α -излучение. В воздухе при нормальных условиях α -лучи проходят путь в несколько сантиметров. β -лучи гораздо меньше поглощаются веществом — они способны пройти через слой алюминия толщиной в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ -лучи, способные проходить через слой свинца толщиной 5 – 10 см.

Исследования показали, что α -лучи — это поток α -частиц (ядер гелия), β -лучи — это поток электронов, а γ -лучи представляют собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м и вследствие этого — ярко выраженными корпускулярными свойствами, т. е. являются потоком частиц — γ -квантов.

Ядерная реакция — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов.

В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях.

Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 г. Он бомбардировал атомы азота α -частицами. При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



При ядерных реакциях выполняется несколько законов сохранения: импульса, энергии, момента импульса и заряда. В дополнение к этим классическим законам при ядерных реакциях выполняется закон сохранения, так называемого, барионного заряда (т. е. числа нуклонов – протонов и нейтронов). Выполняется также ряд других законов сохранения, специфических для ядерной физики и физики элементарных частиц.

Тема 8. Макромир

Представление о строении молекул

Представление о веществе в естествознании менялось в соответствии с уровнем развития знаний и использования веществ. Тенденция к поиску «элементарных кирпичиков» мироздания, порожденная атомистической концепцией, оказалась плодотворной в объяснении свойств тел. Но она не позволяла понять макроскопические свойства тел, ведь применительно к отдельному атому нельзя говорить ни о давлении, ни о температуре, ни о плотности. И «целое» не является суммой «частей», оно обладает более сложными свойствами.

Было установлено, что все вещества построены из молекул, которые, в свою очередь, состоят из устойчивых групп соединенных друг с другом атомов. На международном съезде химиков в г. Карлсруе (Германия) в 1860 г. были приняты определения понятий молекулы и атома.

Молекула — наименьшая частица вещества, обладающая всеми его химическими свойствами. Молекула состоит из ядер атомов и электронной оболочки, образованной их внешними электронами. Взаимодействие электронных оболочек атомов порождает химические связи, создающие определенные конфигурации атомов, отличающие один тип молекулы от другого. Если атомные конфигурации подходят друг к другу, возникает насыщенная молекула — присоединить к ней еще какой-то атом почти невозможно. Насыщаемость молекул определяет их постоянный состав для данного вещества и связана с *валентностью* — способностью атома образовывать химические связи.

Химическая индивидуальность молекулы определяется именно совокупностью и конфигурацией химических связей, то есть валентными взаимодействиями между входящими в её состав атомами, обеспечивающими её стабильность и основные свойства. Термин «связь» оказался очень точен. Случайных связей не бывает — существуют правила их возникновения с точки зрения превращения энергии: при образовании связи атомы приближаются к достижению наиболее устойчивой электронной конфигурации, т. е. имеющей минимальную потенциальную энергию.

Таким образом, химическая связь — это межатомное взаимодействие, обусловленное перекрыванием внешних электронных оболочек атомов и сопровождающееся понижением общей энергии образовавшейся системы. При образовании молекулы перекрытие электронных облаков ведет к возникновению между ядрами некоторого отрицательного заряда, которое цементирует молекулу и стягивает ядра к области перекрытия. Важно выделить главную черту химической связи — обобществление валентных электронов и перенос заряда, если связь образуется между разными атомами. В образовании химической

связи участвуют только электроны внешней (валентной) электронной оболочки, внутренние электронные уровни не затрагиваются. При образовании химической связи у каждого атома образуется заполненная электронная оболочка внешнего электронного уровня, состоящая из двух или восьми электронов.

Химическая связь характеризуется *длиной* и *энергией*. Длина химической связи — это расстояние между ядрами связанных атомов. Энергия химической связи показывает сколько необходимо затратить энергии на разведение двух атомов, между которыми существует химическая связь, на расстояние, при котором эта химическая связь будет разорвана.

Существует 4 типа химических связей:

1. Ковалентная связь — возникает в результате образования общих электронных пар, достраивающих электронные уровни взаимодействующих атомов. В результате на прямой, соединяющей два атомных ядра, происходит увеличение электронной плотности, к которой притягиваются атомные ядра. Электроны должны иметь противоположно направленные спины, тогда (по принципу Паули) они находятся в наиниžнем состоянии, и орбиты отдельных атомов сливаются в одну орбиталь. Говорят, что происходит «перекрывание» собственных функций электронов, это становится энергетически выгодно — системы удерживаются вместе. Форма молекул с ковалентными связями определяется формой электронных орбиталей.

Идеальная ковалентная связь характерна только для двух одинаковых атомов. Например, в случае Cl_2 каждый из атомов хлора, имеющих на внешней электронной оболочке семь электронов и

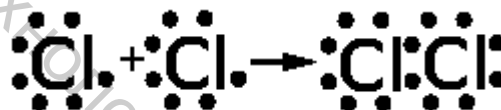


Рисунок 26 — Идеальная ковалентная связь

которым для образования завершенной электронной оболочки не хватает одного электрона, предоставляет один неспаренный электрон для образования электронной пары, которая равномерно распределена между этими двумя атомами (рис. 26). В случае разных атомов электронная плотность смещена в сторону более электроотрицательного атома, то есть к тому атому, который более сильно притягивает к себе электроны. В таком случае говорят о поляризации химической связи. Большинство органических соединений существуют благодаря ковалентной связи (рис. 27).

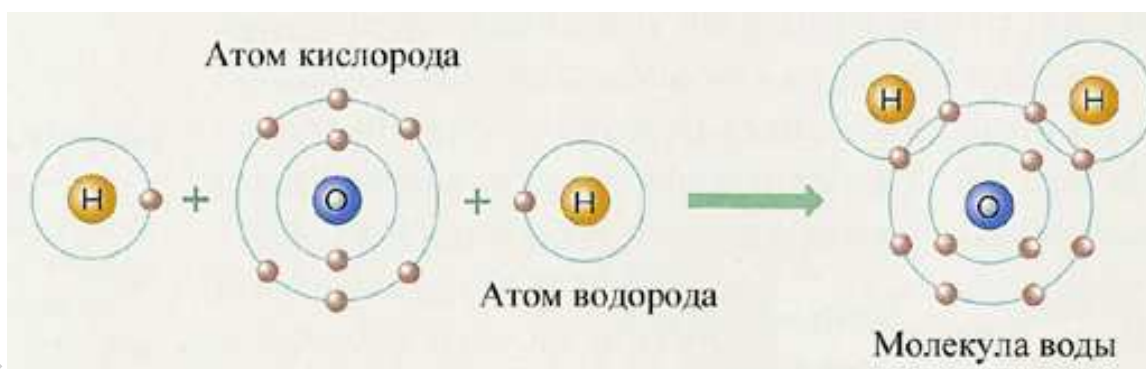


Рисунок 27 — Ковалентная связь

2. Ионная связь является крайним случаем поляризованной ковалентной связи, когда общая электронная пара полностью принадлежит одному из атомов. В таком случае на одном из атомов реализуется полностью положительный заряд, а на другом — полностью отрицательный. Такой тип связи характерен для солей, например, хлорида натрия — NaCl (рис. 28).

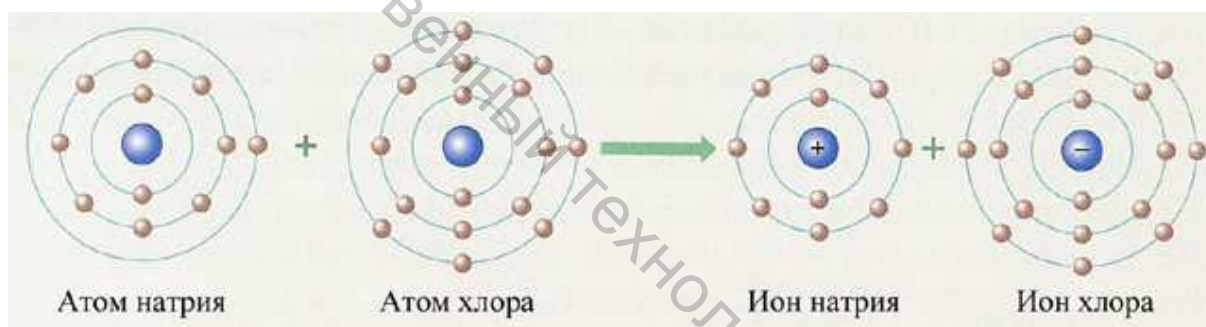


Рисунок 28 — Ионная связь

Каждый из атомов предоставляет по одному электрону для образования общей электронной пары. Однако Cl полностью смещает к себе образовавшуюся электронную пару и тем самым приобретает полный отрицательный заряд, а Na, не имеющий в таком случае на внешнем электронном уровне ни одного электрона, имеет полный положительный заряд.

3. Металлическая связь проявляется, когда атомы металла обобществляют валентные электроны, слабо связанные с атомами, образуя так называемый электронный газ. В результате атомы металла, находящиеся в узлах кристаллической решетки имеют положительный заряд, а оторвавшиеся валентные электроны свободно перемещаются между узлами решетки и связывают ионы металла. В свою очередь, положительно заряженные ионы металла не позволяют рассеиваться электронам за пределы кристаллической решетки.

Наличие свободных подвижных электронов обуславливает такие свойства металлов как высокая электро- и теплопроводность.

Пластичность металлов объясняется тем, что при деформации происходит смещение ионов металла относительно друг друга без разрыва связи. Металлическая связь характерна только для металлов и их сплавов.

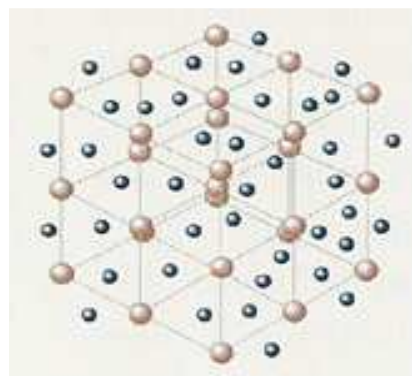


Рисунок 29 –
Металлическая связь

4. Водородная связь (ван-дер-ваальсовая) возникает между связанным атомом водорода одной молекулы и электроотрицательным атомом другой молекулы. Она слабее ковалентной или ионной связи в 15 — 20 раз. Данный вид связи лишь условно можно назвать химическим и правильней его относить к межмолекулярным и внутримолекулярным взаимодействиям. Наглядным примером реализации такой связи может служить объединение нескольких молекул воды в кластеры. В молекуле воды атом кислорода смещает на себя электронную плотность, приобретая частичный отрицательный заряд, а водород соответственно частично отрицательный и может взаимодействовать с неподеленной электронной парой кислорода соседней молекулы. На слабой водородной связи «держатся» полимеры, входящие в состав биомолекул, т. е. и жизнь.

Водородная связь может возникать не только между разными молекулами, но и внутри самой молекулы. Благодаря внутримолекулярной водородной связи

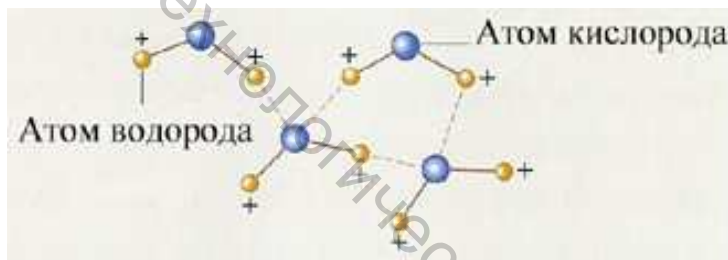


Рисунок 30 — Водородная связь

возможно образование спиральной структуры ДНК.

Для определения строения молекул конкретного вещества современная наука располагает колоссальным набором средств: электронная спектроскопия, колебательная спектроскопия, ядерный магнитный резонанс и электронный парамагнитный резонанс и многие другие, но единственными прямыми методами в настоящее время являются дифракционные методы: рентгеноструктурный анализ и дифракция нейтронов.

Строение вещества в различных агрегатных состояниях

В зависимости от внешних условий вещество может находиться в различных агрегатных состояниях. Агрегатное состояние — это состояние вещества, характеризующееся определёнными качественными свойствами: способностью или неспособностью сохранять объём и форму, наличием или отсутствием дальнего и ближнего порядка и др.

Выделяют три основных агрегатных состояния: твёрдое, жидкое и газообразное.

Твёрдое состояние — состояние, характеризующееся способностью сохранять объём и форму. Атомы в твердых телах не могут значительно удаляться от своих равновесных положений — узлов кристаллической решетки, и их движение в основном сводится к колебаниям вблизи узлов решетки. В твёрдых телах атомы и молекулы плотно упакованы, они сохраняют своё взаимное положение относительно других молекул и удерживаются между собой межмолекулярным взаимодействием.

Различают *кристаллические* и *аморфные* твердые тела.

Кристаллы характеризуются пространственной периодичностью в расположении равновесных положений атомов. Простейшая конфигурация атомов, которая периодически повторяется вдоль тела во всех трех измерениях, образует элементарную ячейку кристаллической решетки. Расстояния между элементами этой решетки в различных направлениях называют параметрами кристаллической решетки. Геометрия кристаллического состояния вещества при обычных давлениях и температурах отличается необычайным разнообразием, хотя число типов решеток и ограничено. Способность кристаллов образовывать состояния с различной кристаллической структурой называют полиморфизмом.

В кристаллических решетках между атомами могут существовать любые типы химических связей. По энергетическому характеру распределения электронных состояний в кристаллах выделяют три основные группы кристаллических твердых тел: металлы, диэлектрики и полупроводники. Они имеют различные свойства электрической проводимости тока.

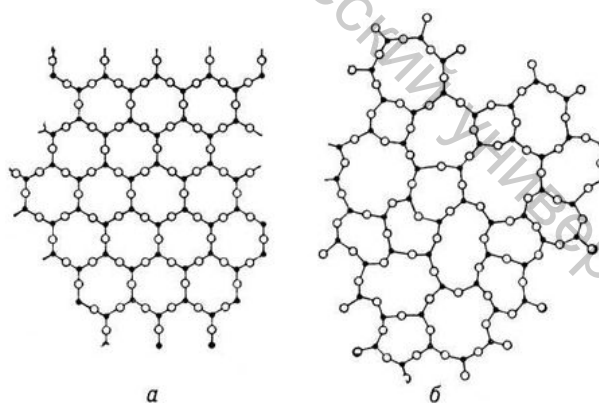


Рисунок 31 – Строение кварца SiO_2 :
а — кристаллического; б — аморфного;
чёрные кружки — атомы Si,
белые — атомы O

В аморфных телах реализуется ближний порядок, т. е. наблюдается некоторая упорядоченность во взаимном расположении только соседних атомов, которые совершают колебания вокруг хаотически расположенных точек. Согласно классическим представлениям, устойчивым состоянием твёрдого тела (с минимумом потенциальной энергии) является кристаллическое. Аморфное тело находится в метастабильном состоянии и с течением времени должно перейти в кристаллическое состояние, однако время кристаллизации часто столь велико, что метастабильность вовсе не проявляется.

Жидкое состояние — состояние вещества, при котором оно обладает малой сжимаемостью, то есть хорошо сохраняет объём, однако не способно сохранять форму. Жидкость легко принимает форму сосуда, в который она помещена. Атомы или молекулы жидкости уже не являются строго локализованными, т. е. связанными с какими-то определенными положениями в теле. Они совершают колебательные движения вблизи состояний равновесия и могут перескакивать в соседние свободные места. Поэтому в жидкостях имеет место ближний порядок, т. е. наблюдается согласованность в расположении только ближайших частиц. Как правило, вещество в жидком состоянии имеет только одну модификацию. Взаимодействие осуществляется через молекулярные силы с радиусом действия порядка 10^{-9} м.

Физические свойства жидкостей:

- Текучесть.
- Вязкость — способность оказывать сопротивление перемещению одной из частей относительно другой, т. е. как внутреннее трение.
- Смешиваемость — способность жидкостей растворяться друг в друге.
- Сохранение объёма (при неизменных внешних условиях). Жидкость чрезвычайно трудно сжать механически, поскольку, в отличие от газа, между молекулами очень мало свободного пространства. Закон Паскаля гласит: давление, производимое на жидкость, заключенную в сосуд, передаётся без изменения в каждую точку объёма этой жидкости.
- Образование свободной поверхности и поверхностное натяжение. Из-за сохранения объёма жидкость способна образовывать свободную поверхность — поверхность раздела фаз данного вещества: по одну сторону находится жидкая фаза, по другую — газообразная, например, пар или воздух. Если жидкая и газообразная фазы одного и того же вещества соприкасаются, возникают силы, которые стремятся уменьшить площадь поверхности раздела — силы поверхностного натяжения. Поэтому мыльные пузыри и пузыри при кипении стремятся принять сферическую форму: при данном объёме минимальной поверхностью обладает шар. Если на жидкость действуют только силы

поверхностного натяжения, она обязательно примет сферическую форму — например, капли воды в невесомости.

Ещё Галилей заметил, что смазанная жиром иголка может держаться на воде, хотя это противоречит закону Архимеда. Когда иголка плавает, можно заметить небольшой прогиб поверхности воды, стремящийся как бы распрямиться. Силы сцепления между молекулами воды достаточны, чтобы не позволить иголке провалиться в воду. Поверхностный слой как пленка защищает воду, это и есть *поверхностное натяжение*, которое стремится придать форме воды наименьшую поверхность — шаровую. Но по поверхности спирта иголка уже не будет плавать, потому что при добавлении спирта в воду уменьшается поверхностное натяжение, и иголка тонет. Мыло тоже уменьшает поверхностное натяжение, поэтому горячая мыльная пена, проникая в трещины и щели, лучше отстирывает грязь, особенно содержащую жир, тогда как чистая вода просто свернулась бы в капельки.

Тепловые свойства конкретных жидкостей очень индивидуальны. Лишь при температурах, близких к абсолютному нулю, возможно исследование тепловых свойств жидкостей в общем виде. Однако в природе имеется только одно вещество — гелий, которое остается жидким при $T \rightarrow 0$ К. Обычно жидкости расширяются при нагревании и сжимаются при охлаждении (исключение составляет вода). Плотности жидкостей значительно больше плотностей газов при тех же давлениях и температурах.

Газообразное состояние — состояние, характеризующееся хорошей сжимаемостью, отсутствием способности сохранять как объём, так и форму. Вещество в газообразном состоянии представляет собой совокупность слабо взаимодействующих частиц, совершающих хаотическое поступательное движение. Из-за слабого взаимодействия отсутствует взаимное влияние атомов, а значит, не проявляется их индивидуальная атомная структура. Поэтому все газы при нормальных условиях с хорошей точностью подчиняются одинаковым закономерностям. Поведение реальных газов, в которых учитывается объём молекул и их взаимодействие, описывается уравнением состояния Ван-дер-Ваальса

Подобно жидкостям, газы обладают текучестью и сопротивляются деформации, но в отличие от них газы не имеют фиксированного объёма и не образуют свободной поверхности, а стремятся заполнить весь доступный объём. При низких абсолютных температурах газы уже не похожи на газы и их свойства определяются квантовыми законами. В этих условиях используют квантовые функции распределения, которые переходят в классические с повышением температуры. При высоких температурах и в инертной среде любое вещество находится в газообразном состоянии.

Газообразное состояние — самое распространённое состояние вещества Вселенной (межзвёздное вещество, туманности, звёзды, атмосферы планет и т. д.). По химическим свойствам газы и их смеси весьма разнообразны — от малоактивных инертных газов до взрывчатых газовых смесей. К газам иногда относят не только системы из атомов и молекул, но и системы из других частиц — фотонов, электронов, броуновских частиц, а также плазму, которую иногда не совсем корректно называют четвёртым агрегатным состоянием вещества.

Плазма — это частично или полностью ионизованный газ, который состоит из совокупности заряженных частиц, взаимодействующих на больших расстояниях. При этом число положительных и отрицательных зарядов примерно равное, так что плазма электрически нейтральна. Присутствие свободных электрических зарядов делает плазму проводящей средой, что обуславливает её заметно большее (по сравнению с другими агрегатными состояниями вещества) взаимодействие с магнитным и электрическим полями. Чтобы перевести газ в состояние плазмы, нужно его *ионизовать*, оторвать электроны от атомов. Ионизацию можно осуществить нагреванием, воздействием электрического разряда или жесткого излучения.

Плазма подчиняется газовым законам, но при наложении магнитного поля, упорядочивающего движение заряженных частиц, она проявляет совершенно необычные для газа свойства. В сильном магнитном поле частицы начинают крутиться вокруг силовых линий, а вдоль магнитного поля они движутся свободно. Говорят, что это винтообразное движение смещает структуру силовых линий поля и поле «вморожено» в плазму. Главное отличие плазмы от газа — высокая электропроводность. Разреженная плазма описывается системой частиц, а более плотная — моделью жидкости.

Большая часть барионного вещества (по массе $\sim 99,9\%$) во Вселенной находится в состоянии плазмы. В звездах ионизация вызывается термически ($T \approx 10^6$ K), в разреженных туманностях и межзвездном газе — ультрафиолетовым излучением звезд. Из плазмы состоит и наше Солнце, его излучение ионизует верхние слои земной атмосферы, называемые *ионосферой*, от ее состояния зависит возможность дальней радиосвязи. В земных условиях плазма встречается редко — в лампах дневного света или в дуге электросварки. В лабораториях и технике плазму чаще всего получают электрическим разрядом. В природе это делают молнии.

Существуют и другие агрегатные состояния, например, жидкие кристаллы или конденсат Бозе-Эйнштейна. Изменения агрегатного состояния вещества называются **фазовыми переходами** — это термодинамические процессы, сопровождаемые скачкообразным изменением свободной энергии, энтропии, плотности и других

основных физических свойств. Выделяют следующие их разновидности: из твёрдого в жидкое — *плавление*; из жидкого в газообразное — *испарение*; из твёрдого в газообразное — *сублимация*; из газообразного в жидкое или твёрдое — *конденсация*; из жидкого в твёрдое — *кристаллизация*. Отличительной особенностью является отсутствие резкой границы перехода к плазменному состоянию.

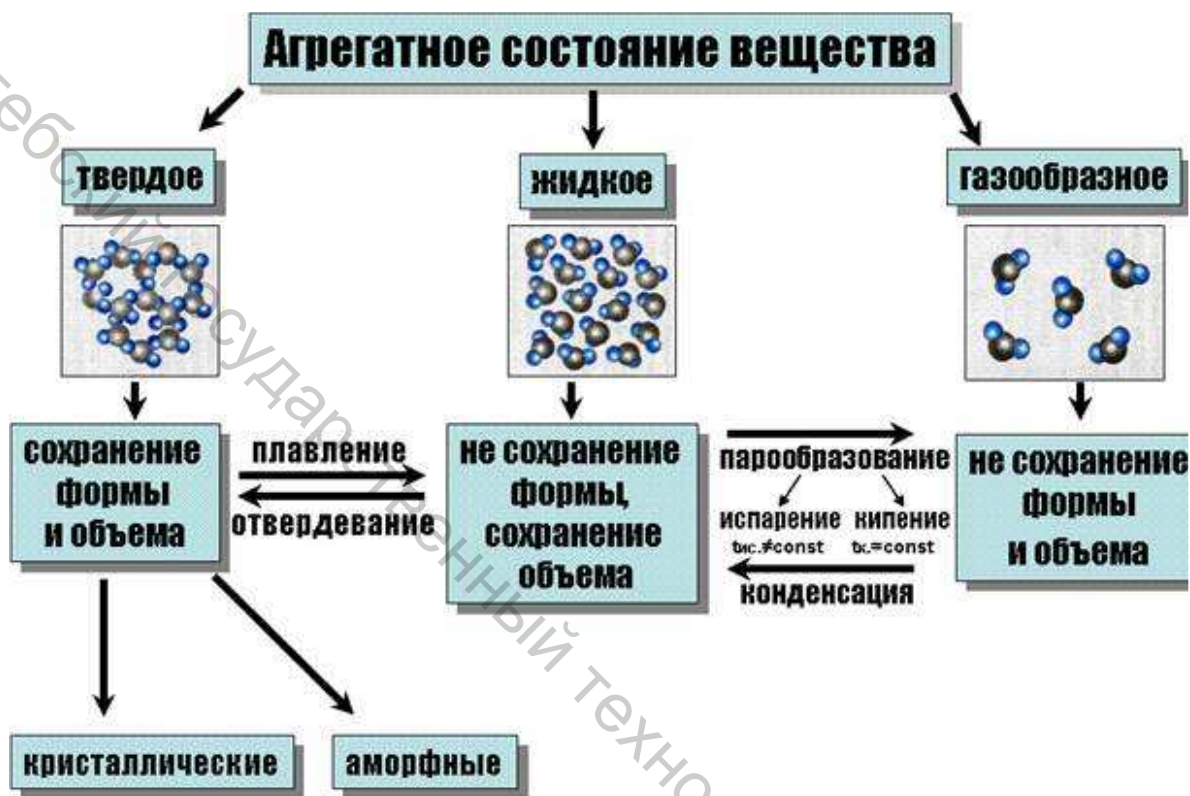


Рисунок 32 — Агрегатные состояния вещества

При достаточно низких температурах вещество находится в твердом состоянии с минимальной энергией системы, и из всех возможных взаимных расположений частиц реализуется их упорядоченное расположение. При повышении температуры скачкообразно происходит фазовый переход кристалл – жидкость (плавление), и при этом поглощается удельная теплота перехода. Каждое вещество имеет строго определенную температуру плавления. Вещество в жидком состоянии существует в определённом интервале температур, ниже которого переходит в твердое состояние, а выше — в газообразное (происходит испарение). Границы этого интервала зависят от давления. При дальнейшем повышении температуры жидкость закипает, во время кипения её температура остается постоянной. Поступающая энергия расходуется на разрыв связей, и жидкость при полном их разрыве превращается в газ. Дальнейшее весьма

значительное повышение температуры среды (до $10^4 - 10^5$ K) ведет к ионизации атомов, т. е. распаду их на ионы и свободные электроны.

Жидкости и твердые тела называют конденсированными средами – в них атомы и молекулы расположены близко, почти соприкасаясь. Среднее расстояние между центрами молекул в жидкостях и твердых телах порядка $(2 \div 5) \cdot 10^{-10}$ м. Межатомные расстояния превышают расстояния, на которые электронные облака проникают друг в друга настолько, что возникают силы отталкивания. Для сравнения, в газах при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами порядка $33 \cdot 10^{-10}$ м. Силы межмолекулярного взаимодействия не обладают насыщенностью в отличие от сил химического взаимодействия атомов, приводящего к образованию молекул. Молекула будет сближаться с неподвижной молекулой до тех пор, пока ее кинетическая энергия не перейдет полностью в потенциальную. Минимальное расстояние d , на которое молекулы могут сблизиться, называют *эффективным диаметром молекулы*. Отношение средней потенциальной энергии взаимодействия к средней кинетической энергии α и определяет агрегатное состояние вещества: для газов $\alpha \ll 1$, для жидкости $\alpha = 1$, для твердых тел $\alpha \gg 1$.

Особыми свойствами обладают вещества при сверхвысоких температурах и больших плотностях. При температурах $\sim 10^7$ K достигается полная ионизация плазмы: вещество состоит из "голых" ядер и свободных электронов. При дальнейшем повышении температуры начинаются ядерные превращения ($\sim 10^8$ K). При температурах свыше 10^9 K ядра разрушаются; при этом вещество состоит из протонов и электронов. Наконец, при температурах свыше 10^{13} K возможно широкое превращение частиц друг в друга. Все эти процессы рассматривались при нормальном давлении.

При невысокой температуре изменение давления также приводит к изменению состояния вещества. При сжатии вещества до $\sim 10^8$ атм электронные оболочки атомов деформируются, и возможно свободное движение внешних электронов, т. е. "металлизация" вещества. При достаточном сжатии вещества до $\sim 10^{12}$ атм роль взаимодействия электронов с ядрами становится несущественной и вещество можно рассматривать как электронный газ большой плотности. Когда давление газа становится порядка 10^{18} атм, происходит захват электронов ядрами с испусканием нейтрино и уменьшением заряда и энергии связи ядра. При давлении 10^{24} атм нейтроны преобладают над электронами, и вещество можно рассматривать как нейтронный газ. При давлении 10^{27} атм нейтронный газ имеет плотность ядерного вещества.

Определения агрегатных состояний не всегда являются строгими. Так, существуют аморфные тела, сохраняющие структуру жидкости и обладающие небольшой текучестью и способностью сохранять форму; жидкие кристаллы текучи, но при этом обладают некоторыми

свойствами твёрдых тел, в частности, могут поляризовать проходящее через них электромагнитное излучение.

Ещё в античности учёные считали, что мир состоит из четырёх стихий: земли, воды, воздуха и огня. С учётом некоторых допущений это предположение укладывается в современное научное представление о четырёх агрегатных состояниях вещества.

Развитие представлений о строении вещества

Изучением естественных и искусственных объектов на молекулярном уровне, а именно, превращением веществ, сопровождающихся изменением их состава и строения, занимается *химия*, основная задача которой — получение веществ с заданными свойствами.

Поскольку человек искал необходимые вещества для обеспечения своей жизнедеятельности, химические знания копились с древнейших времен. Этот путь можно условно разделить на несколько этапов, каждый из которых связан с ценностями общества и возможностью их достижения в выбранное время.

Донаучный этап был ориентирован на поиски «философского камня», «эликсира долголетия», получение золота и серебра из других веществ — основные задачи алхимии.

Формирование химии как науки связывают с именем Р. Бойля — он отделил химию от ремесленных и медицинских целей, развил атомистические представления, объясняя формой, расположением и движениями частиц превращения веществ и их свойства. В 1661 г. Бойль предложил первое научное определение химического элемента. В современном представлении *химический элемент* — совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра. М.В. Ломоносов соединил представления о строении веществ и кинетическую теорию теплоты и сформулировал закон сохранения вещества и движения.

В начале XIX в. английский химик и физик Дж. Дальтон заложил основы химической атомистики. Он впервые ввёл понятие «атомный вес», определил атомные массы ряда элементов и открыл в 1803 г. *закон кратных отношений*: если два химических элемента образуют друг с другом более одного соединения, то массы одного элемента, приходящиеся на одну и ту же массу другого, относятся как целые числа.

В 1811 г. итальянский физик и химик А. Авогадро ввёл термин «молекула» и выдвинул молекулярную гипотезу строения вещества. В 1860 г. на первом Международном конгрессе химиков в Карлсруэ были утверждены единые понятия и основные принципы теории химии.

В 1861 г. А.М. Бутлеров заложил основы ***теории химического строения вещества***, согласно которой свойства веществ определяются порядком связей атомов в молекулах и их взаимным влиянием. Немного

позднее — в 1869 г. — другой выдающийся русский учёный Д.И. Менделеев установил один из фундаментальных законов естествознания — **периодический закон химических элементов**: свойства химических элементов находятся в периодической зависимости от увеличения их атомного веса (в современной формулировке — заряда их атомных ядер). Тогда было известно 62 химических элемента, но Менделеев на основе установленной зависимости предсказал свойства элементов с предположительными атомными весами 44, 68 и 72. Вскоре они были открыты: в 1875 г. галлий, в 1879 г. скандий и в 1886 г. германий. В конце XIX в. был открыт аргон, которому не было места в таблице, но после открытия гелия на Солнце и других инертных газов для них создали новую группу таблицы. Тогда еще не был понятен смысл закона — он открылся только после того, как выяснили структуру атома. Но уже в XIX в. периодический закон стал «фундаментом общей химии», упорядочил химические свойства, придал новое содержание проблеме соотношения состава и свойства. После открытия электрона, рентгеновского излучения, сложного состава атома, радиоактивности и искусственных ядерных реакций стало понятно, что свойства химических элементов определяются не атомной массой, а зарядом ядра атома. Заряд ядра равен порядковому номеру элемента в Периодической системе Менделеева. Поскольку при химических превращениях любой атом сохраняет заряд ядра, то он остается атомом данного элемента. Сам атом меняется, так как меняется его электронная оболочка, отвечающая за химические свойства. В таблицу входят 90 природных и около 15 искусственных (радиоактивных) элементов.

С конца XIX в. важнейшими задачами химии являются разработка способов управления химическими процессами и синтез химических соединений с новыми свойствами. Выдающийся учёный Н.Н. Семёнов, создатель общей теории цепных реакций и основатель химической физики, считал, что химический процесс — это мост между физическими и биохимическими объектами. Химический процесс нельзя рассматривать без восхождения от таких простых объектов, как электрон, нуклон, атом и молекула, к живой биологической системе, т. к. любая клетка любого организма представляет собой, по существу, сложный химический реактор.

Наиболее ценным интеллектуальным достижением химии является точное установление молекулярных структур огромного числа веществ — от чистой воды и сложных бронзовых сплавов до белка родопсина в палочках сетчатки глаза человека.

Общность и отличие живой и неживой материи

Примерно из ста химических элементов, встречающихся в земной коре, для жизни необходимы только 16, причем четыре из них —

водород (H), кислород (O), азот (N), и углерод (C) составляют 99 % массы живого. Биологическое значение этих элементов связано с их валентностью (1, 2, 3, 4) и способностью образовывать прочные ковалентные связи, которые оказываются прочнее связей, образуемых другими элементами той же валентности.

С точки зрения химии *жизнь* — это всевозможные превращения разнообразных молекул, главным элементом которых является углерод. Все биологически функциональные вещества (белки, жиры, углеводы, гормоны, витамины), кроме нескольких солей и воды, содержат углерод. Число соединений углерода огромно — более 20 млн. Они называются органическими соединениями, поскольку когда-то считалось, что такие молекулы могут образовываться только в живых организмах. Изучением соединений углерода занимается органическая химия — одна из важнейших областей химии.

Размеры органических молекул определяются углеродным скелетом, а химические свойства — присоединенными к нему элементами и химическими группами, насыщенностью скелета и формой молекул, которая зависит от углов связей. Углерод имеет валентность, равную четырем, и способен к прочной ковалентной связи. Внутреннее отличие органики от большинства неорганических соединений выражается в том, что химические связи в органических соединениях, как правило, валентные, а ионные связи — очень редки.

Кроме того, важнейшая отличительная особенность живых организмов связана с **оптической активностью** органических веществ, т. е. способностью поворачивать плоскость поляризации либо влево, либо вправо. Необходимым условием оптической активности является *хиральность* — свойство молекул не совмещаться со своим отображением в плоском зеркале. Все белковые молекулы живых организмов поворачивают плоскость поляризации влево, что указывает на их левую пространственную конфигурацию — L-конфигурацию, а молекулы нуклеиновых кислот (ДНК и РНК) — только вправо, т. е. обладают правой, или D-конфигурацией. Этот факт тем более удивителен, что при синтезе органических соединений аналогичного состава в лабораторных условиях образуется примерно одинаковое число молекул с правой и левой конфигурацией, поэтому их плоскость поляризации не поворачивается. Смесь органических молекул обеих конфигураций называется *рацематом*. Предполагается, что в преджизненный период образования органических соединений существовал только рацемат. При зарождении жизни произошла сортировка молекул, появилась хиральность и белки с L-конфигурацией, а ДНК и РНК с D-конфигурацией. Для объяснения такого процесса французский учёный Луи Пастер, основоположник микробиологии, открывший оптическую активность вещества живых

организмов, выдвинул гипотезу: зеркальная асимметрия живых систем обусловлена асимметрией Вселенной.

Согласно современным представлениям выбор одной из форм (L или D) — просто результат случайного стечения обстоятельств: первые молекулы, с которых смог начаться матричный синтез, обладали определенной формой, и именно к ним «приспособились» соответствующие ферменты.

Среди «строительных блоков» органических соединений выделяют:

- *аминокислоты*, из которых синтезированы белки;
- *моносахариды и азотистые основания*, синтезирующие нуклеиновые кислоты;
- *жирные кислоты, глицерол и холин*, синтезирующие липиды.

Таким образом, небольшое число органических молекул дает начало крупным молекулам и структурам живых клеток. Эти немногие виды молекул могли синтезироваться в «первичном бульоне» Мирового океана еще до появления жизни на Земле из простых неорганических молекул — диоксида углерода, азота и воды.

До XIX в. сторонники витализма считали, что без участия «жизненной силы» невозможно получить органические соединения, однако в 1829 г. немецкий химик Ф. Велер синтезировал мочевину из простых веществ, не связанных с жизнедеятельностью организмов — это был первый пример искусственного получения органики.

Имеется большое число определений понятия «жизнь», отражающих различные подходы, которые можно свести к трём основным:

1. жизнь определяется носителем её свойств (например, белком);
2. жизнь рассматривают как совокупность специфических физико-химических процессов;
3. определение минимально возможного набора обязательных свойств, необходимых для жизни.

Основные признаки живых систем: рост и развитие, наследственность, изменчивость, саморегуляция и т. п. Поэтому, вне всякого сомнения, **наличие системы обмена веществ и воспроизведения материальных основ жизни** — главное отличительное свойство живых организмов.

Система обмена веществ поддерживает равновесное состояние живого организма. Такая сложная задача решается путём отбора и синтеза нужных организму веществ. При этом из организма выводятся все не усвоенные им вещества. Система обмена обеспечивает в высшей степени взаимосогласованные биохимические реакции синтеза и расщепления белков. Можно только завидовать тому, как экономно, филигранно и рационально осуществляет природа функцию обмена

веществ во всех живых организмах — от простейшей клетки до высших организмов. Не случайно многие учёные с давних времён стремятся создать лабораторию живого организма.

Система воспроизведения материальных основ жизни содержит в закодированном виде полную информацию для развития и воспроизведения живого организма. Ключевая роль при этом принадлежит природному полимерному соединению — дезоксирибонуклеиновой кислоте (ДНК), выполняющей функции носителя генетической информации и рибонуклеиновой кислоте (РНК), которая служит для передачи информации от хромосом к местам синтеза белков.

Таким образом, отличие живого от неживого заключается в нескольких фундаментальных направлениях: вещественном, структурном и функциональном планах его изучения. В **вещественном** плане в состав живого обязательно входят высокоупорядоченные макромолекулярные органические соединения, называемые биополимерами, — белки, нуклеиновые кислоты (ДНК и РНК). В **структурном** плане живое отличается от неживого клеточным строением. В **функциональном** плане для живых тел характерно воспроизводство самих себя, вернее самовоспроизводство.

Несмотря на существенные различия между живой и неживой материей, их объединяет то, что в состав клеток живых организмов входят те же химические элементы, которые встречаются и в неживой природе. Так, 75 – 85 % массы клетки составляет вода, 10 – 20 % — белки, 1 – 5 % — жиры, 0,2 – 2 % — углеводы, 1 – 2 % — нуклеиновые кислоты, 0,1 – 0,5 % — низкомолекулярные органические соединения, 1 – 1,5 % — неорганические вещества. И все эти органические и неорганические соединения состоят из 80 химических элементов Периодической системы Менделеева. Химических элементов, свойственных только живой материи, в природе не существует. Это и есть одно из доказательств общности живой и неживой материи.

Структура и функции макромолекул белков, ДНК и РНК

Белки — важнейшая составляющая живых организмов — принимают участие во всех жизненных процессах, составляющих основу жизнедеятельности живых организмов. Они участвуют в построении клеток и тканей, являются биокатализаторами (ферментами), гормонами, защитными веществами и др.

Белки представляют собой высокомолекулярные органические вещества, состоящие из 20 альфа-аминокислот, соединённых в цепочку пептидной связью.

Аминокислоты — это органические соединения, в состав которых входят карбоксильные группы COOH , аминные группы NH_2 и углеводородный радикал, различный у всех α -аминокислот (α – атом углерода в центре). Аминокислоты образуют своеобразный алфавит из 20 букв, которые объединяются в группы (слова), определяющие молекулярную структуру белка и его биологическую функцию.

Химическая связь —CO—NH— , соединяющая в молекулах белков аминогруппу одной аминокислоты с карбоксильной группой другой, называется *пептидной связью*.

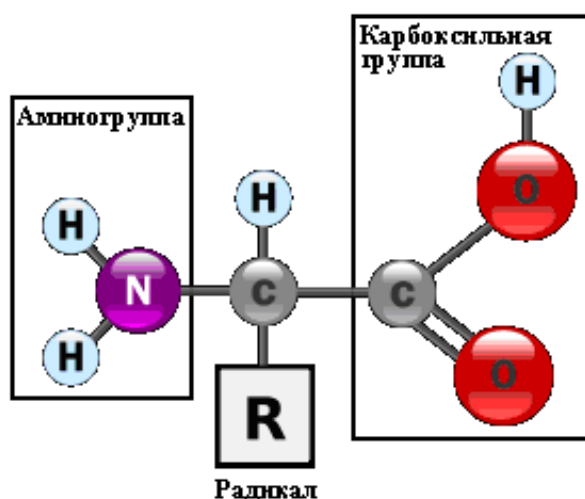


Рисунок 33 – Общая структура α -аминокислот, составляющих белки

Основные функции белков:

- Строительная — по процентному содержанию веществ в клетке белки занимают второе место после воды и определяют, таким образом, белковую природу всех живых организмов.
- Каталитическая (ферментативная) — ускоряют различные химические реакции: расщепление сложных молекул (катаболизм) и их синтез (анаболизм), а также репликацию и репарацию ДНК и матричный синтез РНК. Известно около 4000 реакций, катализируемых белками.
- Сигнальная — способность белков передавать сигналы между клетками, тканями, органами и разными организмами.
- Транспортная — перенос веществ в клетки и из клеток, их перемещение внутри клеток, а также их транспортировка кровью и другими жидкостями по организму.
- Регуляторная — осуществление белками регуляции процессов в клетке или в организме, что связано с их способностью к приему и передаче информации. Постоянно открывают все новые и новые регуляторные белки, в настоящее время известна, вероятно, только малая их часть.

А также защитная, моторная, рецепторная функции и др.

Все активные организмы, будь то растения, животные, бактерии или вирусы, содержат белки, построенные из одних и тех же 20 аминокислот. Простейшая животная клетка содержит около 5000 различных видов белков. Белки являются важной частью питания животных и человека, поскольку в организме не могут синтезироваться все необходимые аминокислоты и часть из них поступает с белковой пищей. В процессе пищеварения ферменты разрушают потреблённые белки до аминокислот, которые используются при биосинтезе белков организма или подвергаются дальнейшему распаду для получения энергии.

Биосинтезом называется образование молекул белков в клетках из аминокислот. В процессе биосинтеза белков определяющую роль играет генетическая информация об их структуре. Биосинтез белков состоит из двух этапов:

- транскрипция — синтез молекул всех типов РНК на одной из цепей молекулы ДНК при помощи ферментов РНК-полимеразы;
- трансляция — перевод информационной РНК в последовательность аминокислот.

Сборка одной молекулы белка, состоящей из 200 – 300 аминокислот, происходит за 1 – 2 минуты и требует сравнительно больших затрат энергии.

Хранение и передачу наследственной информации в живых организмах обеспечивают **нуклеиновые кислоты** ДНК и РНК — высокомолекулярные органические соединения, образованные нуклеотидами. Нуклеиновые кислоты присутствуют в клетках всех живых организмов. Как белки состоят из последовательно соединённых аминокислот, так и нуклеиновые кислоты — из последовательно связанных между собой нуклеотидов. Если в построении белка участвуют 20 аминокислот, то нуклеотидов всего 4, хотя сами они достаточно сложные образования.

Каждый **нуклеотид** состоит из трёх компонентов, соединённых химическими связями: из одной молекулы фосфорной кислоты, одной молекулы сахара и одной молекулы органического основания. Сахар может быть в двух вариантах: **рибоза** (Р) $C_5H_{10}O_5$ и **дезоксирибоза** (Д) $C_5H_{10}O_4$ (рис. 34). При этом они никогда не встречаются одновременно, поэтому этим сахарам соответствуют два типа нуклеиновых кислот — ДНК и РНК. Органические основания, входящие в состав нуклеотидов:

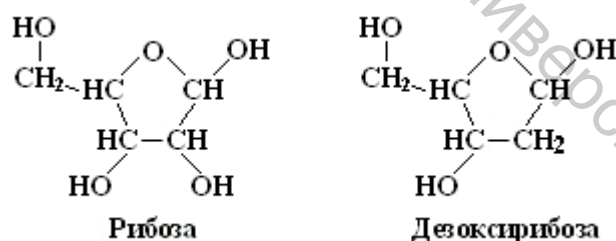


Рисунок 34 – Молекулы рибозы и дезоксирибозы

аденин (А), гуанин (Г), тимин (Т), цитозин (Ц) и урацил (У). В состав ДНК входят последовательно соединённые ковалентными связями дезоксирибонуклеотиды, каждый из которых содержит какое-то из 4-х оснований А, Г, Т, Ц, а в состав РНК — рибонуклеотиды, также содержащие под одному из 4-х оснований А, Г, У, Ц. Все молекулы имеют форму цепи — от 77 до нескольких миллионов нуклеотидов.

Для молекулы ДНК характерна структура трёх видов:

1. Первичная — состоит из нуклеотидных цепей, у которых скелетную основу составляют чередующиеся сахарные и фосфатные группы, соединенные ковалентными связями, а боковые части представлены одним из четырех оснований и присоединяются одна к другой молекулой сахара.

2. Вторичная — две нуклеотидные цепи, скрепленные одна с другой перемычками и свившиеся в двойную спираль. Принцип формирования двухцепочной молекулы ДНК называют *принципом комплементарности*. Порядок чередования нуклеотидов определяет последовательность аминокислот в молекулах белка, от набора белков зависят свойства клеток и индивидуальные признаки организмов. Структурная модель ДНК в виде двойной спирали впервые предложена в 1953 г. Дж. Уотсоном и Ф. Криком — она хорошо объясняет процесс «воспроизводства» этой молекулы — репликацию (удвоение). В начале репликации две старые цепи начинают раскручиваться и отделяться друг от друга. Затем по принципу комплементарности к двум старым цепям пристраиваются новые — так образуются две идентичные двойные спирали. Репликация обеспечивает точное копирование генетической информации, заключённой в молекулах ДНК, и передаёт её по наследству от поколения к поколению.

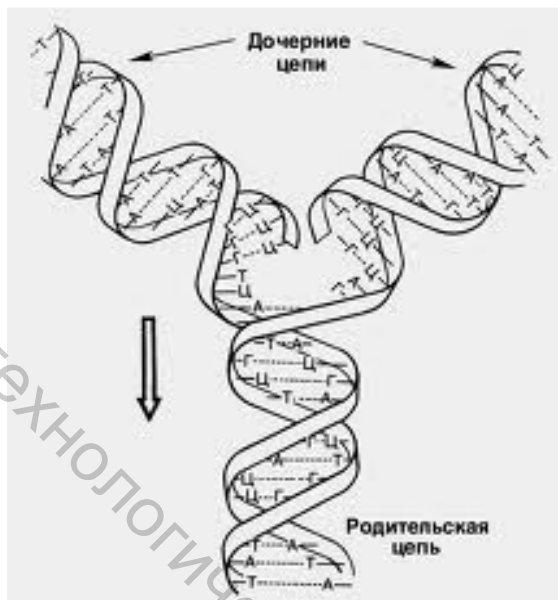


Рисунок 35 – Формирование двухцепочной молекулы ДНК

3. Третичная структура ДНК, определяемая трехмерной пространственной конфигурацией молекул, пока изучена недостаточно.

Определённое сочетание нуклеотидов, несущих информацию о структуре белка, и последовательность их расположения в молекуле ДНК образуют *генетический код*. Единица наследственного материала, ответственная за формирование какого-либо признака называется *геном*. Он занимает участок молекулы ДНК, определяющий структуру

одной молекулы белка. Нарушение последовательности нуклеотидов в цепи ДНК приводит к наследственным изменениям в организме — мутациям.

Генетический код обладает удивительными свойствами, главное из которых — триплетность: одна аминокислота кодируется тремя рядом расположенными нуклеотидами — триплетом, называемым *кодоном*. При этом каждый кодон кодирует только одну аминокислоту. Другое не менее важное свойство — код един для всего живого на Земле. Это свойство генетического кода вместе со сходством аминокислотного состава всех белков свидетельствует о биохимическом единстве жизни.

Строение и функции клетки

Все живые организмы состоят из клеток, образующих ткани различных органов и их систем. Число клеток в организмах различно. Например, тело взрослого человека состоит из 10^{15} клеток, а различных их видов в нём более 200. Размеры клеток варьируются в пределах от 0,1 – 0,25 мкм — некоторые бактерии до 155 мкм — яйцо страуса в скорлупе.

Клетка — элементарная единица строения и жизнедеятельности всех живых организмов, обладающая собственным обменом веществ, способная к самостоятельному существованию, самовоспроизведению и развитию. Подобно любому организму клетка способна питаться, расти и размножаться, вследствие чего её можно считать живым организмом. Отдельные составляющие её части не обладают жизненными функциями.

Термин «клетка» впервые предложил в 1665 г. Роберт Гук. Утверждение о том, что все ткани животных и растений состоят из клеток, составляет сущность *клеточной теории*.

Все клеточные формы жизни на Земле можно разделить на:

- прокариоты (доядерные) — к ним относятся бактерии, они все одноклеточные, не обладают оформленным клеточным ядром, их молекулы ДНК не окружены ядерной мембраной и не организованы в хромосомы, деление прокариот происходит без митоза;
- эукариоты (ядерные) — организмы, обладающие оформленным клеточным ядром, отграниченным от цитоплазмы ядерной оболочкой, в клетках эукариот имеется система внутренних мембран, образующих, помимо ядра, ряд других органоидов, строение и функции которых более подробно рассмотрены ниже.

Несмотря на большое разнообразие и существенные различия во внешнем виде и функциях, все клетки имеют общее строение — они состоят из трёх основных частей:

— плазматической мембраны, окружающей содержимое клетки и контролирующей переход вещества из окружающей среды в клетку и обратно;

— заполняющей клетку цитоплазмы, в которой расположены различные органоиды и клеточные включения;

— клеточного ядра с носителем генетической информации в виде молекулы ДНК (у прокариотов отсутствует).

Каждый из органоидов клетки выполняет свою особую функцию, а в совокупности все они определяют жизнедеятельность клетки в целом. Раздел биологии, занимающийся изучением строения и жизнедеятельности клеток, получил название цитологии.

Плазматическая мембрана играет важную роль: при её повреждении клетка сразу гибнет, в то же время без некоторых других структурных элементов жизнь клетки может продолжаться. Изменение проницаемости наружной мембраны — первый признак гибели клетки.

Внутри клеточной плазматической мембраны находится *цитоплазма*, содержащая водный раствор солей с растворимыми ферментами и другими веществами. В цитоплазме располагаются разнообразные органеллы — маленькие органы, окружённые своими мембранами. Внутреннее пространство эукариотической клетки строго упорядочено. Передвижение органоидов координируется при помощи специализированных транспортных систем, так называемых микротрубочек, служащих внутриклеточными «дорогами» и специальных белков динеинов и кинезинов, играющих роль «двигателей». Отдельные белковые молекулы также не диффундируют свободно по всему внутриклеточному пространству, а направляются в необходимые компартменты при помощи специальных сигналов на их поверхности, узнаваемых транспортными системами клетки. В цитоплазме есть и небольшие тельца — *рибосомы*, состоящие из белка и нуклеиновой кислоты (РНК) и принимающие участие в биосинтезе белка. Внутриклеточная среда достаточно вязкая, несмотря на то, что 75 – 85 % массы клетки составляет вода.

Митохондрии — особые органеллы клетки, основными функциями которых является синтез аденозинтрифосфата (АТФ) — универсального носителя энергии и дыхание — поглощение кислорода и выделение углекислого газа. В клетках растений помимо митохондрий есть хлоропласты, способные производить фотосинтез, в результате которого из углекислого газа и воды образуются органические вещества. Хлоропласты и митохондрии очень похожи на некоторых бактерий, способных к фотосинтезу, в связи с чем было высказано предположение, что хлоропласты и митохондрии произошли от свободноживущих бактерий, которые проникли в прокариотную клетку. Вначале они были внутриклеточными паразитами, а затем стали

приносить пользу клетке и постепенно превратились в хлоропласты и митохондрии.

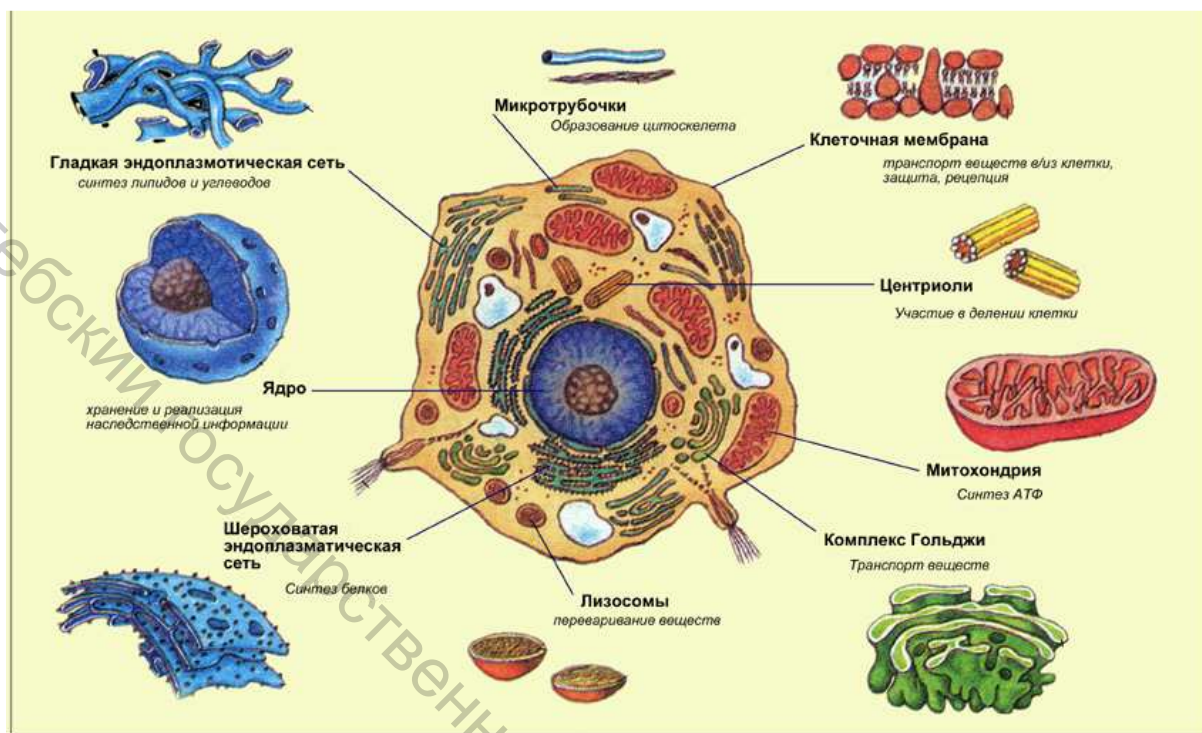


Рисунок 36 – Клетка и клеточные органеллы

Во всех жизнеспособных клетках, за исключением бактерий, содержится *ядро* — важнейшая часть клетки, без которого она не может существовать. В ядре находятся *хромосомы* — длинные нитевидные тельца, состоящие из ДНК и присоединённого к ней белка. В ядре происходит репликация — удвоение молекул ДНК, а также транскрипция — синтез молекул РНК на матрице ДНК. В ядре же синтезированные молекулы РНК претерпевают некоторые модификации, после чего выходят в цитоплазму. Сборка рибосом также происходит в ядре, в специальных образованиях, называемых *ядрышками*.

К элементам *цитоскелета* относят белковые фибриллярные структуры, расположенные в цитоплазме клетки: микротрубочки, актиновые и промежуточные филаменты. Микротрубочки принимают участие в транспорте органелл, актиновые и промежуточные филаменты необходимы для поддержания формы клетки.

Центриоли представляют собой цилиндрические белковые структуры, расположенные вблизи ядра клеток животных (у растений центриолей нет). Вокруг центриолей находится так называемый центр организации цитоскелета, район в котором группируются минус концы микротрубочек клетки.

В эукариотической клетке существует система переходящих друг в друга мембранных отсеков (трубок и цистерн) — *эндоплазматическая сеть* (ЭПС) или *эндоплазматический ретикулум*. Ту часть ЭПС, к мембранам которой прикреплены рибосомы, относят к шероховатой эндоплазматической сети, на её мембранах происходит синтез белков. Те объединения, на стенках которых нет рибосом, относят к гладкой ЭПС, принимающей участие в синтезе липидов. Внутренние пространства гладкой и шероховатой ЭПС не изолированы, а переходят друг в друга и сообщаются с просветом ядерной оболочки.

Комплекс Гольджи представляет собой стопку плоских мембранных цистерн, в которых созревают некоторые белки, синтезированные на мембранах шероховатой ЭПС и предназначенные для секреции или образования лизосом. Комплекс Гольджи асимметричен — цистерны, располагающиеся ближе к ядру клетки, содержат наименее зрелые белки, к этим цистернам непрерывно присоединяются мембранные пузырьки — везикулы, отпочковывающиеся от эндоплазматического ретикулума. Повидимому, при помощи таких же пузырьков происходит дальнейшее перемещение созревающих белков от одной цистерны к другой. В конце концов от противоположного конца органеллы отпочковываются пузырьки, содержащие полностью зрелые белки.

Клетки многоклеточных организмов делят на два типа: соматические и половые. Функция половых клеток репродуктивная, а соматические клетки в некотором смысле нужны только для того, чтобы способствовать выживанию и размножению половых клеток.

Клетки растут и размножаются путём деления на две дочерние. При делении дочерней клетке передаётся полный набор хромосом, несущих генетическую информацию материнской клетки, для чего вначале число хромосом в клетке удваивается, и затем каждая дочерняя клетка получает по одному их набору. Такой процесс деления клеток, обеспечивающий равное распределение генетического материала между дочерними клетками, называется *митозом*.

Каждый организм животного развивается из одной клетки — яйца, которое начинает делиться, и образуется множество отличающихся друг от друга клеток — мышечные, нервные, кровяные и др. Различие клеток определяется прежде всего набором белков, синтезируемых клеткой. Во всех клетках растений и животных хранится полная генетическая информация для построения всех белков определённого вида организма, но в клетке каждого типа синтезируются лишь те белки, которые ей нужны.

Уровни организации живой материи

Структурные уровни организации живой материи отражают критерий масштабности мира живой природы. Выделяют следующие основные структурные уровни жизни:

1. Молекулярный уровень представлен разнообразными молекулами неорганических и органических соединений, а также молекулярными комплексами химических соединений (мембрана и др.), находящимися в живой клетке. Основные явления — объединение молекул в особые комплексы, осуществление физико-химических реакций в упорядоченном виде, копирование ДНК, кодирование и передача генетической информации.

2. Клеточный уровень представлен свободноживущими одноклеточными организмами и клетками, входящими в многоклеточные организмы. Основные явления — биосинтез, фотосинтез, регуляция химических реакций, деление клеток, вовлечение химических элементов Земли и энергии Солнца в биосистемы.

3. Тканевый уровень представлен тканями, объединяющими клетки определенного строения, размеров, расположения и сходных функций. Ткани возникли в ходе исторического развития вместе с многоклеточностью. У многоклеточных организмов они образуются в процессе онтогенеза как следствие дифференциации клеток. У животных различают несколько типов тканей — эпителиальная, соединительная, мышечная, нервная, а также кровь и лимфа. У растений различают меристематическую, защитную, основную и проводящую ткани. На этом уровне происходит специализация клеток.

4. Органный уровень представлен органами организмов. У простейших пищеварение, дыхание, циркуляция веществ, выделение, передвижение и размножение осуществляются за счет различных органелл. У более совершенных организмов имеются системы органов. У растений и животных органы формируются за счет разного количества тканей.

5. Организменный (онтогенетический) уровень представлен одноклеточными и многоклеточными организмами растений, животных, грибов и бактерий. Основные явления — обмен веществ (метаболизм), раздражимость, размножение, нервно-гуморальная регуляция процессов жизнедеятельности, онтогенез — индивидуальное развитие организма от рождения до смерти, гомеостаз (саморегуляция).

6. Популяционно-видовой уровень представлен в природе огромным разнообразием видов и их популяций — групп родственных особей, объединённых определённым генофондом и специфическим взаимодействием с окружающей средой. Основные процессы — генетическое своеобразие, взаимодействие между особями и популяциями, накопление элементарных эволюционных преобразований, осуществление микроэволюции и выработка адаптаций

к изменяющейся среде, видообразование и увеличение биоразнообразия.

7. Биогеоценотический уровень представлен разнообразием естественных и культурных биогеоценозов во всех средах жизни. Биогеоценоз представляет собой устойчивую саморегулирующуюся экологическую систему, в которой органические компоненты (животные, растения) неразрывно связаны с неорганическими (вода, почва) круговоротом веществ и потоком энергии.

8. Биосферный уровень представлен высшей, глобальной формой организации биосистем — биосферой — оболочкой Земли, заселённой живыми организмами и преобразованной ими. Основные процессы — активное взаимодействие живого и неживого вещества планеты, биологический глобальный круговорот веществ и энергии, активное биогеохимическое участие человека во всех процессах биосферы, его хозяйственная и этнокультурная деятельность.

В типичном случае каждый из этих уровней является системой из подсистем нижележащего уровня и подсистемой системы более высокого уровня. Таким образом, все уровни организации живой материи тесно взаимосвязаны и находятся в непрерывном взаимодействии.

Тема 9. Мегамир

Измерение расстояний

Для рассмотрения объектов космического масштаба: планет, звёзд, галактик — необходимо определить расстояния между ними. Масштабы расстояний в мире небесных тел заставляют астрономов пользоваться гораздо более крупными единицами измерения расстояний, чем километры.

В масштабе Солнечной системы для определения расстояний между планетами и Солнцем используется *астрономическая единица* (а.е.), равная среднему расстоянию от Солнца до Земли (1 а.е. = 149,6 млн км). От Солнца до Меркурия 0,4 а.е., а расстояние до Плутона, которое часто принимают как размер Солнечной системы, — ~ 40 а.е.

Во второй половине XX в. начали определять расстояния до небесных тел методами радио- и лазерной локации. Метод локации заключается в том, что на небесное тело посылают мощный кратковременный радиоимпульс, а затем принимают отраженный сигнал. Зная скорость распространения света в вакууме $c = 300\,000$ км/с и время распространения, определяют расстояние. Эти методы позволили определить расстояния до небесных тел в Солнечной системе с высокой точностью. Так, оптическая лазерная локация дает возможность определить расстояние между выбранными точками лунной и земной поверхностей с точностью до сантиметров, что позволяет изучить рельеф поверхности небесных тел.

Для определения расстояний до ближайших звёзд используют *метод параллактического смещения* или тригонометрического параллакса, когда с различных точек наблюдения измеряется угол, под которым наблюдается небесное тело, до которого определяется расстояние. Расстояние между точками, из которых наблюдается небесное тело, называют базисом. Зная величину базиса и угла наблюдения, по формулам тригонометрии можно определить расстояние до небесного тела. Угол, под которым виден базис с

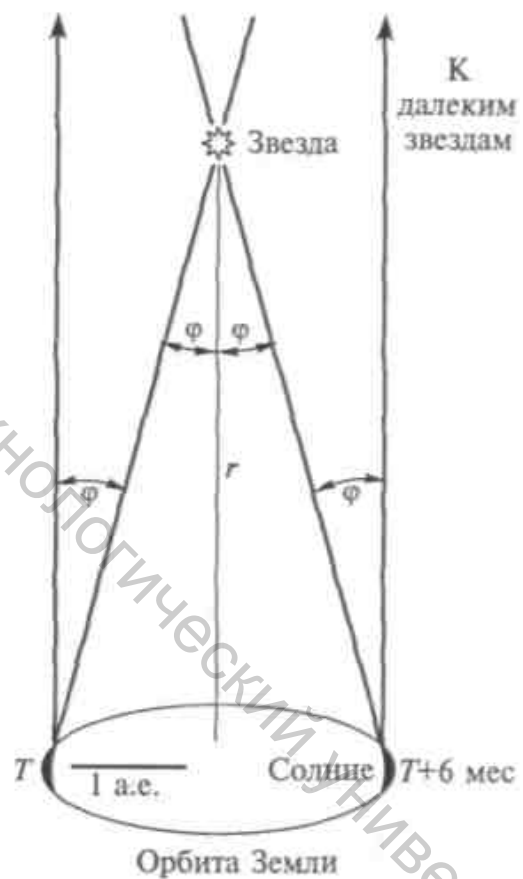


Рисунок 37 – Определение расстояния методом годичного параллакса

небесного тела, до которого определяется расстояние, называется *параллаксом*. При данном расстоянии до небесного тела параллакс тем больше, чем больше базис. Если в качестве базиса используется средний радиус земной орбиты, то метод называют *годовым параллаксом*.

Расстояние до звезды, которое соответствует годовому параллаксу в 1", называется *парсеком* (от слов "параллакс" и "секунда") $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.}$ Эта единица используется в звездной астрономии, т. е. не только километр, но и астрономическая единица слишком мала для измерения расстояний до звезд. Самая близкая к нам звезда после Солнца находится в созвездии Центавра (Проксима Центавра) на расстоянии 1,33 пк. Измерение параллактического смещения звезд хотя и очень трудоемко, однако является очень надежным способом определения расстояний.

Для оценки расстояний до далеких галактик используют явление *красного смещения* — в спектрах галактик спектральные линии смещены в сторону красного конца спектра вследствие их удаления. В 1929 г. американский астрофизик Э. Хаббл установил закономерность, называемую ныне законом Хаббла: лучевые скорости галактик v_r пропорциональны расстояниям r до них, т. е. $v_r = H \cdot r$, где H — постоянная Хаббла. Расстояния до далеких галактик оказались настолько большими, что их выражают не в парсеках и килопарсеках (кпк), а в мегапарсеках (Мпк).

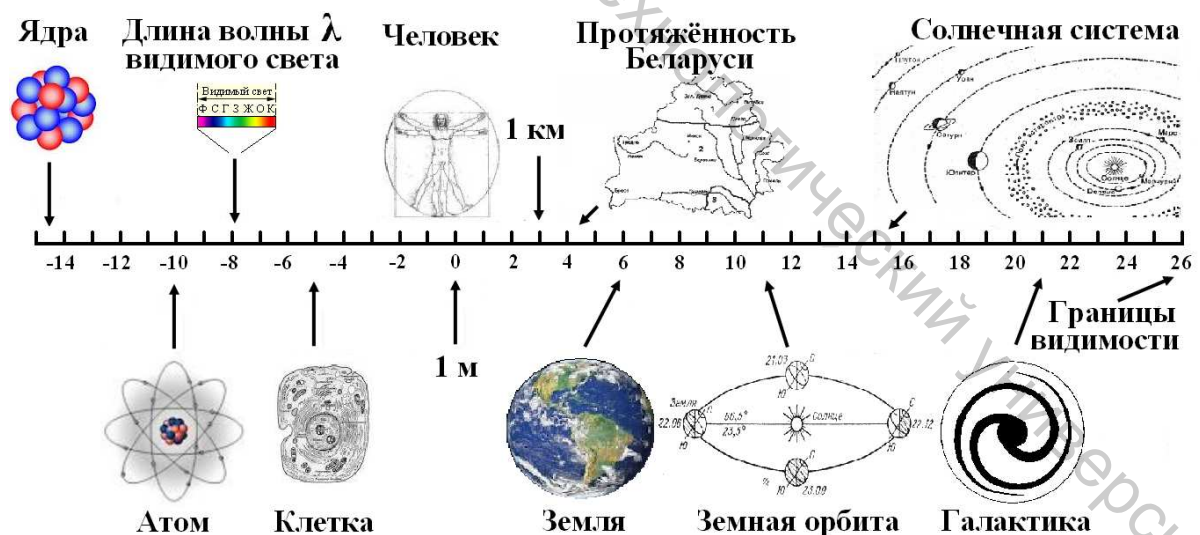


Рисунок 38 – Сравнительная шкала размеров во Вселенной (по оси показатель степени десяти)

В настоящее время значение красного смещения измерено в спектрах более 15 000 галактик, и оказалось, что лучевые скорости наиболее далеких превышают 100 000 км/с, а расстояния до них

составляют сотни и тысячи мегапарсеков, т. е. свет от них доходит до нас за сотни миллионов и миллиарды лет.

Для определения расстояний в мегамире часто используют также *световой год* — расстояние, которое свет проходит за год.

$$1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св.г.} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$

Звезды, их характеристики и эволюция

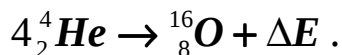
Более 95 % всего вещества, наблюдаемого в природе, сосредоточено в звёздах — массивных светящихся плазменных шарах. Ближайшая к нам звезда Солнце является источником жизни на нашей планете.

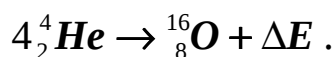
Звезда — это небесное тело, в котором идут, шли или будут идти термоядерные реакции. Но чаще всего звездой называют небесное тело, в котором идут в данный момент термоядерные реакции.

Звёзды находятся в состоянии устойчивого лучистого равновесия: из-за стремления газа расшириться под действием высокой температуры газовое давление внутри звезды устанавливается как раз таким, чтобы удержать звезду от гравитационного сжатия. Температура вещества в недрах звёзд измеряется миллионами кельвинов, а на их поверхности — тысячами.

Энергия подавляющего большинства звёзд выделяется в результате термоядерных реакций превращения водорода в гелий, происходящих при высоких температурах во внутренних областях. Это поддерживает высокую температуру в недрах звезды. Получается, что звезды как бы "подогреваются" из центра. Так как масса четырех протонов больше массы ядра атома гелия, то этот избыток массы уносится квантами излучения и нейтрино по соотношению Эйнштейна $E = \Delta mc^2 = hf$. Звезды типа Солнца каждую секунду теряют на излучение массу в миллионы тонн. При этом сотни миллионов тонн водорода ежесекундно превращаются в гелий.

У звезд, температура которых в центре существенно выше, чем у Солнца, может происходить синтез более тяжелых элементов из гелия. Эти реакции также сопровождаются выделением энергии, способной поддерживать излучение звезд. Так, в красных гигантах и сверхгигантах, в недрах которых температура превышает сотни миллионов градусов, могут идти реакции слияния ядер гелия, приводящие к образованию ядер углерода и кислорода (из трех и четырех ядер гелия соответственно).





Большая часть углерода и кислорода, существующих в природе, возникла в недрах таких звезд. В звездах произошло и происходит образование большинства химических элементов, из которых состоит вещество окружающего нас мира. Атомы любого вещества на Земле, включая и те, из которых состоим мы сами, когда-то, еще до того как возникла Солнечная система, родились или пребывали в недрах звезд.

В Солнце и звездах были найдены практически все элементы периодической системы элементов Менделеева, кроме неустойчивых изотопов и самых тяжелых атомов. У большинства звезд около 98 % массы приходится на водород и гелий — самые легкие элементы, причем по массе водорода примерно в 2,5 раза больше, чем гелия. На долю всех остальных тяжелых элементов приходится менее 2 % массы.

Звезды различаются большим разнообразием размеров, масс, светимостей, цветом, температурой. По массам есть звезды, превосходящие Солнце в 80 раз, но есть и составляющие 0,05 массы Солнца ($M_{\odot}$). По светимостям звезды имеют в 100 000 раз большую и в столько же раз меньшую светимость. Диапазон поверхностных температур звезд охватывает от 3000 К до 50 000 К. Цвет звезды зависит от температуры: при 3000 К звезда красная, при 6000 К — желтая, при 10 000 К белая, при больших — голубая.

После создания теории внутреннего строения звезд и теории их эволюции оказалось, что все многообразие видов звезд — это не более чем отражение их количественных характеристик, таких как масса и химический состав, и эволюционного этапа на котором в данный момент находится звезда.

В настоящее время для классификации звезд используется диаграмма Герцшпрунга-Рассела (1910 г.), отображающая зависимость между абсолютной звездной величиной, светимостью, спектральным классом и температурой поверхности звезды. В начале XX века Герцшпрунг и Рассел нанесли на диаграмму «Абсолютная звездная величина» — «спектральный класс» различные звезды, и оказалось, что

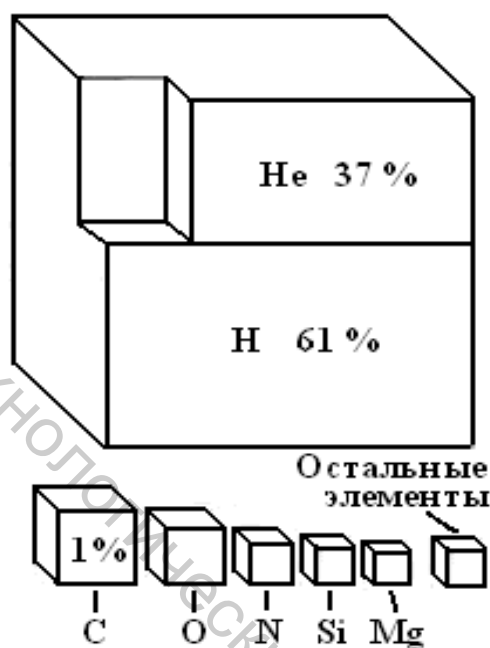


Рисунок 39 – Схема распространённости химических элементов во Вселенной

звёзды на этой диаграмме располагаются не случайно, а образуют хорошо различимые участки.

Главная последовательность — узкая полоса звезд, протянувшаяся из верхнего левого угла вниз, вдоль неё сконцентрировано большинство звезд в окрестности Солнца. Вверху диаграммы над Главной последовательностью компактно расположены группы звезд-гигантов и сверхгигантов. Параллельно Главной последовательности, несколько ниже ее, расположены звезды, образующие последовательность субкарликов и белых карликов, в которых содержание металлов гораздо ниже, чем у звезд Главной последовательности.

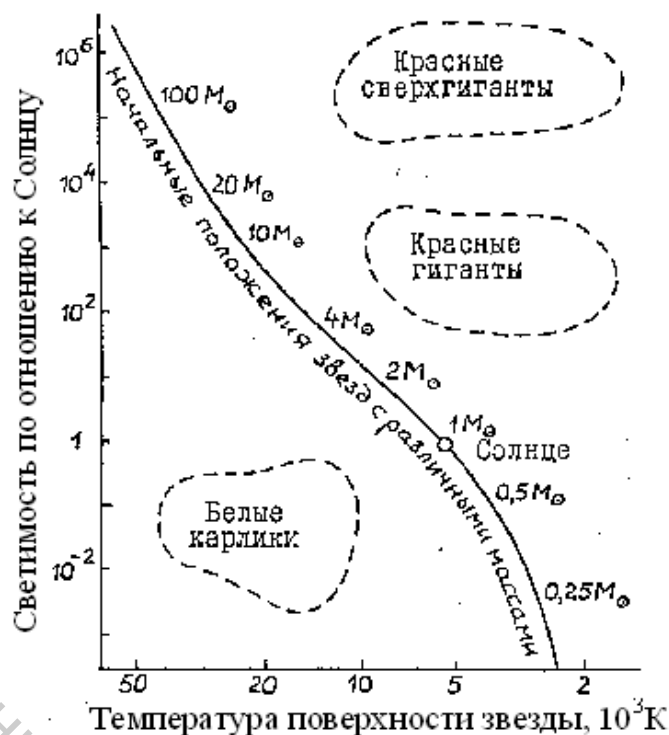


Рисунок 40 — Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

Эволюционный путь звезды определяется её массой, так как масса определяет количество горючего и с её ростом увеличивается температура в центре звезды и интенсивность термоядерных реакций. Звезда начинает свою жизнь как холодное разреженное облако межзвёздного газа, сжимающееся под действием собственного тяготения. Стадия будущей звезды, или *протозвезды*, длится у звезд с массами, близкими к солнечной, несколько миллионов лет. При сжатии энергия гравитации переходит в тепло, и температура газового облака возрастает. Когда температура в ядре достигает нескольких миллионов Кельвинов, начинаются реакции нуклеосинтеза, и сжатие прекращается. “Включение” термоядерного реактора означает, что стадия протозвезды закончилась и началась стадия *настоящей* звезды. В таком состоянии звезда пребывает большую часть своей жизни, находясь на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела, пока не закончатся запасы топлива в её ядре. По мере выгорания водорода давление в оболочке повышается, внешние слои расширяются, а внутренние, наоборот, сжимаются, и звезда начинает покидать Главную последовательность, так как на расширение тратится некоторая энергия, и светимость звезды уменьшается. Температура поверхности снижается — звезда становится красным гигантом. На ветви гигантов звезда

проводит значительно меньше времени, чем на главной последовательности. Когда масса её изотермического гелиевого ядра становится значительной, оно не выдерживает собственного веса и начинает сжиматься; возрастающая при этом температура стимулирует термоядерное превращение гелия в более тяжёлые элементы. То, что происходит в дальнейшем, вновь зависит от массы звезды: маломассивные звёзды (до 3,4 массы Солнца) превращаются в белые карлики, более массивные – в нейтронные звёзды и чёрные дыры.

В нашей спиральной Галактике массивные звезды первого поколения давно завершили свой жизненный путь и, взорвавшись, обогатили межзвездную среду тяжелыми элементами. Часть из них вошла в состав звезд нового поколения. Звезды малых масс эволюционируют медленно и многие из них дожили до наших дней. Молодым звездам, массы которых близки к массе Солнца, предстоит долгая жизнь: только на главной последовательности они находятся не менее 10 млрд лет.

Таким образом, диаграмма Герцшпрунга-Рассела оказалась ключом к пониманию и исследованиям процессов, происходящих внутри звезды. Около 90 % звёзд находятся на Главной последовательности, и их светимость обусловлена ядерными реакциями превращения водорода в гелий. Красные гиганты и белые карлики — это проэволюционировавшие звёзды, в которых происходит горение гелия и более тяжёлых элементов. Время жизни звёзд составляет от 100 млн до сотен миллиардов лет и зависит от массы — массивные звезды существуют меньше, чем легкие.

Галактики, их формы и строение

Галактика (с др. греч. — Млечный Путь) — гравитационно-связанная система из звёзд, межзвёздного газа, пыли и тёмной материи. Все объекты в составе галактик участвуют в движении относительно общего центра масс. В XX в. были определены форма и масштабы этой гигантской звездной системы и установлено место, которое занимает в ней наше Солнце. Солнечная система находится между спиральными рукавами, один из которых виден в направлении на центр Галактики в созвездии Стрельца, а другой — в противоположном направлении, в созвездии Персея (рис. 41). Именно в направлении на созвездие Стрельца Млечный Путь выглядит наиболее ярко. Орбита Солнца лежит в плоскости Галактики, и один оборот длится 250 млн лет. Солнечная система движется вокруг центра Галактики почти по окружности со скоростью 250 км/с. Период вращения Солнца вокруг центра Галактики называется *галактическим годом*.

Галактики

отличаются большим разнообразием — выделяют сфероподобные эллиптические галактики, дисковые спиральные галактики, галактики с перемычкой (баром), карликовые, неправильные и т. д. Масса галактик

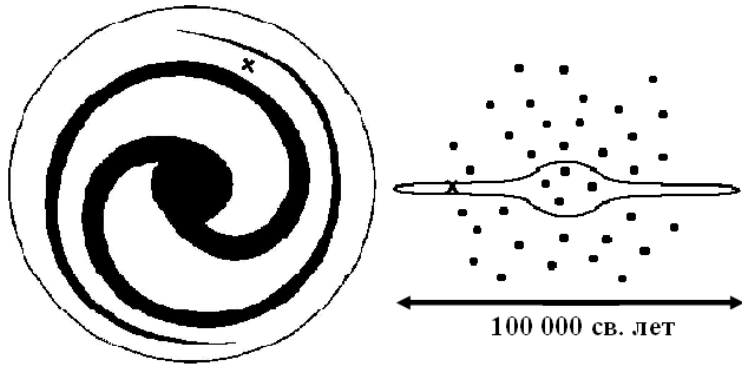


Рисунок 41 — Схема положения Солнечной системы в Галактике (отмечено крестиком)

варьируется от 10^7 до 10^{12} масс Солнца, для сравнения масса нашей галактики Млечный Путь $3 \cdot 10^{12}$ масс Солнца. Диаметр галактик — от 16 до 160 тысяч световых лет, для сравнения диаметр нашей галактики Млечный Путь около 100 000 световых лет.

Наша Галактика представляет собой достаточно тонкий диск с утолщением в центре. В центре галактики находится *ядро*, которое плохо изучено, так как центральная область почти недоступна для наблюдений из-за сильного поглощения в межзвездной среде. Есть предположения, что это массивное быстровращающееся плазменное тело «магнетойд», или черная дыра. Наблюдения в разных областях спектра позволили установить, что размер ядра составляет около нескольких килопарсек (кпк).

Плотность звезд близи ядра галактики достигает 10^7 звезд/пк³, тогда как вблизи Солнца — одна звезда на 10 пк³. Возраст звезд изменяется в большом диапазоне значений: от 15 млрд лет (возраст Вселенной) до сотен тысяч лет — самых молодых. Есть звезды, образующиеся на наших глазах. В плоскости Галактики расположены звезды молодые и среднего возраста. Старые объекты находятся ближе к центру Галактики. Движения старых и молодых звезд в Галактике имеют различия: у старых — большие эксцентриситеты орбит, а молодые движутся почти по окружностям. Получаются две подсистемы: молодые звезды быстро вращаются внутри почти неподвижной системы более старых звезд.

Галактики представляют собой огромные вращающиеся звездные системы. Помимо звезд в них входит межзвездная среда, которая включает разреженный газ и пылинки. Частицы этой пыли похожи на ледяные загрязненные кристаллики, температура которых ≈ 17 К. Газопылевые облака поглощают свет далеких звезд.

Одной из нерешённых проблем строения галактик является тёмная материя, проявляющая себя только в гравитационном взаимодействии. Она может составлять до 90 % от общей массы

галактики, а может и полностью отсутствовать, как в карликовых галактиках.

Классификация галактик на спиральные, эллиптические и неправильные, основанная на внешнем виде, была введена в 1925 г. американским астрономом Э. Хабблом, изучившим более тысячи галактик. Его классификация отражает и существенные физические различия между галактиками.

Спиральные галактики состоят из уплощенного диска из звезд и газа, в центре которого находится сферическое уплотнение, называемое балджем, а также обширного сферического гало. Хаббл разделил все известные спиральные галактики на нормальные спирали (S) и спирали с баром (SB), которые часто называют галактиками с перемычкой или пересеченными. Сферическая часть напоминает эллиптическую галактику, дисковая — сжата и содержит много межзвездной пыли, газа и молодых звезд. Почти половина галактик имеют спиральную форму. В центре таких галактик — красивое и яркое ядро, большое и тесное скопление звезд. Из ядра выходят закручивающиеся вокруг него ветви, состоящие из молодых звезд и облаков нейтрального газа. Таковы галактики Млечный Путь и туманность Андромеды.

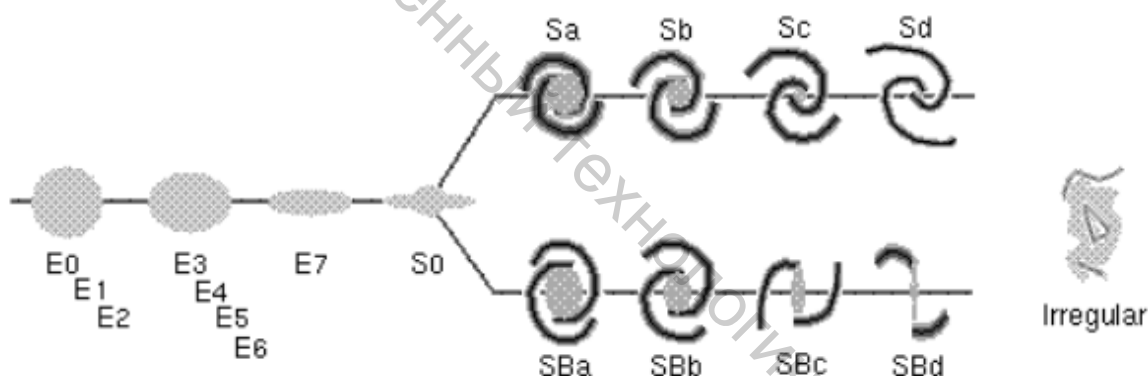


Рисунок 42 — Хаббловская классификация галактик

Эллиптические галактики (E) несколько похожи на них, но с меньшими рукавами. Среди наиболее ярких галактик они составляют 25 %; считают, что они состоят из более старых звезд (возраста Солнца или старше), так как имеют красноватый оттенок. Они почти не содержат межзвездного газа, и там не формируются новые звезды. Вращение в них происходит с небольшими скоростями (менее 100 км/с), а равновесие поддерживается за счет хаотических передвижений звезд по радиально вытянутым орбитам. Таковую галактику наблюдают в созвездии Девы, она имеет почти шаровидную форму и весьма активна.

Неправильные галактики (I) — галактики, лишенные как вращательной симметрии, так и значительного ядра. Неправильные галактики отличаются разнообразием форм, обычно небольшими

размерами и обилием газа, пыли и молодых звёзд. Примером таких галактик являются наиболее близкие к Земле две небольшие галактики Магелланова Облака, которые даже называют спутниками Млечного Пути.

В пространстве галактики распределены неравномерно: в одной области можно обнаружить целую группу близких галактик, а можно не обнаружить ни одной, даже самой маленькой галактики (так называемые *войды*). Точное количество галактик в наблюдаемой части Вселенной неизвестно, но, по всей видимости, их порядка ста миллиардов.

Установлено, что действительно одиноких галактик немного (так называемые галактики поля). Порядка 95 % галактик образуют *группы галактик*. Иногда группы столь тесные, что галактики как бы проникают друг в друга. Так, в нашу Галактику частично заходит галактика Малое Магелланово Облако. Объединения в несколько сотен галактик, которые могут содержать как отдельные галактики, так и группы галактик, называют *скоплением* галактик. В них, как и в обычных галактиках, предполагается присутствие тёмной материи, составляющей большую часть массы группы, 10 – 30 % — это межгалактический газ, а порядка 1 % составляет масса самих звёзд. *Сверхскопление* — самый большой тип объединения галактик, включает в себя тысячи галактик. В масштабах сверхскоплений галактики выстраиваются в полосы и нити, окружающие обширные разрежённые пустоты.

Так, наша Галактика является одной из галактик Местной группы, поперечником около 1 Мпк, в которой находятся более 40 галактик. Сама Местная группа является частью сверхскопления Девы, главную роль в котором играет скопление Девы, в которое наша Галактика не входит.

Предполагают, что Галактика как система звезд образовалась примерно 13 млрд лет назад. На «догалактической» стадии вещество Вселенной не содержало никаких элементов, кроме водорода ($3/4$) и гелия ($1/4$). Гравитационные силы сжимали облако, и возникали первые неоднородности, среди которых выделились области с большой плотностью. В них начался процесс звездообразования, возникли и первые скопления звезд.

Эволюция Вселенной

Учение о строении и эволюции Вселенной в целом называется *космологией*. Принято считать, что основные положения современной космологии начали формироваться после создания в 1916 г. А. Эйнштейном первой релятивистской модели, основанной на теории гравитации и претендовавшей на описание всей Вселенной. Эта модель характеризовала стационарное состояние Вселенной и, как показали, астрофизические наблюдения, оказалась неверной.

В 1922 г. А.А. Фридман в результате решения космологических уравнений пришёл к выводу, что Вселенная не может находиться в стационарном состоянии — она должна либо расширяться, либо сжиматься. Однородная и изотропная Вселенная должна эволюционировать, т. е. непрерывно изменяться со временем. В 1929 г. Э. Хаббл экспериментально подтвердил теоретический вывод А.А. Фридмана о расширении Вселенной, обнаружив, что галактики удаляются друг от друга. Причём скорость удаления галактик прямо пропорциональна расстоянию до неё $v_r = H \cdot r$ — *закон Хаббла*. Постоянная Хаббла с течением времени постепенно уменьшается, т. е. разбегание галактик замедляется. Расширение Вселенной проявляется только на уровне скоплений и сверхскоплений галактик, т. е. систем, элементами которых являются галактики. Обратной величиной постоянной Хаббла определяется *время жизни (возраст) Вселенной*.

Произведение времени жизни Вселенной на скорость света определяет радиус *космологического горизонта* — границу наблюдаемой Вселенной, т. е. размеры Метагалактики. Радиус космологического горизонта $\sim 10^{26}$ м и он каждую секунду увеличивается примерно на 300 тыс. км.

Экстраполяция к прошлому приводит к выводу, что Вселенная возникла $13,7 \pm 0,13$ млрд лет назад из некоторого начального «сингулярного» состояния и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается — *теория Большого взрыва*. При этом центра расширения не было — все точки во Вселенной равноправны. Что было до начала расширения Вселенной, пока до конца не выяснено, так как при очень больших плотностях материи вступают в действие еще не известные нам законы природы.

Согласно известным ограничениям применимости современных физических теорий, наиболее ранним моментом, допускающим описание, считается момент Планковской эпохи с температурой примерно 10^{32} К (Планковская температура) и плотностью около 10^{93} г/см³ (Планковская плотность). Ранняя Вселенная представляла собой высокооднородную и изотропную среду с необычайно высокой плотностью энергии, температурой и давлением. В результате расширения и охлаждения во Вселенной произошли фазовые переходы,

аналогичные конденсации жидкости из газа, но применительно к элементарным частицам.

Удовлетворительное описание свойств ранней Вселенной даётся в модели экспоненциального роста размеров Вселенной Виллема де Ситтера $r \sim e^{Ht}$. Согласно этой модели вся энергия мира была заключена в его вакууме, которая затем перешла в энергию обычной материи. Деситтеровская стадия расширения длилась $\sim 10^{-35}$ с. В это время гравитационное взаимодействие отделилось от остальных фундаментальных взаимодействий — Планковское время составляет $\sim 10^{-43}$ с после Большого взрыва.

Общая схема последующей эволюции Вселенной представляется следующим образом:

Адронная эра (до $t \approx 10^{-4}$ с, $\rho > 10^{14}$ г/см³; $T > 10^{12}$ К). Приблизительно через 10^{-35} с после наступления Планковской эпохи фазовый переход вызвал экспоненциальное расширение Вселенной — данный период получил название *космической инфляции*, после окончания которого строительный материал Вселенной представлял собой кварк-глюонную плазму. По прошествии времени температура упала до значений, при которых стал возможен следующий фазовый переход, называемый *бариогенезисом*. На этом этапе кварки и глюоны объединились в барионы, такие как протоны и нейтроны. При этом одновременно происходило асимметричное образование как материи, которая превалировала, так и антиматерии, которые взаимно аннигилировали, превращаясь в излучение. Важной особенностью этой стадии является сосуществование вещества (протонов и нейтронов) с антивеществом (антинейтронами и др.).

Лептонная эра (до $t \approx 10$ с, $10^{14} > \rho > 10^4$ г/см³, $10^{12} > T > 10^{10}$ К). Дальнейшее падение температуры привело к следующему фазовому переходу — образованию физических сил и элементарных частиц в их современной форме. После чего наступила эпоха *нуклеосинтеза*, при которой протоны, объединяясь с нейтронами, образовали ядра дейтерия, гелия-4 и ещё нескольких лёгких изотопов. Именно в это время и образуется основная часть гелия, содержащегося в звездах и галактиках. На долю гелия приходится около 30 %, на долю водорода — около 70 %, а на долю остальных химических элементов — менее 1 % массы вещества.

Эра излучения (от 10 с до 10^{13} с, $\rho < 10^4$ г/см³, $10^{10} > T > 3000$ К). После дальнейшего падения температуры и расширения Вселенной наступил следующий переходный момент, при котором *гравитация* стала доминирующей силой. Основной вклад в гравитационную массу Вселенной давало излучение. В начале эры закончился синтез гелия и продолжались процессы аннигиляции электронов с позитронами. Все это время температура излучения оставалась одинаковой с температурой вещества.

Эра вещества начинается с момента рекомбинации и продолжается до сих пор. При уменьшении температуры до 3000 К энергия фотонов уже недостаточна для ионизации атомов водорода. Поэтому процессы рекомбинации электронов с протонами уже не уравниваются обратными процессами ионизации, и происходит "отрыв" излучения от вещества — стало возможным существование атомов водорода. С этого момента главную роль в расширении Вселенной начинает играть не излучение, а вещество.

Материя стала прозрачной для излучения, которое, свободно распространяясь в пространстве, дошло до нас в виде реликтового излучения, которое считается доказательством пребывания Вселенной в сверхплотном и горячем состоянии. Реликтовое электромагнитное излучение находится в радиодиапазоне с

длинами волн от 0,06 см до 60 см, распределение энергии похоже на спектр абсолютно черного тела температурой 2,7 К. Оно совершенно изотропно, пронизывает все пространство, все галактики и участвует в расширении Вселенной. Одним из первых предсказал это излучение Д. Гамов, разрабатывая теорию происхождения химических элементов, возникших в первые минуты после Большого взрыва.

Космологические модели Вселенной приводят к выводу, что её судьба зависит только от средней плотности ρ_0 заполняющего её вещества. В зависимости от значения ρ_0 расширение Вселенной может происходить неограниченно во времени или же со временем сменится сжатием.

Эта зависимость определяется значением критической плотности $\rho_{кр}$, рассчитанной из теории Фридмана.

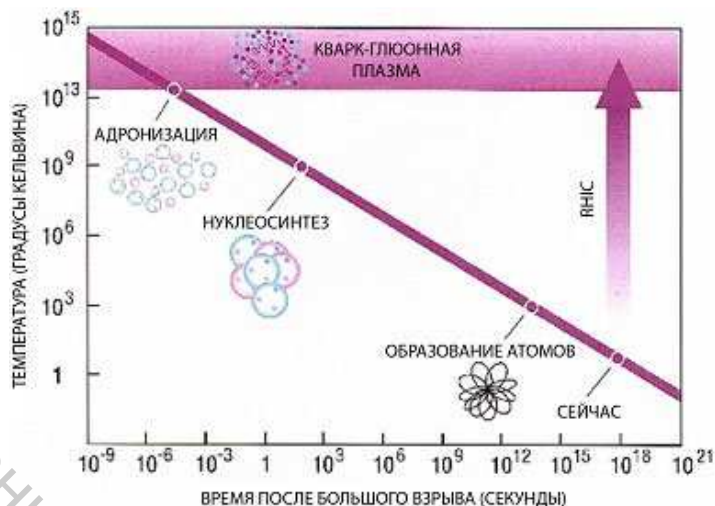


Рисунок 43 – Эволюция Вселенной

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Отношение средней плотности Вселенной к критической обозначается $\Omega = \rho_0/\rho_{кр}$.

При $\Omega < 1$ расширение Вселенной будет вечным, причём скорости галактик никогда не будут стремиться к нулю — «открытая» модель Вселенной. Пространство в такой модели бесконечное, имеет отрицательную кривизну и описывается геометрией Лобачевского.

При $\Omega = 1$ расширение Вселенной будет вечным, но в бесконечности его скорость будет стремиться к нулю — стационарная модель Вселенной. Пространство в такой модели бесконечное, плоское и описывается геометрией Евклида.

При $\Omega > 1$ расширение Вселенной сменится сжатием, коллапсом и закончится тем, что Вселенная сожмётся в сингулярную точку — «закрытая» модель Вселенной. Пространство в такой модели конечное, имеет положительную кривизну, по форме представляет собой трёхмерную гиперсферу и описывается сферической геометрией Римана.

Определить из наблюдений истинную плотность вещества в нашей Вселенной достаточно сложно. Плотность наблюдаемого вещества во Вселенной меньше критической ($\approx 3 \cdot 10^{-34}$ кг/м³), однако во Вселенной имеется много невидимого вещества. Произведенный в последнее время учет скрытой массы и массы физических полей (согласно общей теории относительности) приближает истинную среднюю плотность Вселенной к критическому значению. По современным данным $\Omega = 1,0023 \pm 0,0055$.

Солнечная система

Солнечная система — это планетная система, включающая в себя центральную звезду — Солнце — и все естественные космические объекты, вращающиеся вокруг неё. Центральным объектом Солнечной системы является **Солнце**, в котором сосредоточена подавляющая часть всей массы системы (около 99,866 %). Оно удерживает своим тяготением планеты и прочие тела, принадлежащие к Солнечной системе.

Большинство крупных объектов, обращающихся вокруг Солнца, движутся практически в одной плоскости, называемой плоскостью эклиптики. У более близких к Солнцу объектов (с меньшей большой полуосью) больше угловая скорость вращения, поэтому короче период обращения (год). Орбиты объектов вокруг Солнца описываются законами Кеплера. Согласно им, каждый объект обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. На эллиптической орбите расстояние объекта от Солнца изменяется в течение его года. Ближайшая к Солнцу точка орбиты объекта называется перигелий, наиболее удалённая — афелий. Каждый объект движется наиболее быстро в своём перигелии и наиболее медленно в афелии.

Согласно современным представлениям планеты Солнечной системы образовались из холодного газопылевого облака, окружавшего

Солнце миллиарды лет назад. Все планеты и большинство других объектов обращаются вокруг Солнца в одном направлении с вращением Солнца. Самой большой угловой скоростью обладает Меркурий — он успевает совершить полный оборот вокруг Солнца всего за 88 земных суток. А для самой удалённой планеты — Нептуна — период обращения составляет 165 земных лет. Большая часть планет вращается вокруг своей оси в ту же сторону, что и обращается вокруг Солнца. Исключения составляют Венера и Уран, причём Уран вращается практически «лёжа на боку» (наклон оси $\sim 90^\circ$).

Все объекты Солнечной системы официально делят на три категории: планеты, карликовые планеты и малые тела Солнечной системы. **Планета** — любое тело на орбите вокруг Солнца, оказавшееся достаточно массивным, чтобы приобрести сферическую форму, но недостаточно массивным для начала термоядерного синтеза, и сумевшее очистить окрестности своей орбиты от планетезималей. Согласно этому определению в Солнечной системе имеется восемь известных планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. **Карликовая планета** — небесное тело, обращающееся по орбите вокруг Солнца, которое достаточно массивно, чтобы под действием собственных сил гравитации поддерживать близкую к округлой форму, но которое не очистило пространство своей орбиты от планетезималей и не является спутником планеты. По этому определению у Солнечной системы имеется пять признанных карликовых планет: Церера, Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида. Оставшиеся объекты, обращающиеся вокруг Солнца — малые тела Солнечной системы.

Внутренняя часть Солнечной системы включает четыре планеты земной группы и пояс астероидов. Четыре внутренние планеты состоят преимущественно из тяжёлых элементов, имеют малое количество (0 - 2) спутников, у них отсутствуют кольца. В значительной степени они состоят из тугоплавких минералов, таких как силикаты, которые формируют их мантию и кору, и металлов, таких как железо и никель, которые формируют их ядро. Хотя планеты земной группы похожи друг на друга, но всё же каждая из них имеет свои неповторимые особенности.

Меркурий — ближайшая к Солнцу и самая малая планета в земной группе ($0,055 M_\oplus$). У Меркурия нет спутников, а его единственными известными геологическими особенностями, помимо ударных кратеров, являются многочисленные зубчатые откосы, простирающихся на сотни километров — эскарпы, возникшие, вероятно, во время приливных деформаций на раннем этапе истории планеты. Меркурий имеет крайне разреженную атмосферу, она состоит из атомов, «выбитых» с поверхности планеты солнечным ветром.

Венера близка по размеру к Земле ($0,815 M_3$) и, как и Земля, имеет толстую силикатную оболочку вокруг железного ядра и атмосферу. Однако количество воды на Венере гораздо меньше земного, а её атмосфера в девяносто раз плотнее. У Венеры нет спутников. Это самая горячая планета, температура её поверхности превышает 400°C . Наиболее вероятной причиной столь высокой температуры является парниковый эффект, возникающий из-за плотной атмосферы, богатой углекислым газом.

Земля является крупнейшей и самой плотной из внутренних планет. Среди планет земной группы она уникальна — прежде всего, наличием жизни и гидросферой. Атмосфера Земли радикально отличается от атмосфер других планет — она содержит свободный кислород. У Земли есть один естественный спутник — Луна, единственный большой спутник планет земной группы Солнечной системы.

Марс меньше Земли и Венеры ($0,107 M_3$), обладает атмосферой, состоящей главным образом из углекислого газа. На его поверхности есть вулканы, самый большой из которых, Олимп, превышает размерами все земные вулканы, достигая высоты 21,2 км. Красный цвет поверхности Марса вызван большим количеством оксида железа в его грунте. У планеты есть два спутника — Фобос и Деймос. Предполагается, что они являются захваченными астероидами.

Внешняя часть Солнечной системы начинается за пределами пояса астероидов и включает четыре газовых гиганта, которые обладают кольцами, тонкими полосами крошечных частиц, обращающимися по очень близким орбитам практически в унисон. Четыре планеты-гиганта все вместе содержат 99 % массы вещества, обращающегося на орбитах вокруг Солнца, при том, что около 90 % приходится на Юпитер и Сатурн.

Юпитер обладает массой в $318 M_3$, что в 2,5 раза массивнее всех остальных планет, вместе взятых. Он состоит главным образом из водорода и гелия. Высокая внутренняя температура Юпитера вызывает множество полупостоянных вихревых структур в его атмосфере, таких как полосы облаков и Большое красное пятно. У Юпитера имеется 65 спутников. Четыре крупнейших — Ганимед, Каллисто, Ио и Европа — схожи с планетами земной группы такими явлениями, как вулканическая активность и внутренний нагрев. Ганимед, крупнейший спутник в Солнечной системе, больше Меркурия.

Сатурн, известный своей обширной системой колец, имеет несколько схожие с Юпитером структуру атмосферы и магнитосферы. Масса Сатурна $\sim 95 M_3$. Сатурн — наименее плотная планета Солнечной системы (его средняя плотность сравнима с плотностью воды). У Сатурна имеется 62 подтверждённых спутника; два из них — Титан и Энцелад — проявляют признаки геологической активности.

Однако эта активность не похожа на земную, поскольку, в значительной степени, обусловлена активностью льда. Титан, превосходящий размерами Меркурий, — единственный спутник в Солнечной системе с существенной атмосферой.

Уран является самой лёгкой из внешних планет, его масса $\sim 14 M_3$. Уникален тем, что вращается «лёжа на боку»; наклон оси его вращения к плоскости эклиптики составляет примерно 98 градусов. Если другие планеты можно сравнить с вращающимися волчками, то Уран больше похож на катящийся шар. Он имеет намного более холодное ядро, чем другие газовые гиганты, и излучает очень немного тепла в космос. У Урана открыты 27 спутников; крупнейшие — Титания, Оберон, Умбриэль, Ариэль и Миранда.

Нептун немного меньше Урана, но более массивен $\sim 17 M_3$ и поэтому более плотный. У Нептуна имеется 13 известных спутников. Крупнейший — Тритон, является геологически активным, с гейзерами жидкого азота. Тритон — единственный крупный спутник, движущийся в обратном направлении. Нептун сопровождается астероидами, называемыми Нептунские троянцы, которые находятся с ним в резонансе 1:1.

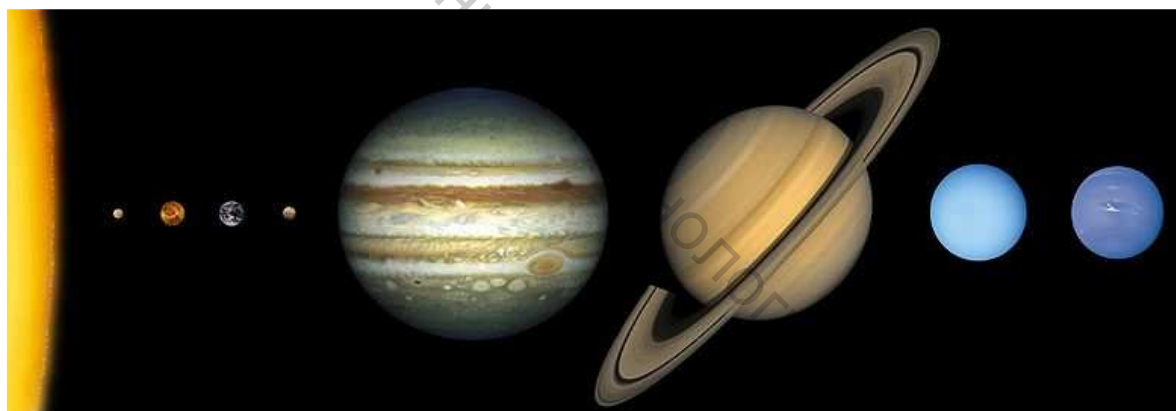


Рисунок 44 – Приблизительное соотношение размеров планет и Солнца

Земля

По современным данным считают, что Земля образовалась из Солнечной туманности около 4,54 миллиардов лет назад, и вскоре после этого приобрела свой единственный естественный спутник — Луну. Жизнь появилась на Земле около 3,5 миллиардов лет назад. С тех пор биосфера Земли значительно изменила атмосферу и прочие абиотические факторы, обусловив количественный рост аэробных организмов, так же как и формирование озонового слоя, который вместе с магнитным полем Земли ослабляет вредную солнечную радиацию, тем самым сохраняя условия для жизни на Земле.

Приблизительно 70,8 % поверхности планеты занимает Мировой океан, остальную часть поверхности занимают континенты и острова. Жидкая вода, необходимая для всех известных жизненных форм, не существует на поверхности какой-либо из известных планет и планетоидов Солнечной системы. Внутренние области Земли достаточно активны и состоят из толстого, относительно твёрдого слоя, называемого мантией, которая покрывает жидкое внешнее ядро (которое и является источником магнитного поля Земли) и внутреннее твёрдое железное ядро. Кора Земли разделена на несколько сегментов, или тектонических плит, которые постепенно мигрируют по поверхности за периоды во много миллионов лет.

Земля взаимодействует (притягивается гравитационными силами) с другими объектами в космосе, включая Солнце и Луну. Она обращается вокруг Солнца и делает вокруг него полный оборот примерно за 365,26 дней — сидерический год. Ось вращения Земли наклонена на $23,4^\circ$ относительно её орбитальной плоскости, что вызывает сезонные изменения на поверхности планеты с периодом в один тропический год (365,24 солнечных суток). На протяжении года

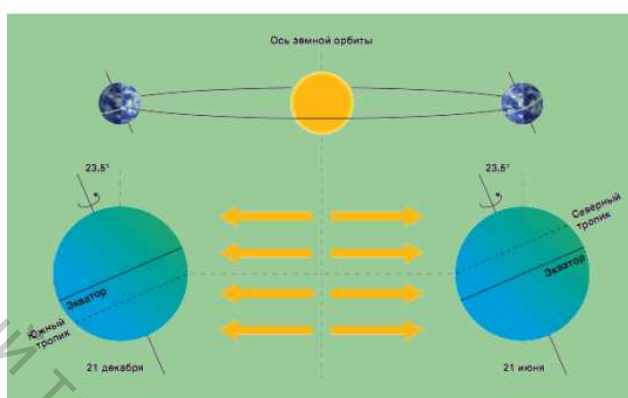


Рисунок 45 – Вращение Земли вокруг Солнца

расстояние от Солнца до Земли периодически меняется: от 147,1 млн км (3 января) до 152,1 млн км (4 июля). Самая близкая к Солнцу точка земной орбиты называется перигелием, а самая далекая — афелием или апогелием. Количество поступающей солнечной энергии в данную точку земной поверхности в течение года изменяется. Поэтому на Земле происходит смена времен года. Это изменение количества энергии происходит по двум причинам: из-за изменения расстояния от Земли до Солнца в перигелии (3 января) количество энергии, поступающее на Землю, на 7 % больше, чем в афелии (4 июля), но более существенно солнечная энергия, поступающая на данную поверхность Земли, изменяется из-за изменения наклона падения солнечных лучей.

Луна начала своё обращение на орбите вокруг Земли примерно 4,53 миллиарда лет назад, что стабилизировало осевой наклон планеты и является причиной приливов, которые замедляют вращение Земли. Некоторые теории полагают, что падения астероидов приводили к существенным изменениям в окружающей среде и поверхности Земли, в частности, массовые вымирания различных видов живых существ.

По форме Земля близка к двuosному эллипсоиду. Наибольшую высоту над поверхностью мирового океана (8848 км) имеет вершина Джомолунгма (Эверест), находящаяся в Гималаях, а наибольшую глубину (11 022 м) имеет Марианский желоб в Тихом океане.

Земля, как и другие планеты земной группы, имеет слоистое внутреннее строение. Она состоит из твёрдых силикатных оболочек (коры, крайне вязкой мантии) и металлического ядра. Внешняя часть ядра жидкая, а внутренняя — твёрдая. Внутренняя теплота планеты, скорее всего, обеспечивается радиоактивным распадом изотопов калия-40, урана-238 и тория-232. У всех трёх элементов период полураспада составляет более миллиарда лет. В центре планеты температура, возможно, поднимается до 7 000 К, а давление может достигать 3,6 млн атм.

Сейчас считают, что земная кора вместе с гидросферой и атмосферой образовалась в результате вулканической деятельности — выбросы лавы, пара и газов из внутренних частей мантии. Вулканическая деятельность также привела к образованию гор. Мощнейшие толщи вторичных пород (в том числе и преобразованных в граниты) земной коры — ярчайший показатель необычно высокой активности действующих на Земле экзогенных процессов по сравнению с процессами на других планетах.

Атмосфера сохраняет тепло солнечных лучей, защищает живое от губительного воздействия далеких ультрафиолетовых солнечных излучений и космических лучей. Без атмосферы на Земле был бы резкий температурный контраст между освещенной и неосвещенной солнечным излучением сторонами планеты.

Природа щедро раздала свои материальные ресурсы нашей планете. 98,6 % массы физически доступного слоя Земли составляют всего восемь химических элементов (рис. 46). Но если сравнить их с наиболее часто употребляемыми материалами, то нетрудно заметить некую обратно пропорциональную зависимость: чаще всего человек использует те

вещества, запасы сырья которых ограничены, и, наоборот, крайне слабо использует такие химические элементы и их соединения, сырьевые ресурсы которых почти безграничны.

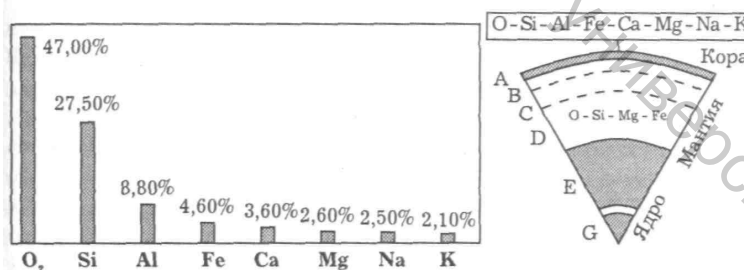


Рисунок 46 – Природное распределение химических элементов Земли

Тема 10. Эволюция жизни, синергетика

Концепции происхождения жизни

В современном естествознании существует пять основных концепций возникновения жизни:

1) *Креационизм* — божественное сотворение живого, является религиозной концепцией и к науке прямого отношения не имеет. В качестве основополагающего тезиса рассматривается положение о том, что жизнь не может возникнуть случайно — она представляет собой акт преднамеренного творения, и для вечной, безграничной Вселенной характерно неизменное постоянство картин жизни.

2) *Самопроизвольное зарождение* — согласно этой теории жизнь возникала и возникает неоднократно из неживого вещества. До XIX в. были распространены "теории", согласно которым жизнь возникает в болотах, гниющей массе и тому подобных местах. Именно там из неживой материи возникают живые организмы — личинки мухи и даже мыши. Однако французский микробиолог Луи Пастер, изучавший деятельность бактерий, опроверг теорию спонтанного зарождения. Своими опытами он доказал, что бактерии вездесущи и легко заражают неживые материалы.

3) *Теория стационарного состояния*, в соответствии с которой жизнь существовала всегда. Из-за своей оригинальности и умозаключительности она всегда имела немного сторонников.

Теории самозарождения и стационарного состояния представляют собой только исторический или философский интерес, так как результаты научных исследований противоречат выводам этих теорий.

4) *Панспермия* — гипотеза о внеземном происхождении жизни, согласно которой жизнь была занесена на Землю извне. Она опиралась на обнаружение при изучении метеоритов и комет "предшественников живого" — органических соединений, которые, возможно, сыграли роль "семян". Гипотеза не получила поддержки учёных, т. к. не представлялось возможным длительное путешествие микроорганизмов в космическом пространстве, не погибая от губительных излучений. Однако в 1984 г. голландский ученый М. Гринберг показал, что в условиях вакуума и чрезвычайно низкой температуры, характерной для межзвездной среды, бактериальные споры могут противостоять радиации в течение нескольких тысяч лет. Этого, конечно, недостаточно, чтобы перенестись от звезды к звезде, но если "материнская" звезда проходит через пылевое облако, некоторые споры получают от его частиц дополнительную защиту и могут путешествовать миллионы лет. В любом случае, эта теория ничего не даёт, т. к. позволяет разрешить лишь проблему происхождения земной жизни, но не имеет никакого отношения к происхождению жизни изначально.

5) *Теория биохимической эволюции*, согласно которой жизнь возникла в специфических условиях древней Земли в результате процессов, подчиняющихся физическим и химическим законам.

Согласно данным современной науки возраст Земли составляет примерно 4,5 – 5 млрд лет. В далеком прошлом условия на Земле коренным образом отличались от современных, что обусловило определенное течение химической эволюции, которая явилась предпосылкой для возникновения жизни. Т. е. биологической эволюции предшествовала *предбиотическая* эволюция, связанная с переходом от неорганической материи к органической, а затем к элементарным формам жизни. Это было возможным в определенных условиях, которые имели место на Земле в то время, а именно:

- высокая температура, порядка 4000 °C;
- атмосфера, состоящая из водяных паров, CO₂, CH₄, NH₃;
- присутствие сернистых соединений (вулканическая активность);
- высокая электрическая активность атмосферы (молнии);
- ультрафиолетовое излучение Солнца, которое беспрепятственно достигало нижних слоев атмосферы и поверхности Земли, поскольку озоновый слой еще не сформировался.

Одно из важнейших отличий теории биохимической эволюции от теории самопроизвольного

зарождения — жизнь возникла в условиях, которые для современной биоты непригодны! Эта теория отражает современные естественнонаучные взгляды.

В 1924 г. будущий академик А.И. Опарин опубликовал статью «Происхождение жизни», в которой предположил, что первые сложные углеводороды могли возникать в океане из более простых соединений, постепенно накапливаясь и приводить к возникновению «первичного бульона» — *гипотеза Опарина-Холдейна*. Эта гипотеза быстро приобрела вес теории, согласно которой процесс, приведший к возникновению жизни на Земле, может быть разделён на три этапа: возникновение органических веществ, возникновение белков, возникновение белковых тел.



Рисунок 47 – Условия зарождения жизни на Земле

Опарин предполагал, что решающая роль в превращении неживого в живое принадлежит белкам, которые способны образовывать гидрофильные комплексы: молекулы воды образуют вокруг них оболочку. Эти комплексы могут обособляться от водной фазы и образовывать так называемые коацерваты с липидной оболочкой, из которой затем могли образоваться примитивные клетки. Теория была обоснована, однако она оказалась неспособной предложить решение проблемы точного воспроизведения единичных, случайно появившихся эффективных белковых структур внутри коацервата и в поколениях. Это вполне объяснимо, поскольку механизм передачи наследственных признаков и роль ДНК стали известны сравнительно недавно.

В 1953 г. С. Миллер, смоделировав предполагаемые условия древней Земли (высокая температура, ультрафиолетовая радиация, электрические разряды), синтезировал в лабораторных условиях 15 аминокислот, входящих в состав живого, и некоторые простые сахара (рибоза) – и теория Опарина получила экспериментальное подтверждение. В настоящее время синтезированы все 20 аминокислот, составляющих основу жизни.

Однако любая сколь угодно сложная комбинация аминокислот и других сложных органических соединений – это еще не жизнь. Ведь важнейшее свойство жизни – ее способность к самовоспроизведению. Поэтому решающую роль в возникновении жизни впоследствии отводили появлению механизма репликации молекулы ДНК. Дело в том, что сама по себе ДНК «беспомощна», она может функционировать *только при наличии белков-ферментов* (например, молекула ДНК-полимеразы, «расплетающая» молекулу ДНК, подготавливая ее к репликации). Остается открытым вопрос, как самопроизвольно могли возникнуть такие сложнейшие «машины» как пра-ДНК и нужный для ее функционирования сложный комплекс белков-ферментов.

В последнее время разрабатывается идея *возникновения жизни на основе РНК*, т. е. первыми организмами могли быть РНК, которые, как показывают опыты, могут эволюционировать даже в пробирке. Условия для эволюции таких организмов наблюдаются при кристаллизации глины. Эти предположения основаны, в частности, на том, что при кристаллизации глины каждый новый слой кристаллов выстраивается в соответствии с особенностями предыдущего, как бы получая от него информацию о строении. Это напоминает механизм репликации РНК и ДНК. Таким образом, получается, что химическая эволюция началась с неорганических соединений, и первые биополимеры могли быть результатом автокаталитических реакций *малых молекул* алюмосиликатов глины.

Конечно, не на каждой планете возможно зарождение и развитие жизни — для этого необходимо выполнение определённых **планетных условий**:

1. Расстояние до звезды — планеты не должны обращаться вокруг звезды слишком близко или слишком далеко: необходимо, чтобы температуры их поверхностей были благоприятны для развития жизни. Возраст звезды должен насчитывать несколько миллиардов лет, в течение которых она не должна существенно менять своей светимости. Кроме того, звезда не должна быть двойной или кратной, т. к. орбитальное движение планет было бы существенно отличным от кругового, и резкие изменения температуры поверхности планеты исключили бы возможность развития на ней жизни.

2. Масса планеты — не должна быть ни слишком большой, ни слишком маленькой: в первом случае гигантская атмосфера, богатая водородом и его соединениями, исключает возможность развития жизни, а во втором случае за время эволюции атмосфера будет рассеиваться. Кроме того, для нормального существования на планете живых организмов, их размножения и устойчивого развития необходима определённая степень притяжения.

3. Наличие воды — одно из обязательных и неизменных условий.

4. Наличие у планеты магнитного поля, т. к. при его отсутствии солнечный ветер активно взаимодействует с верхними слоями атмосферы, при этом молекулы воды расщепляются и водород покидает планету, которая полностью обезвоживается.

5. Характеристика поверхности — поверхность планеты должна быть твёрдой, с невысокой вулканической активностью.

6. Радиационный фон на планете.

7. Астероидная ситуация — планета не должна находиться под угрозой частых столкновений с астероидами, которые могут нанести существенный ущерб поверхности планеты и тем самым вернуть её в прежнее состояние.

Таким образом, вероятность возникновения и развития жизни наиболее высока на планетах, которые находятся в так называемой зоне обитаемости — «поясе жизни».

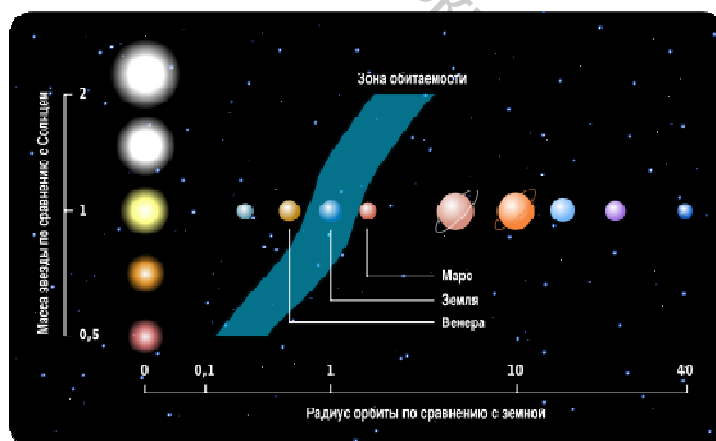


Рисунок 48 – Зона обитаемости

Эволюция живой природы

Понятие "эволюция" подразумевает процесс длительных, постоянных, медленных изменений, которые в конечном итоге приводят к изменениям коренным, качественным, завершающимся возникновением новых более сложных материальных систем, структур, форм и видов. Под эволюцией живого мира понимают процесс развития природы со времени возникновения жизни до настоящего времени.

Собственно биологическая эволюция начинается с возникновения клеточной организации и в дальнейшем идет по пути совершенствования строения и функций клетки, образования многоклеточной организации, деления живого на царства растений, животных, грибов с последующей их дифференциацией на виды.

Первая научная классификация живой природы была создана Карлом Линнеем в XVIII в. Он описал более 8 тысяч растений, ввел терминологию и строго иерархический порядок описания видов. Хотя его классификация была основана на внешних признаках, деление на вид, класс, род практически сохранено и в настоящее время. За единицу классификации был принят **вид** — совокупность особей, сходных по строению и дающих похожее на них потомство.

В 1864 г. немецкими зоологами Ф. Мюллером и Э. Геккелем был сформулирован **биогенетический закон**: каждая особь в своем индивидуальном развитии (онтогенезе) повторяет историю развития своего вида (филогенез), т. е. онтогенез есть краткое повторение филогенеза.

В 1893 г. бельгийским ученым Л. Долло на основе изучения большого палеонтологического материала был сформулирован **закон необратимости эволюции**: организм (популяция, вид) не может вернуться к прежнему состоянию, уже осуществленному в ряду его предков, т. е. эволюция необратима.

Однако, в качестве самостоятельно поставленного, с вопросом об эволюции живого выступил только Ж.Б. Ламарк, который впервые ввел в науку термин "биология". Учение Ламарка — первое эволюционное учение, созданное в начале XIX в., заключалось в том, что все организмы в процессе исторического развития претерпевают прогрессивное усложнение — градации. При этом он установил связь между изменением организмов и окружающей средой. Он отверг идею постоянства видов, противопоставив ей представление об изменяемости видов. Его учение утверждало существование эволюции как исторического развития от простого к сложному. Ламарк совершенно правильно считал, что условия среды оказывают важное влияние на ход эволюционного процесса и впервые поставил вопрос о факторах эволюции.

В 1859 г. Ч. Дарвин опубликовал труд "Происхождение видов путем естественного отбора", в котором он предположил, что при

интенсивной конкуренции внутри популяции любые изменения, благоприятные для выживания в данных условиях, повышают способность особей размножаться и оставлять потомство. Это было началом формирования теории эволюции, совершающейся путём естественного отбора. При этом наибольший вклад Дарвина состоял не в том, что он доказал существование эволюции, а в том, что он объяснил, как она может происходить.

Опираясь на огромный фактический материал и практику селекционной работы по выведению новых сортов растений и пород животных, Ч. Дарвин сформулировал **основные принципы эволюционной теории**:

- изменчивость является неотъемлемым свойством всего живого;
- внутренняя противоречивость в развитии живой природы: с одной стороны, все виды организмов имеют тенденцию к размножению в геометрической прогрессии, а с другой — выживает и достигает зрелости лишь небольшая часть потомства;
- естественный отбор, который играет фундаментальную роль во всех теориях эволюции, постоянно распространяет по всему свету мельчайшие изменения, отбрасывая неприспособленные, сохраняя и слагая устойчивые, работая неслышно и невидимо над усовершенствованием каждого органического существа в связи с условиями его жизни, органическими и неорганическими.

Изменения видов — результат влияния естественного отбора на незначительные унаследованные отличия. Хотя существующие виды и обладают различными свойствами, считается, что эти свойства просто отражают исторический процесс дивергенции (расхождения), который уничтожил промежуточные формы или связующие виды. С течением времени в результате постепенных малых изменений возникают новые формы, совершенно отличные от родительского вида.

Теория эволюции Дарвина — это представление об эволюции как реальности, что означает определение жизни как динамической структуры естественного мира, а не статической системы. Виды не только изменяются во времени, но и связаны друг с другом происхождением от общих предков. Этот компонент эволюционной теории обеспечивает логическую программу для систематики, исследований по сравнительной анатомии, эмбриологии, биогеографии и т. д.

Дарвиновская революция была справедливо названа величайшей из всех научных революций, поскольку она потребовала полного изменения мировоззрения и подняла вопросы, касающиеся этики человека и его глубочайших убеждений.

Современная теория органической эволюции отличается от дарвиновской по ряду важнейших пунктов:

— элементарной структурой, с которой начинается эволюция, считается *популяция*, а не отдельная особь или вид, который включает в свой состав несколько популяций;

— в качестве элементарного явления или процесса рассматривается устойчивое *изменение генотипа популяции*;

— шире и глубже истолковываются факторы и движущие силы эволюции, выделяются основные и неосновные факторы.

Ч. Дарвин и последующие теоретики к основным факторам эволюции относили изменчивость, наследственность и борьбу за существование. В современной теории органической эволюции процессы изменения и наследственности опираются на следующие три основных фактора:

1. мутационные процессы — изменения наследственных свойств организмов, возникающие естественным путем или вызванные искусственными средствами;

2. популяционные волны — отклонения от среднего значения численности организмов в популяции и области ее расположения (ареала);

3. обособленность группы организмов — исключение получения и передачи генетической информации.

К указанным основным факторам эволюции часто добавляют частоту смены поколений в популяциях, темпы и характер мутационных процессов и некоторые другие. Следует подчеркнуть, что все перечисленные основные и неосновные факторы выступают не изолированно, а во взаимосвязи и взаимодействии друг с другом.

Таким образом, механизм эволюционного процесса и его движущая сила заключаются в действии естественного отбора, который является результатом взаимодействия популяций и окружающей их среды. Естественный отбор характеризуется как процесс выживания наиболее приспособленных и уничтожения неприспособленных организмов.

Все биологические эволюционные процессы разделяют на прогрессивные и регрессивные. Под *биологическим прогрессом* понимают возрастание приспособленности организмов к окружающей среде, ведущее к увеличению численности и более широкому распространению вида. *Биологический регресс* — это снижение уровня приспособленности к условиям обитания, уменьшение численности вида и площади видового ареала. Пути достижения биологического прогресса:

— *Ароморфоз* (морфологический прогресс) — возникновение в ходе эволюции признаков, которые существенно повышают уровень организации живых организмов. Так, в эволюции млекопитающих выделяют следующие крупные ароморфозы: возникновение шерстного покрова, живорождение, вскармливание детенышей молоком,

приобретение постоянной температуры тела, прогрессивное развитие легких, кровеносной системы и головного мозга. Формирование ароморфоза — длительный процесс, происходящий на основе наследственной изменчивости и естественного отбора.

— *Идиоадаптация* — это приспособление живого мира к окружающей среде, открывающее перед организмами возможность прогрессивного развития без принципиальной перестройки их биологической организации.

— *Общая дегенерация* — резкое упрощение организации, связанное с исчезновением целых систем, органов и функций. Очень часто дегенерация наблюдается при переходе видов к паразитическому образу существования. Несмотря на то, что общая дегенерация приводит к значительному упрощению организации, виды, идущие по этому пути, могут увеличивать свою численность и ареал, т. е. двигаться по пути биологического прогресса.

Основные доказательства эволюции живой природы:

1. *Единство происхождения органического мира:*

- все живые организмы (грибы, растения, животные) имеют удивительно близкий элементарный химический состав;
- у всех живых организмов особо важную роль в жизненных явлениях играют белки и нуклеиновые кислоты, которые построены всегда по единому принципу и из сходных компонентов — принципы генетического кодирования, биосинтеза белков и нуклеиновых кислот едины для всего живого;
- у подавляющего большинства организмов в качестве молекул — аккумуляторов энергии используется АТФ, одинаковы механизмы расщепления сахаров и основной энергетический цикл клетки;
- большинство организмов имеют клеточное строение.

2. *Эмбриологические доказательства эволюции:* все многоклеточные животные проходят в ходе индивидуального развития одинаковые стадии зародышевого развития — бластулы и гастролы. С особой отчетливостью выступает сходство эмбриональных стадий в пределах отдельных типов или классов. Например, у всех наземных позвоночных, так же и у рыб, обнаруживается закладка жаберных дуг, хотя эти образования не имеют функционального значения у взрослых организмов. Подобное сходство эмбриональных стадий объясняется единством происхождения всех живых организмов.

3. *Морфологические доказательства эволюции:*

а) Наличие форм, сочетающих в себе признаки нескольких крупных систематических единиц, — существование таких промежуточных форм указывает на то, что в прежние геологические

эпохи жили организмы, являющиеся родоначальниками нескольких систематических групп. Наглядным примером этого может служить одноклеточный организм эвглена зеленая, которая одновременно имеет признаки, типичные для растений и для простейших животных.

б) Наличие гомологичных органов, которые развиваются из одинаковых эмбриональных зачатков сходным образом. Например, в принципиальных чертах строение передних конечностей некоторых позвоночных сходны, несмотря на выполнение этими органами совершенно разных функций. Некоторые кости в скелете конечностей могут отсутствовать, другие – срастаться, относительные размеры костей могут меняться, но их гомология совершенно очевидна.

в) Наличие рудиментарных органов, которые не функционируют у взрослых животных и являются для них лишними, так же как и наличие гомологичных органов является свидетельством общности происхождения.

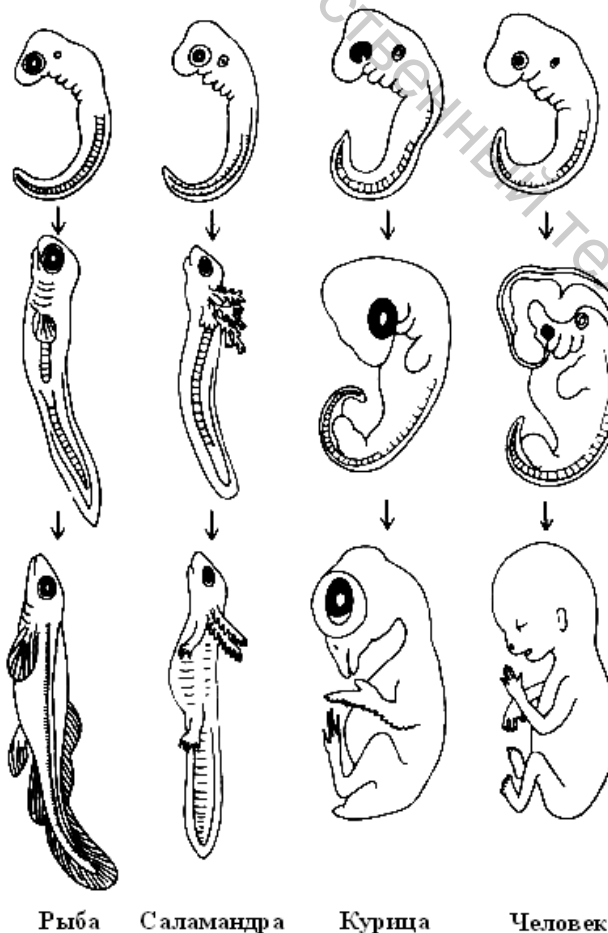


Рисунок 49 – Сходство эмбрионов

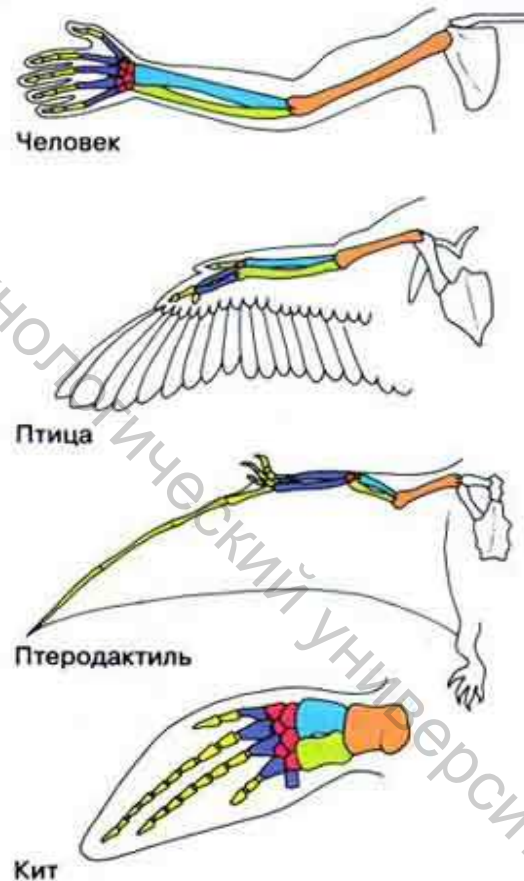


Рисунок 50 – Сходство передних конечностей

4. *Палеонтологические доказательства эволюции.*

Палеонтология указывает на причины эволюционных преобразований. В этом отношении интересна эволюция лошадей. Изменение климата на Земле повлекло за собой изменение конечностей лошади. Параллельно изменению конечностей происходило преобразование всего организма: увеличение размеров тела, изменение формы черепа и усложнение строения зубов, возникновение свойственного травоядным млекопитающим пищеварительного тракта и многое другое. В результате изменения внешних условий под влиянием естественного отбора произошло постепенное превращение мелких пятипалых всеядных животных в крупных травоядных. Богатейший палеонтологический материал — одно из наиболее убедительных доказательств эволюционного процесса, длящегося на нашей планете уже более 3 млрд лет.

5. *Биогеографические доказательства эволюции:* распределение видов животных и растений по поверхности планеты и их группировка в биографические зоны отражают процесс исторического развития Земли и эволюции живого.

6. *Островные фауна и флора*, которые полностью зависят от истории происхождения островов, представляют особый интерес.

Огромное количество разнообразных биогеографических фактов указывает на то, что особенности распределения живых существ на планете тесно связаны с преобразованием земной коры и с эволюционными изменениями видов.

Глобальный эволюционизм есть попытка естественнонаучными и математическими средствами описать развитие Вселенной как целостной многоуровневой системы. Основные тезисы глобального эволюционизма:

1. Вселенная, в силу связи всех ее составляющих, есть некая единая система.

2. Ее эволюция — рост разнообразия форм материальной организации, ограничиваемый тенденцией к их единству и кооперативности, — есть усложнение.

3. В процессе своей естественной эволюции Вселенная обретает с помощью человека способность не только познать саму себя, но и направлять свое развитие так, чтобы компенсировать или ослаблять дестабилизирующие факторы.

4. Главным дестабилизирующим фактором пока является социум: возросшее могущество человека уже не позволяет рассматривать его в качестве независимой системы, развивающейся на некоем фоне, называемом окружающей средой.

5. Ближайшая цель общественного развития — обеспечение коэволюции человека и биосферы, так как, если нагрузка на биосферу

будет возрастать, она делается непригодной для обитания, в том числе и для самого человека.

Таблица 2 – Основные этапы развития жизни на Земле

Реальная шкала времени	Относительная шкала времени	Этапы развития жизни
3,5 – 4 млрд л. н.	1 января	Процессы, приведшие к образованию органических молекул
	1 февраля	Свидетельства существования первых бактерий
	1 марта	Бактериальные колонии
3 млрд л. н.	1 апреля	Нитчатые фотосинтезирующие водоросли
	1 мая	Рост разнообразия бактерий
2,5 млрд л. н.	1 июня	Высокое разнообразие бактерий
2 млрд л. н.	1 июля	Развитие сложноорганизованных клеток
1,5 млрд л. н.	1 сентября	Первые клетки, характерные для живых и высших растений
1 млрд л. н.	1 октября	Рост разнообразия жизненных форм в морях, появление всех типов беспозвоночных
500 млн л. н.	1 ноября	Начало освоения суши, первые челюст-норотые рыбы, развитие позвоночных
300 млн л. н.	1 декабря	Развитие млекопитающих, динозавры, амфибии
100 млн л. н.		Господство млекопитающих
11 млн л. н.	31 декабря 8 ч	Начало эволюции человека
5 млн л. н.	16 ч	Ископаемые останки людей
	23 ч 59 м 58 с	Начало промышленной революции

Эволюционно-синергетическая парадигма

С эволюцией всех живых систем неразрывно связано понятие самоорганизации — процесса упорядочения в открытой системе за счёт согласованного взаимодействия множества элементов её составляющих, без внешнего специфического воздействия. В настоящее время концепция самоорганизации приобретает все большее значение, становясь парадигмой исследования обширного класса систем и процессов, происходящих в них.

В 70-х гг. XX в. возникла новая наука — *синергетика*, областью ее исследований является изучение эволюции различных структур, относительная устойчивость которых поддерживается благодаря притоку энергии и вещества извне. В основе синергетики лежит важное утверждение о том, что материальные системы могут быть закрытыми и открытыми, равновесными и неравновесными, устойчивыми и неустойчивыми, линейными и нелинейными, статическими и динамическими. Принципиальная же возможность процессов самоорганизации обусловлена тем, что в целом все живые и неживые, природные и общественные системы являются открытыми, неравновесными и нелинейными.

Возникновение синергетики связывают с именами бельгийского физика и химика И. Пригожина, немецкого физика Г. Хакена, другого немецкого ученого М. Эйгена, а также Б. Белоусова и А. Жаботинского.

И. Пригожин, разрабатывая современную термодинамику необратимых процессов (неравновесную термодинамику), открыл явление образования упорядоченных структур из хаотического, неупорядоченного состояния системы, т. е. самоорганизацию, и сформулировал теорему о минимуме производства энтропии в стационарном неравновесном состоянии. К своим идеям он пришел, анализируя специфические химические реакции, которые впервые экспериментально были изучены Белоусовым и Жаботинским. Пригожин построил математическую модель таких реакций и показал, что в сильно неравновесных условиях может совершаться переход от беспорядка, теплового хаоса к порядку, организованности.

Г. Хакен, изучая процессы самоорганизации, происходящие в лазере, назвал новое направление исследований *синергетикой*, что в переводе с греческого означает совместное действие, или взаимодействие, и хорошо передает смысл и цель нового подхода к изучению явлений.

М. Эйген доказал, что сформулированный Ч. Дарвином принцип отбора справедлив и на микроуровне, а генезис (происхождение жизни) — результат процесса отбора, происходящего на молекулярном уровне. Он показал, что сложные органические структуры с адаптационными характеристиками возникают благодаря эволюционному процессу отбора на основе автокатализа.

Основные понятия и принципы синергетики. В результате протекания различных процессов *изолированные системы*, согласно второму началу термодинамики, переходят в состояние теплового равновесия, которое соответствует максимальному беспорядку системы. Таким образом, самоорганизация, или эволюция, в случае замкнутой системы приводит ее в состояние максимального беспорядка. В реальности, тем не менее, часто наблюдаются совершенно противоположные явления.

Особенно ярко противоречие второго начала термодинамики проявилось с эволюционной теорией Дарвина, согласно которой в мире живого естественно протекающие процессы ведут к усложнению форм и структур, к увеличению порядка, избавлению от хаоса и удалению от равновесия. Другими словами, самоорганизация в живой природе приводит систему к прямо противоположному состоянию, чем самоорганизация в неживых системах. Это привело к появлению понятия открытой системы, которое и позволило устранить упомянутые противоречия.

Вообще, такие понятия как изолированная (закрытая) система, необратимые процессы являются идеализацией. При изучении обратимых процессов (например, качание маятника в вакууме при отсутствии трения) нет смысла говорить о направлении течения времени, т. к. прошлое, настоящее и будущее в этом случае не отличаются. Поэтому в уравнениях обратимых процессов время выступает всего лишь как параметр, который можно изменять. Но в реальности в случае с маятником всегда присутствует трение, колебания маятника будут затухающими, и прошлое, настоящее и будущее будут уже отличаться. Для необратимых процессов в живой природе эволюционным принципом стало II начало термодинамики, утверждающее, что энтропия изолированной системы возрастает. *Именно рост энтропии устанавливает направление протекания процесса, т. е. «стрелу времени».*

В книге «Что такое жизнь» выдающийся австрийский физик Э. Шредингер указал на то, что средство, при помощи которого организм поддерживает себя на достаточно высоком уровне упорядоченности, т. е. на достаточно низком уровне энтропии, в действительности состоит в непрерывном извлечении упорядоченности из окружающей его среды. Другими словами, организм извлекает из окружающей среды *негэнтропию*. *Открытая система* заимствует энергию и вещество из окружающей его среды и одновременно выводит в окружающую среду отработанное вещество и отработанную энергию. Выработывая и заимствуя энергию, открытая система производит энтропию, но она не накапливается в ней, а выводится в окружающую среду. С поступлением энергии и вещества в открытую систему ее неравновесность возрастает, разрушаются прежние связи между

элементами и возникают новые, которые приводят к новой структуре и новым кооперативным процессам, т. е. к коллективному поведению ее элементов.

Все сложные системы являются *нелинейными* — это означает, что для их описания используются нелинейные математические уравнения, т. е. уравнения, в которых искомые величины входят в степенях больше единицы, в составе математических функций (тригонометрических, логарифмических и т. п.) или коэффициенты зависят от свойств среды и особенностей протекания процесса. Нелинейные уравнения могут иметь несколько качественно различных решений — физически это означает возможность различных путей эволюции системы.

Итак, практически любая реальная сложная система описывается нелинейной системой уравнений, которая имеет не одно, а подчас целый спектр решений. Ответвления от известного решения появляются при изменении значений управляющих параметров системы (параметров порядка). Изменения управляющих параметров способны вызвать *катастрофические*, т. е. большие скачки переменных системы, и эти скачки осуществляются практически мгновенно. Таким образом, при изменении управляющих параметров в системе наблюдаются различные переходные явления, которые рассматривают с помощью, так называемой, диаграммы бифуркации (рис. 51).

1 — асимптотическая ветвь, где система остается устойчивой, т. е. при малых λ система имеет одно единственное решение;

2 — точка, где $\lambda = \lambda_c$ — здесь происходит потеря устойчивости и появляется два решения;

3 — система вновь находится в равновесии, причем существуют две устойчивые ветви b_2 и b_3 .

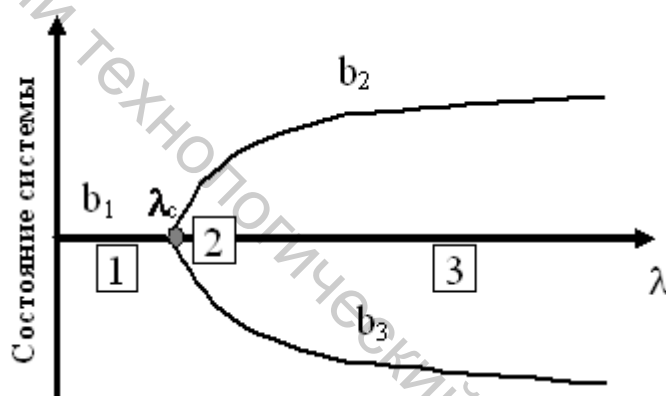


Рисунок 51 – Диаграмма бифуркации

Сама точка λ_c носит название точки бифуркации (от лат. раздвоение, размножение) или «точки катастрофы». Отклонение какой-либо величины от среднего значения называют флуктуацией. Малая флуктуация управляющего параметра может иметь определяющее значение для системы (она начинает развиваться либо по ветви b_2 , либо по ветви b_3). В биологической эволюции флуктуации проявляются в мутациях, изменчивости, в то время как устойчивость обусловлена естественным отбором.

Усложнение структуры и поведения системы тесно связано с появлением новых путей решения в результате бифуркаций. В сильно

неравновесных условиях процессы самоорганизации соответствуют «тонкому взаимодействию» между случайностью и необходимостью, флуктуациями и детерминистскими законами. Вблизи бифуркаций, т. е. резких, «взрывных» изменений системы, основную роль играют флуктуации или случайные элементы, тогда как в интервалах между бифуркациями преобладает детерминизм. Ситуацию, возникающую после воздействия флуктуации на систему и возникновения новой структуры, И. Пригожин назвал *порядком через флуктуацию* или *«порядком из хаоса»*. Флуктуации могут усиливаться в процессе эволюции системы или затухать — это зависит от эффективности «канала связи» между системой и внешним миром.

Общую *теорию устойчивости состояний систем* разработал русский математик А.М. Ляпунов. Очень кратко ее идею можно выразить следующим образом. *Устойчивые состояния* систем не теряют своей устойчивости при флуктуациях физических параметров, поскольку система за счет внутренних взаимодействий способна погасить возникающие флуктуации. *Неустойчивые системы*, наоборот, при возникновении флуктуаций способны усиливать их, и, в результате такого нарастания амплитуд возмущений, система уходит из стационарного состояния. *Критерием эволюции* при этом является величина $(dS/dt) < 0$, которая указывает направление развития физической системы к устойчивому стационарному состоянию. Величина прироста энтропии за единицу времени в единице объема называется *функцией диссипации*, а системы, в которых функция диссипации отлична от нуля, называются *диссипативными*. В таких системах энергия упорядоченного движения переходит в энергию неупорядоченного движения и, в конечном счете, в тепло. Практически все реальные системы являются диссипативными, поскольку трение и прочие силы сопротивления приводят к диссипации энергии (диссипация от лат. dissipatio – разгонять, рассеивать).

При определенных условиях суммарное уменьшение энтропии за счет обмена потоками с внешней средой может превысить ее внутреннее производство. Тогда неупорядоченное однородное состояние системы может потерять устойчивость. В ней возникают и могут возрасти до макроскопического уровня *крупномасштабные флуктуации*. При этом из хаоса могут возникнуть структуры, которые последовательно начнут переходить во все более упорядоченные. Образование этих структур происходит не из-за внешнего воздействия, а за счет внутренней перестройки системы, поэтому это явление и получило название *самоорганизации*. При этом энтропия, отнесенная к тому же значению энергии, убывает. Пригожин назвал упорядоченные образования, возникающие в диссипативных системах в ходе неравновесных необратимых процессов, *диссипативными структурами*. На макроуровне диссипативность проявляется как хаос.

На микроуровне диссипативность — это сила, выводящая систему на путь образования новых структур.

Понятие динамической системы состоит из двух частей: понятия состояния (существенной информации о системе) и динамики (правила, описывающего эволюцию системы во времени). Эволюцию можно наблюдать в пространстве состояний, или *фазовом пространстве*, — абстрактном пространстве, в котором координатами служат компоненты состояния. При этом координаты выбираются в зависимости от контекста. В случае механической системы это могут быть положение и скорость, в случае экологической модели — популяции различных биологических видов.

Пусть интересующий нас процесс зависит только от одной переменной (например, от времени t) и может быть смоделирован с помощью системы дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dx}{dt} = \vec{f}(\vec{x}), \quad \vec{x}(0) = \vec{x}_0, \quad \vec{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_N(t)),$$

$$\frac{dx}{dt} = \vec{f}(\vec{x}), \quad \vec{x}(0) = \vec{x}_0, \quad \vec{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_N(t)),$$

где $\vec{x}$ — N -мерный вектор, характеризующий состояние системы, $\vec{x}(0)$ — начальные данные.

К числу математических моделей такого рода относятся, например, уравнения механики для системы материальных точек (движение планет Солнечной системы, груза на наклонной плоскости, элементарной частицы в электромагнитном поле и др.).

Рассмотрим наиболее простой пример динамической системы — простой маятник. Его движение задается всего двумя переменными: положением и скоростью. Таким образом, его состояние — это точка на плоскости, координаты которой — положение маятника и его скорость. Это означает, что размерность вектора, характеризующего состояние маятника, $N = 2$. Эволюция состояния описывается правилом, которое выводится из законов Ньютона и выражается математически в виде дифференциального уравнения. Когда маятник качается взад-вперед, его состояние — точка на плоскости — движется по некоторой траектории («орбите»). В идеальном случае маятника без трения орбита представляет собой петлю; при наличии трения орбита закручивается по спирали к некоторой точке, соответствующей остановке маятника (рис. 52). В фазовом пространстве его движению соответствует периодическая траектория, или цикл. Неважно, как маятник запущен в движение, — в конце концов, он придет к тому же циклу. Точка или

множество точек (например, петля, цикл), к которому стремится прийти система, называется аттрактором (от лат. *attractio* – притягиваю).

Другими

словами, аттрактор — это точка или некоторое множество точек, к которому стремится

динамическая система с течением времени, как бы «забывая» начальные условия. Действительно, каковы бы не были начальные значения переменных системы, по мере

развития динамического процесса, они будут стремиться к одним и тем же значениям или одним и тем же множествам значений — аттракторам.

Таким образом, аттракторы — это геометрические структуры, характеризующие поведение системы в фазовом пространстве по прошествии длительного времени. Одна и та же система может иметь несколько аттракторов, тогда разные начальные условия могут привести к разным аттракторам. Множество точек, приводящих к некоторому аттрактору, называется его областью притяжения.

Свойства аттракторов задаются набором траекторий в пространстве n переменных состояний, которые зависят от времени как от параметра. В обычном аттракторе эти траектории простые (точка, окружность, эллипс и т. п.). Но ряд явлений сопровождается появлением траекторий запутанных, непохожих ни на точки, ни на кривые, ни на поверхности, они имеют вид «спутанных клубков», многослойных поверхностей. Такие аттракторы получили названия «странных аттракторов». Странность состоит в том, что, попав в область странного аттрактора, точка, соответствующая состоянию системы, будет «блуждать» там и только через большой промежуток времени приблизится к какой-либо точке аттрактора. Поведение системы выглядит при этом хаотическим, а ее дальнейшее поведение сильно зависит от начальных условий.

Таким образом, синергетика сформулировала принцип самодвижения в неживой природе, создание более сложных систем из более простых. В синергетике в противоположность кибернетике исследуются механизмы возникновения новых состояний, структур и форм в процессе самоорганизации, а не сохранения и поддержания старых форм. Т. е. реализуется принцип *положительной обратной*

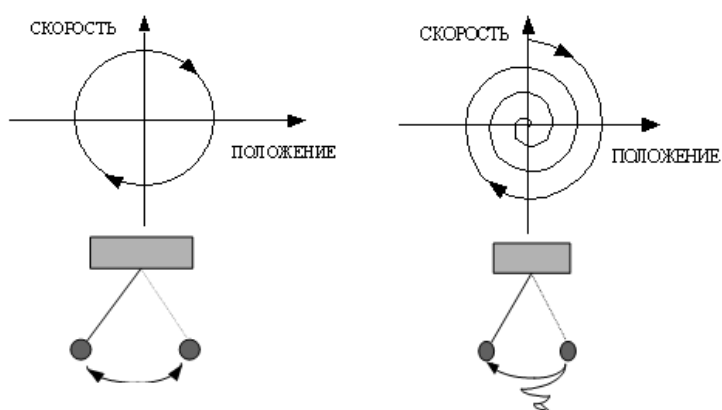


Рисунок 52 – Аттракторы и фазовые траектории

связи, когда изменения, возникающие в системе, не подавляются и корректируются, а, наоборот, постепенно накапливаются и, в конце концов, приводят к разрушению старой и возникновению новой системы. Кибернетика же отличается от синергетики тем, что она акцентирует внимание на анализе динамического равновесия в самоорганизующихся системах и опирается на принцип отрицательной обратной связи, согласно которому всякое отклонение системы корректируется управляющим устройством после получения информации об этом.

Синергетика подтверждает вывод теории относительности о взаимопревращении вещества и энергии и объясняет образование веществ. С точки зрения синергетики энергия как бы застывает в виде кристаллов, превращаясь из кинетической в потенциальную. Т. е. вещество — это застывшая энергия — в таком случае энергия может рассматриваться как созидатель новых структур, она творит более высокие уровни организации, а энтропия — это форма выражения количества связанной энергии вещества. Получается, что энергия — это творец, а энтропия — мера творчества.

Синергетика отвечает на вопрос, за счет чего происходит эволюция в природе. Механизм, который ею предлагается, — это спонтанная флуктуация, событие в точке бифуркации, экспоненциальный процесс до определенного момента и основным предстает понятие неустойчивости. Везде, где создаются новые структуры, необходим приток энергии и обмен со средой. Если в эволюции небесных тел мы видим результат производства, то в синергетике изучается процесс творчества природы. Развитие понимается в синергетике как процесс становления качественно нового, того, что еще не существовало в природе и предсказать которое невозможно.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой концепции современного естествознания?
2. Чем отличается естественнонаучная культура от гуманитарной?
3. Что такое теория «двух культур»?
4. Какова физиологическая природа основных способов мышления?
5. Охарактеризуйте подходы к познанию природы.
6. Какова классификация современных наук?
7. Какова структура научного познания?
8. Перечислите основные положения естественнонаучного познания.
9. Каковы критерии научности и характерные черты научного знания?
10. Расскажите о парадигмальной концепции.
11. Какова динамика развития науки?
12. Что утверждает принцип соответствия?
13. Каков ход развития естествознания?
14. Охарактеризуйте рождение науки.
15. Каковы основы учения ионийской школы?
16. Назовите древнегреческих учёных, чей вклад в науку особенно велик.
17. Расскажите о формировании механистической картины мира.
18. Каковы основные положения учения Коперника?
19. Сформулируйте законы движения планет.
20. Назовите основные понятия и законы механики.
21. В чём состоит суть закона всемирного тяготения?
22. Что означает детерминизм Лапласа?
23. Дайте общую характеристику механистической картины мира.
24. Что такое материя и каковы её основные свойства?
25. Каковы формы реализации материи?
26. Что такое вещество, антивещество и аннигиляция?
27. Охарактеризуйте понятие поля.
28. Каковы различия поля и вещества?
29. Что означает принцип целостности?
30. Что такое физический вакуум?
31. В чём заключается концепция дискретности и непрерывности?

32. Что такое система?
33. Что означает структурная организация материи?
34. Что такое энергия связи системы?
35. Каково структурное строение мира?
36. Сформулируйте принцип тождественности.
37. Что такое движение и каковы его основные свойства?
38. Назовите основные типы движения.
39. Какие формы движения материи вы знаете?
40. Что является мерой различных форм движения материи?
41. Сформулируйте закон сохранения и превращения энергии.
42. Что такое полная энергия тела?
43. Определите понятия изолированной, закрытой и открытой систем.
44. Что такое внутренняя энергия?
45. Определите понятие температуры.
46. Что такое абсолютная температура?
47. Сравните известные вам температурные шкалы.
48. Что означает статистическое описание макросистемы?
49. Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории.
50. В чём состоит причина универсальности газовых законов?
51. В чём суть термодинамического описания макросистем?
52. Что такое параметры и функции состояния системы?
53. Что означает равновесное и неравновесное состояние системы?
54. Какие типы процессов вы знаете?
55. Что изучает термодинамика?
56. Назовите и поясните начала термодинамики.
57. Что такое энтропия?
58. Сформулируйте закон возрастания энтропии.
59. Поясните понятие термодинамической вероятности.
60. Какова связь между термодинамической вероятностью и энтропией?
61. В чём заключалась проблема «тепловой смерти» Вселенной?
62. Что положено в основу термодинамики необратимых процессов?
63. В чём состоит суть принципа Ле Шателье-Брауна?
64. Назовите главные достоинства термодинамического подхода.

65. В чём состоят концепции пространства Ньютона и Лейбница?
66. Объясните основные постулаты специальной теории относительности.
67. Поясните преобразования Лоренца.
68. Какова зависимость массы движущегося тела от скорости?
69. Как взаимосвязаны понятия массы и энергии?
70. Каковы основные принципы и следствия общей теории относительности?
71. В чём суть концепций дальнего действия и ближнего действия?
72. Охарактеризуйте основные виды фундаментальных взаимодействий.
73. Что означает Стандартная Модель?
74. Расскажите об истории создания единой теории взаимодействий.
75. В чём состоит суть теории струн?
76. Что такое хиральность?
77. Что представляют собой фундаментальные постоянные?
78. В чём состоит суть антропного принципа?
79. Что означает термин симметрия?
80. Объясните связь законов сохранения и принципов симметрии.
81. В чём состоит уникальность законов сохранения?
82. Какие процессы называют колебательными?
83. Какие колебания называют гармоническими?
84. Какие механические колебательные системы вы знаете?
85. Что такое вынужденные и собственные колебания системы?
86. Что такое резонанс?
87. Опишите затухающие колебательные процессы.
88. Что такое волны?
89. Назовите основные характеристики волн.
90. Какие типы волн вы знаете?
91. Запишите уравнение бегущей волны.
92. Охарактеризуйте стоячие волны.
93. Что такое пучности и узлы стоячих волн?
94. Поясните общие свойства волн.
95. Охарактеризуйте звуковые волны.
96. Опишите диапазоны звуковых частот.
97. Какие характеристики звуковых волн вы знаете?

98. Расскажите о связи между числами и законами музыкальной гармонии.
99. Что такое свет?
100. Какие теории света вы знаете, и в чём состоит их суть?
101. В чём заключается принцип Гюйгенса?
102. Запишите и поясните уравнение плоской световой волны.
103. Расскажите о теории электромагнитного поля.
104. Каковы особенности распространения электромагнитных волн в среде?
105. Охарактеризуйте учение о свете.
106. В чём заключается явление полного внутреннего отражения?
107. Какие свойства света вы знаете?
108. Что означает принцип суперпозиции?
109. Каковы условия наблюдения интерференции и дифракции?
110. Какую волну называют плоско поляризованной?
111. Что такое спектр?
112. Охарактеризуйте спектр электромагнитных колебаний.
113. Что такое тепловое излучение?
114. Что такое модель абсолютно чёрного тела?
115. В чём состоит закон равновесного теплового излучения?
116. Сформулируйте основные законы теплового излучения.
117. В чём состояла гипотеза Планка?
118. Что такое квант?
119. В чём состоит явление фотоэффекта?
120. Сформулируйте законы фотоэффекта.
121. Объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
122. Что такое корпускулярно-волновой дуализм?
123. Расскажите историю представлений о строении атома.
124. Кем и когда был открыт электрон?
125. Какие модели строения атома вы знаете?
126. Опишите модель атома Резерфорда.
127. Сформулируйте постулаты Бора.
128. Объясните механизм возникновения линейчатых спектров.
129. Запишите формулу для частот спектральных линий.
130. Какие спектральные серии атома водорода вы знаете?
131. Сформулируйте правило квантования Бора.

132. В чём состояла идея де Бройля для стационарных состояний атома?
133. Охарактеризуйте фундаментальное уравнение квантовой механики.
134. Каков физический смысл волновой функции?
135. Что такое орбиталь?
136. Как определяются орбитали в атомах?
137. Сформулируйте принцип Паули.
138. В чём состоит гипотеза де Бройля?
139. Запишите и поясните соотношения неопределённостей Гейзенберга.
140. В чём заключается принцип дополнительности?
141. Какие частицы называют элементарными?
142. Каковы основные характеристики элементарных частиц?
143. Расскажите о классификации элементарных частиц.
144. Что такое кварк?
145. В чём заключается явление конфайнмента?
146. Каково строение атомного ядра?
147. Как обозначают ядра химических элементов?
148. Что такое изотопы?
149. Что такое дефект массы?
150. Как определяется энергия связи ядра?
151. Как можно получить энергию при ядерных превращениях?
152. Что такое радиоактивность?
153. Какие виды радиоактивных излучений существуют?
154. Что такое ядерная реакция?
155. Каковы особенности протекания ядерных реакций?
156. Что такое молекула?
157. Что означает валентность?
158. Что такое химическая связь?
159. Какие типы химических связей вы знаете?
160. Чем характеризуются химические связи?
161. Опишите особенности каждого типа химической связи.
162. Что означает агрегатное состояние вещества?
163. Какие виды агрегатных состояний вещества вы знаете?
164. Охарактеризуйте каждое агрегатное состояние.

165. Чем различаются кристаллические и аморфные тела?
166. Что такое полиморфизм?
167. На какие группы делят твёрдые тела по электрическим свойствам?
168. Перечислите свойства жидкостей.
169. Что такое ионизация?
170. Что такое фазовый переход?
171. Какие разновидности фазовых переходов существуют?
172. От чего зависит агрегатное состояние вещества?
173. Расскажите о развитии представлений о строении вещества.
174. Что такое химический элемент?
175. Кто автор, и в чём суть теории химического строения вещества?
176. Сформулируйте периодический закон химических элементов.
177. Какие химические элементы необходимы для жизни?
178. Что такое жизнь с точки зрения химии?
179. Что такое оптическая активность вещества?
180. Каковы основные «строительные блоки» органических соединений?
181. В чём состоит суть витализма?
182. Назовите основные подходы к определению понятия «жизнь».
183. Назовите основные признаки живых систем.
184. В чём состоит главное отличительное свойство живого от неживого?
185. Что объединяет живую и неживую материю?
186. Опишите структуру и основные функции белков.
187. Что такое аминокислоты, и какова их биологическая роль?
188. Что такое биосинтез?
189. Поясните основные этапы биосинтеза белков.
190. Как осуществляется хранение и передача наследственной информации?
191. Расскажите о строении и функциях нуклеиновых кислот.
192. Опишите структуру ДНК.
193. Что такое ген и генетический код?
194. Что такое клетка?
195. В чём состоит суть клеточной теории?
196. Какие клеточные формы жизни существуют на Земле?

197. Опишите строение клетки.
198. Каковы функции клеточных органелл?
199. Какие типы клеток существуют в многоклеточных организмах?
200. Что такое митоз?
201. Чем обусловлено различие клеток?
202. Какие существуют структурные уровни организации живой материи?
203. Какие единицы измерения расстояний используют в астрономии?
204. В чём заключается метод параллактического смещения?
205. Что такое годичный параллакс?
206. Как оценивают расстояния до далёких галактик?
207. Сформулируйте закон Хаббла.
208. Каковы границы видимости нашей Вселенной?
209. Что такое звезда?
210. Опишите процессы, протекающие в звёздах.
211. Каково процентное соотношение химических элементов в звёздах?
212. По каким параметрам классифицируют звёзды?
213. Расскажите о диаграмме Герцшпрунга-Рассела.
214. Что такое главная последовательность?
215. Какие этапы эволюции звёзд вы знаете?
216. Чем обуславливается эволюционный путь звёзды?
217. Что такое протозвезда?
218. От чего зависит время жизни звёзды?
219. Дайте определение понятию галактика.
220. Что такое галактический год?
221. Как классифицируют галактики?
222. Опишите строение галактики.
223. Что такое войды?
224. Расскажите о распределении галактик в пространстве.
225. Что изучает космология?
226. Что такое космологический горизонт?
227. Каков возраст Вселенной, и как получено это значение?
228. В чём состоит суть теории Большого взрыва?
229. Что такое Планковская эпоха?
230. Опишите свойства ранней Вселенной.

231. Какие этапы эволюции Вселенной вы знаете?
232. Охарактеризуйте каждый этап эволюции Вселенной.
233. Что такое реликтовое излучение?
234. Какие существуют космологические модели Вселенной?
235. В чём заключается суть теории Фридмана?
236. Охарактеризуйте Солнечную систему.
237. На какие категории делят объекты Солнечной системы?
238. Каково строение Солнечной системы?
239. Что такое планета?
240. Охарактеризуйте планеты внутренней части Солнечной системы.
241. Охарактеризуйте планеты внешней части Солнечной системы.
242. Опишите эволюцию планеты Земля.
243. Охарактеризуйте планету Земля.
244. Что такое сидерический год?
245. Каково внутренне строение Земли?
246. Каково природное распределение химических элементов Земли?
247. Назовите основные концепции возникновения жизни.
248. Каков возраст Земли по современным данным?
249. Опишите условия зарождения жизни на Земле.
250. В чём заключается гипотеза Опарина-Холдейна?
251. Назовите этапы зарождения жизни.
252. Каковы были цель и результаты эксперимента Миллера?
253. В чём суть идеи возникновения жизни на основе РНК?
254. Что такое планетные условия?
255. Какие планетные условия вы знаете?
256. Что означает понятие эволюция?
257. Охарактеризуйте биологическую эволюцию.
258. На чём была основана первая классификация живой природы?
259. Сформулируйте биогенетический закон.
260. В чём состоит суть закона необратимости эволюции?
261. В чём заключается учение Ламарка?
262. Каковы основные принципы эволюционной теории?
263. Что лежит в основе современной теории органической эволюции?
264. Как подразделяют биологические эволюционные процессы?
265. Какие пути достижения биологического прогресса вы знаете?

266. Приведите основные доказательства эволюции живой природы.
267. Что такое глобальный эволюционизм?
268. Назовите основные положения глобального эволюционизма.
269. Что подразумевает понятие самоорганизации?
270. Что такое синергетика?
271. С именами каких учёных связано возникновение синергетики?
272. Каковы особенности самоорганизации живых систем?
273. Что означает нелинейность системы?
274. Откуда следует возможность различных путей эволюции системы?
275. Что такое бифуркация?
276. Охарактеризуйте диаграмму бифуркации.
277. В чём состоит теория устойчивости состояний систем?
278. Что является критерием эволюции?
279. Что такое функция диссипации?
280. Какие системы называют диссипативными?
281. Что такое фазовое пространство?
282. Что такое аттрактор?
283. В чём заключается отличие синергетики от кибернетики?
284. Что представляет собой вещество с точки зрения синергетики?
285. В чём состоит механизм развития с точки зрения синергетики?

Литература

1. Дубнищева, Т. Я. Концепции современного естествознания : учеб. пособие для студ. вузов / Т. Я. Дубнищева. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 608 с.
2. Гусейханов, М. К. Концепции современного естествознания : учебник / М. К. Гусейханов, О. Р. Раджабов. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2007. – 540 с.
3. Основы современного естествознания : уч. пособие / А. А. Козел [и др.]. – Минск : Академия МВД Респ. Беларусь, 2009. – 163 с.
4. Карпенков, С. Х. Концепции современного естествознания : учеб. для вузов / С. Х. Карпенков. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 2003. – 488 с.
5. Акимов, О. Е. Естествознание : курс лекций / О. Е. Акимов. – Москва : ЮНИТА-ДАНА, 2001. – 639 с.
6. Воронов, В. К. Основы современного естествознания / В. К. Воронов, М. В. Гречнева, Р. З. Сагдеев. – Москва : ВШ, 1999. – 247 с.
7. Концепции современного естествознания : учебник для вузов / В. Н. Лавриненко [и др.]. – 2-е изд., перер. и доп. – Москва : ЮНИТИ, 1999. – 303 с.
8. Раевская, Н. В. Концепции современного естествознания : конспект лекций / Н. В. Раевская. – С.-Пб. : Альфа, 2001. – 160 с.
9. Курдюмов, С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / С. П. Курдюмов, Е. Н. Кузнецова. – Москва : Наука, 1994. – 238 с.
10. Фейнман, Р. Характер физических законов / Р. Фейнман. – 2-е изд., испр. – Москва : Наука, 1987. – 164 с.

Учебное издание

Милюкина Светлана Николаевна

Основы современного естествознания

Курс лекций

Редактор А.В. Мясоедов
Технический редактор С.Н. Милюкина
Корректор Т.А. Осипова
Компьютерная верстка С.Н. Милюкина

Подписано к печати _____. Формат _____. Бумага офсетная №1.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. листов _____. Уч. - изд. листов _____.
Тираж ____ экз. Зак. № _____

Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»
210035, г. Витебск, Московский проспект, 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский
государственный технологический университет».
Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.