

Министерство образования Российской Федерации
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Инженерно-физический факультет

Г.Г. Охотникова, С.А. Лескова

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Часть II

Физические концепции

Учебное пособие

Благовещенск

2009

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
университета

Охотникова Г.Г., Лескова С.А.

Концепции современного естествознания. Часть II. Физические концепции: Учебное пособие. Издание 2-е, исправленное и дополненное. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2009.

Пособие включает ряд тем курса «Концепции современного естествознания», посвященных развитию физических представлений об окружающем мире. Рассматривается история развития физики, классическая концепция Ньютона, представления об электромагнитном поле, волновых процесса, строении атома и др.

Пособие предназначено для студентов экономических, юридических и гуманитарных специальностей, преимущественно рассчитано на самостоятельное изучение ряда вопросов по курсу, а также может быть использовано в качестве дополнительного материала при подготовке к семинарским занятиям и работе над рефератами.

Рецензенты:

Головко Т.А., канд. техн. наук, доцент кафедры
общетехнических дисциплин БГПУ
Копылова И.Б., доцент АмГУ, канд. физ.-мат.
наук.

©Амурский государственный университет, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Содержание Государственных образовательных Стандартов предполагает детальное и глубокое изучения отдельных разделов естествознания. Фундаментальной основой естествознания, общепризнанно, считается физика. Этапы ее развития – это этапы развития естествознания. Развитие всех отраслей естествознания тесно связано с развитием физики.

Данное пособие предназначено для самостоятельного изучения материала студентами всех форм обучения, и может быть использовано для подготовки к экзамену, зачету, семинарским занятиям, а также для выполнения реферативных и контрольных работ.

1. НАУЧНЫЕ РЕВОЛЮЦИИ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ

История развития естествознания, тесно связанная с историей развития физики, охватывает огромный период времени: от VI в. до нашей эры – до нашего времени.

Именно к VI в. до н.э. в Древней Греции создаются предпосылки для возникновения науки. Наука определяется не как совокупность различного рода сведений об известных явлениях и процессах, но как целостная система знаний, полученных в результате направленной деятельности по получению новых знаний группой или группами людей. Примерами такого рода коллективной деятельности являются Милетская школа, платоновская Академия, аристотелевский Ликей.

Развитие естествознания – это не монотонный процесс накопления знаний об окружающей действительности, а чередование поступательного накопления такого рода знаний с переломными этапами, радикально меняющими всю прежнюю систему знаний в соответствии с философским законом перехода количества в качество.

Такие переломные моменты, формирующие принципиально новый взгляд на накопленные знания об окружающем мире, принято называть научными революциями. В отличие от социальных потрясений в общественной жизни, в результате которых происходит замена одного политического строя или способа производства другим, научные революции – это длительные исторические периоды. При этом каждая новая научная революция не отменяет полностью предыдущих достижений, а только ограничивает их применение в соответствии с новыми установленными законами или теориями. Сущность такого ограничения наиболее полно выражена в *принципе соответствия Н. Бора*: «Всякая новая более общая теория, являющаяся развитием классической, не отвергает ее полностью, а включает в себя классическую теорию, указывая границы ее применения » [7].

Что же подразумевается под революцией в науке? В сущности, – это изменение всех ее составляющих – фактов, закономерностей, теорий, то есть, в более общем смысле, – научной картины мира.

Конечно, твердо установленные факты изменить невозможно, но в науке главенствующее значение имеют не сами факты, а их объяснение. И это объяснение порой подвергается «самым радикальным изменениям» [4]. Существует несколько способов выделения глобальных научных революций, имевших место в истории науки вообще и естествознания в частности. Наиболее часто выделяются три научные революции. Как правило, их определяют по именам ученых, которые внесли наиболее существенный вклад в развитие науки в тот или иной период, и эти три научные революции*:

- Аристотелевская;
- Ньютоновская;
- Эйнштейновская.

С этими научными революциями практически полностью совпадают и три этапа развития физики:

- древний и средневековый. Этот этап часто называют донаучным, хотя такое название не соответствует действительности; лучше рассматривать его как доклассический;
- классической физики;
- современной физики.

Тем не менее, не следует забывать, что физика, как основа естествознания, сама «выросла» из своей структурной единицы – механики. Поэтому первые два этапа развития физики являются, по большому счету, этапами развития именно механики.

* Более подробно научные революции рассматриваются в томе I «История развития и общие вопросы естествознания» данного пособия.

Первая научная революция

Начало первой научной революции относится к VI – IV в.в. до н.э. В этот период происходит становление науки, как обособленной от других форм познания мира области. Наибольший вклад в развитие науки этого времени внес древнегреческий философ Аристотель. Он является автором формальной логики (учение о доказательстве), геоцентрического учения о мировых сферах (прил. 1). Аристотель отделил науки о природе от метафизики (философии), проводя, тем самым, первую дифференциацию наук, утвердил свой канон организации научного исследования.

Именно в этот период времени были сформированы две обширные научные программы. Первая – континуальная программа Аристотеля, отрицающая пустоту: «Природа не терпит пустоты». Весь мир, согласно этой концепции, заполнен бесконечно делимой материей, в которой совершаются «естественные» (вверх и вниз) и «насильственные» (все остальные) движения.

Второй программой античности стала атомистическая концепция Левкиппа – Демокрита – Эпикура. В рамках этой концепции предполагалось, что в «мировой пустоте» движутся вечные мельчайшие неделимые частицы – атомы, различные комбинации которых и составляют тела.

Большой вклад в развитие естествознания внесли труды пифагорейской школы, основателем которой является греческий философ и математик Пифагор (VI в. до н.э.). Именно пифагорейцы заложили основы математического естествознания, считая, что «Все есть число ...» и выдвинули предположение о гармоничности в природе, связывая числовую характеристику мира с гармонией всего существующего [16]. Эта гармония, представляющая закон пропорциональной связи целого и составляющих его частей, в последствии получила название «золотого сечения» («золотой пропорции», «божественной пропорции»). Сегодня золотое сечение рассматривается как неотъемлемый признак структурного единства объектов природы; оно неотделимо от ценностей искусства и присуще различным объектам окружающего нас мира, как живого, так и неживого.

Вторая научная революция

Вторая – Ньютоновская – научная революция приходится на XVI – XVIII в.в. Ее началом считается переход от геоцентрической к гелиоцентрической модели мира, предложенной польским астрономом Николаем Коперником. В этот период зарождается и полностью формируется классическая механика, в основе которой лежат труды Галилео Галилея и Исаака Ньютона. Вместо аристотелевского понимания движения, согласно которому тело движется до тех пор, пока к нему приложено внешнее воздействие, Галилей формулирует совершенно иной принцип, позднее получивший название *принципа инерции*. Согласно этому принципу, тело либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно до тех пор, пока к нему не прилагается внешнее воздействие. Работы Галилея, Кеплера, Декарта в области астрономии, физики, математики внесли огромный вклад в развитие естествознания того времени. Но этот ряд невозможно завершить, не назвав выдающегося ученого всех времен – Исаака Ньютона.

Научное наследие Ньютона чрезвычайно разнообразно. Это и создание дифференциального и интегрального исчисления (параллельно с Лейбницем), и работы по астрономии, и большой вклад в развитие оптики (объяснение дисперсии света). Но главным научным достижением Ньютона является создание классической механики. В основу механики, как науки, легли три закона движения, сформулированные Ньютоном. Эти законы были дополнены законом Всемирного тяготения.

Главный труд Ньютона – «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) – заложил основы современной теоретической физики. Классическая концепция Ньютона предполагала неизменность окружающего мира, существование однозначных причинно-следственных связей (невозможность случайных событий) и повторяемость процессов на всех уровнях развития природы. Все теории, созданные в этот период времени, относятся к динамическим теориям, то есть таким, которые представляют собой совокупность физических

законов, отражающих объективные закономерности в форме однозначных связей физических величин.

Третья научная революция

Третья научная революция произошла на рубеже XIX – XX в.в. Каскад сенсационных открытий в физике (открытие электрона, явления радиоактивности, сложного строения атома, дискретного характера электромагнитного излучения) нанес сокрушительный удар по механистической картине мира. Наиболее значимыми теориями стали специальная и общая теории относительности и квантовая механика. Дж. Томсон, А. Беккерель, супруги Кюри, М. Планк, Э. Резерфорд, Н. Бор, А. Эйнштейн, Л. Де Бройль – вот далеко не полный перечень ученых, открытия и теория которых «потрясли основы» классической механики. Наступил новый этап неклассического естествознания XX века, в основе которого лежат квантово-релятивистские представления о физической реальности.

Неклассическая концепция, сформировавшаяся в физике в конце XIX – начале XX в.в., базируется на вероятностном подходе, то есть, утверждает случайность. Все теории, разработанные в этот период, являются статистическими, описывающими более широкий круг явлений. В статистических теориях и законах любое состояние системы представляет собой ее вероятностную характеристику. Главной задачей статистических теорий является нахождение средних значений физических величин.

Альтернативные подходы к выделению научных революций

Но, помимо указанного ранее, существует еще несколько вариантов разделения периодов развития науки. Один из таких вариантов включает в себя четыре научные революции [2]. Первая связана с появлением гелиоцентрической системы мироустройства Н. Коперника, вторая – создание механистической картины мира, третья – диалектизация естествознания (прил.2) и исследо-

вания в области электромагнитного поля, четвертая – теория относительности и квантовая механика.

В обоих случаях последний этап (последняя научная революция) включает в себя одни и те же события, факты, теории.

Бурное развитие физики в XX в. привело к тому, что многие исследователи истории естествознания выделяют в настоящее время еще одну, новую и последнюю на сегодняшний день, научную революцию – развитие физики микромира. Эта революция следует за Эйнштейновской, и ее начало относят к 30-40 г.г. XX в. Данная научная революция большинством исследователей истории естествознания признается незавершенной.

Современное естествознание базируется на эволюционном подходе, сложившемся в ходе развития не только физики, но и других естественных наук (химии, биологии и т.п.). Концепция универсального эволюционизма предполагает, что вся Вселенная переживает глобальный эволюционный процесс, причем эволюция всех ее подсистем происходит на основе общих принципов.

Таким образом, научные революции определяют стадии развития науки, каждой из которых соответствует своя общенаучная картина мира. Элементарный анализ промежутков времени, разделяющих эти периоды, показывает бесспорную тенденцию развития науки к ускорению. И вполне возможно, что именно сейчас человечество стоит на пороге новой научной революции.

Вопросы для самоконтроля:

1. Используя ранее полученные знания, попробуйте установить, почему наука как отрасль культуры, сформировалась именно в Древней Греции, а не в других государствах (Египте, Шумере, Вавилоне, Индии, Китае).
2. Что определяет принцип соответствия Н. Бора?
3. Назовите основные черты, присущие научным революциям.

4. Какое разделение истории естествознания на научные революции кажется вам более правильным? Почему?
5. Объясните, почему в альтернативном подходе Аристотелевская революция таковой не признается.
6. Перечислите и кратко охарактеризуйте этапы развития физики.
7. Назовите основные события, характеризующие первую научную революцию.
8. В чем заключается континуальная концепция? Чем она отличается от атомистической?
9. Каков вклад Пифагора и его последователей в развитие естествознания?
10. Сравните динамические и статистические теории и определите их иерархическую взаимосвязь.
11. В чем заключается концепция универсального эволюционизма? Чем обусловлено ее появление?

2. МАТЕРИЯ. ПРОСТРАНСТВО. ВРЕМЯ

Материя

Важнейшая задача естествознания – создание естественнонаучной картины мира.

Картину мира создают также и писатели, и поэты, но разница в том, что «...наука апеллирует к рассудку и разуму, искусство же – в конечном итоге – обращается к сердцу, к чувствам» (Л. Толстой).

Естественнонаучная картина природы образует в целом упорядоченную систему, которая по мере развития науки уточняется и дополняется.

Научный язык похож на повседневный язык человеческого общения, но отличается тем, что научные термины являются, во-первых, более общими и абстрактными, во-вторых, – более точными и сконцентрированными.

Наука выявляет общее в предметах и явлениях, которые она изучает. Выделение общего ведет к абстракции, т.е. отвлечению от единичного, конкретного, случайного.

Наиболее общие и абстрактные понятия в естествознании выражают глубокие, но в то же время общие свойства природы.

Таковыми понятиями и оперирует наука. Так как физика – фундаментальная основа естествознания, то и для нее присущи такие общие понятия. К наиболее общим концепциям физики относятся: материя, движение, пространство и время.

Эти понятия широко используются не только в физике, как отрасли естествознания, но и во многих сферах (искусство, экономика, философия).

Окружающий нас мир, все, что существует вокруг нас и обнаруживается посредством ощущений, представляет собой материю.

Материя (от лат. *materia* – вещество, материал) – то, из чего все происходит. Под материей подразумевается « ... философская категория для обозначения объективной реальности, ... которая отображается, фотографируется, копи-

руется нашими ощущениями, существуя независимо от них» /Ленин В.И. ПСС, т.18, стр.131/.

В классическом представлении различают два вида материи: вещество и поле [5]. В современном представлении к ним следует добавить физический вакуум.

Вещество – это физический вид материи, состоящий из частиц, имеющих собственную массу (массу покоя). Это, фактически, все материальные системы: от элементарных частиц до галактик.

Поле – это материальное образование, которое определяет характер взаимодействия тел. Существует электромагнитное поле (свет – одна из его разновидностей), гравитационное поле (поле тяготения), внутриядерное поле, связывающее между собой частицы атомного ядра.

Итак, вещество отличается от поля тем, что имеет массу покоя, но в то же время у них много общего. В современном представлении все частицы вещества, независимо от их природы, обладают волновыми свойствами, а после открытия Лебедевым (1893 г.) давления света на твердые тела свет (электромагнитное поле) нельзя считать «чистой энергией», т.е. имеет место наличие в поле мельчайших частиц, обладающих массой. Вещество и поле взаимосвязаны и переходят друг в друга при определенных условиях. Превращение вещества в поле наблюдается, например, в процессе горения дров, которое сопровождается излучением света. Обратный процесс происходит при поглощении света растениями (процесс фотосинтеза).

В сравнительно недавнее время физики открыли частицы, равные по массе протонам, но с отрицательным зарядом. Их называли антипротонами. Далее были открыты и другие античастицы, в том числе – антинейтроны. На этой основе выдвигается предположение о существовании в физическом мире антивещества наряду с веществом.

* Подробно физический вакуум рассматривается в теме «Элементарные частицы»

Все современные представления объединяют вещество и поле в единый тип реальности, которая проявляется в одних случаях как вещество, а в других – как поле.

Однако такое объединение касается, как правило, микромира, многие свойства которого носят квантово-механический характер. Это не означает, что для макротел эти свойства отсутствуют. Просто на данном этапе развития науки они не обнаруживаются.

Уровни организации материи

Человек начал познавать природу с окружающих его объектов. Потом он обратил внимание на далекие и недостижимые звезды. Составив представление о том, что его окружает и о том, что он видит вдалеке, человек задумался о строении объектов своих наблюдений. Вполне вероятно, что так и возникла очень важная для понимания явлений природы концепция атомизма.

Эта концепция [2], согласно которой материя имеет дискретное строение, пронизывает естествознание на протяжении всей его истории. Она насчитывает 25 веков непрерывных поисков: от античной натурфилософии Левкиппа и Демокрита (V в. до н.э.) – до нашего времени.

Но почти до конца XIX в. мало кто верил в существование атомов. Эксперименты и теории, подтверждающие этот факт, стали появляться только после открытия Томсоном электрона в 1897 г. Трудно, медленно, шаг за шагом физика открывала новый мир физических объектов – микромир. И хотя этот путь для истории – мгновение, для человечества – долгий, на протяжении нескольких поколений, упорный поиск, крушение и возрождение надежд.

В организации физической материи выделяют три уровня:

- микроуровень (микромир);
- макроуровень (макромир);
- мегауровень (мегамир).

Микромир – последний из познанных человеком – состоит из микроскопических частиц, для которых характерны преимущественно квантовые свой-

ства. В организации микромира на сегодняшний день выделяют 4 уровня: молекулярный, атомный, нуклонный и кварковый.

Поведение и свойства тел, состоящих из микрочастиц и составляющих **макромир**, описываются законами классической физики. К макромиру относятся окружающие нас тела. Это единственный иерархический уровень, объекты которого можно исследовать непосредственным наблюдением.

К этим совершенно разным объектам можно добавить **мегамир** – мир галактик, звезд, мир Вселенной. В иерархии мегамира выделяют: звезды и звездные системы (галактики); планеты и планетные системы; малые космические объекты (кометы, астероиды) и само космическое пространство, в котором происходит движение космических объектов.

Различия между этими тремя мирами можно представить, воспользовавшись таблицей 2.1 [3].

Таблица 2.1

Размеры материального мира

Объекты	Размеры, м
Радиус видимой Вселенной	10^{26}
Диаметр нашей Галактики	10^{21}
Расстояние от Земли до Солнца	10^{11}
Диаметр Солнца	10^9
Размер человека	10^0
Длина волн видимого света	$10^{-6} - 10^{-7}$
Размер вирусов	$10^{-6} - 10^{-8}$
Диаметр атома водорода	10^{-10}
Диаметр атомного ядра	10^{-15}
Минимальное расстояние, доступное современным измерениям	10^{-18}

Из таблицы видно, что расстояние между границами миров составляет 44 порядка, и это расстояния по мере развития науки будет увеличиваться, как будет увеличиваться и количество подсистем, образующих физическую материю. Но как бы ни было велико это расстояние, физические понятия и законы приме-

нимы в одинаковой мере ко всем объектам как на Земле, так и вне ее. Это свойство физических законов называется универсальностью. Универсальность физических законов подтверждает единство природы и Вселенной в целом [7].

Иерархия структурных уровней характерна и для других видов материи. Помимо физической материи (неорганической природы) структурные уровни организации выделяют и в биологической материи (живая природа), и в обществе. С этими уровнями мы познакомимся позднее.

Фундаментальные взаимодействия

Повседневный опыт показывает, что все тела взаимодействуют друг с другом, следствием чего являются всевозможные изменения и движения. Все свойства производны от взаимодействий.

К настоящему времени выделяются 4 основных вида взаимодействий:

- гравитационное;
- электромагнитное;
- слабое;
- сильное.

Гравитационное взаимодействие характерно для всех материальных объектов, обладающих массой, независимо от их природы. Оно заключается во взаимном притягивании тел и определяется законом всемирного тяготения (понятие «тяготение» имеет смысл только в связи с массой). Гравитационным взаимодействием определяется падение тел в поле сил тяготения Земли. Закон всемирного тяготения описывает движение планет Солнечной системы. Предполагается, что это взаимодействие обусловлено гравитонами – элементарными частицами, существование которых пока не подтверждается экспериментально.

Электромагнитное взаимодействие осуществляется посредством электрических и магнитных полей. Электрическое поле возникает при наличии электрических зарядов, магнитное – при их движении.

Существование в природе и отрицательных, и положительных электрических зарядов определяет характер электромагнитного взаимодействия.

Электростатическое взаимодействие между заряженными телами, в зависимости от знака, приведет либо к притяжению, либо к отталкиванию. При движении зарядов возникает электрический ток.

Различные агрегатные состояния вещества, явление трения, упругие свойства вещества определяются преимущественно силами межмолекулярного взаимодействия, которое по природе является электромагнитным.

Электромагнитное взаимодействие описывается фундаментальными законами электростатики и электродинамики: закон Кулона, закон Ампера и др. Наиболее общее описание этого типа взаимодействия дает электромагнитная теория Максвелла.

Слабое взаимодействие описывает некоторые виды ядерных процессов и характеризует взаимодействие и взаимопревращение элементарных частиц. Изменение заряда частиц – результат слабого взаимодействия. Без слабого взаимодействия невозможны ядерные реакции в Солнце и других звездах, вспышки сверхновых.

Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре и определяет ядерные силы. Предполагается, что ядерные силы возникают при обмене нуклонов виртуальными частицами – мезонами. Чем сильнее будет взаимодействие между нуклонами – тем устойчивее будет ядро.

Обычно для количественного анализа взаимодействий используют две характеристики: безразмерную константу взаимодействия и радиус движения, представленные в таблице 2.2 [7].

Характеристика фундаментальных взаимодействий

Вид взаимодействия	Константа взаимодействия	Радиус действия
Гравитационное	$6,0 \cdot 10^{-39}$	Бесконечность
Электромагнитное	$7,3 \cdot 10^{-3}$	Бесконечность
Сильное	1,0	$(0,1 - 1) \cdot 10^{-18}$ м
Слабое	10^{-14}	$\ll 0,1 \cdot 10^{-15}$ м

Гравитационное взаимодействие характеризуется самой малой константой, поэтому оно имеет (как и электромагнитное) неограниченный радиус действия. В процессах микромира гравитационное воздействие существенной роли не играет, но в процессах макромира является определяющим. Сильное взаимодействие распространяется только в пределах ядра. Взаимодействие между атомами и молекулами имеет, преимущественно, электромагнитную природу. Им объясняются различные агрегатные состояния вещества. Таким образом, если все взаимодействия выстроить в порядке убывания величины относительной интенсивности, мы получим следующую последовательность: сильное взаимодействие → электромагнитное взаимодействие → слабое взаимодействие → гравитационное взаимодействие.

Фундаментальные взаимодействия лежат в основе всех других известных естественных форм движения материи.

Принцип тождественности

Взаимодействия между компонентами макро- и микросистем чрезвычайно многообразны. Для каждой системы характерна индивидуальность, но при этом объекты микромира характеризуются одинаковыми физическими свойствами (масса, электрический заряд, спин, квантовые числа). Понятие о тождественных частицах носит квантово-механический характер. Такие частицы подчиняются принципу тождественности.

Принцип тождественности – это фундаментальный принцип квантовой механики, который предполагает, что состояния системы частиц, получаю-

щиеся друг из друга при перестановке местами тождественных частиц, в эксперименте неотличимы. Такие состояния рассматриваются как единое физическое состояние. Более просто принцип тождественности можно рассматривать следующим образом: два электрона в атоме при их перестановке не изменяют свойств атома.

Пространство и время

Все, что происходит с материей, происходит в пространстве и во времени. Развитие представлений о пространстве и времени неразрывно связано с развитием всей человеческой культуры.

Философия определяет пространство и время как *всеобщие формы существования материи*. Как известно, материя существует в движении. Представления о движении также развиваются вместе с наукой, и формулируются в соответствии с существующей в тот или иной период времени естественно-научной картиной мира. В современной физике движение рассматривается, как изменение состояния физической системы, для описания которого вводится набор измеряемых параметров. В качестве таких параметров выступают, в первую очередь, пространственно – временные координаты.

Первые представления о пространстве складывались из очевидного существования в природе твердых физических тел, занимающих определенный объем. В Древней Греции, как было указано ранее, существовали две взаимно противоположные концепции, характеризующие пространство. В континуальной аристотелевской концепции пространство, время и движение были связаны воедино. Атомисты же, наоборот, представляли пространство пустым. Пустое пространство по их мнению было абсолютно симметрично, однородно и изотропно. Первой законченной теорией пространства стала геометрия Евклида, рассматривающая пространство как однородное и бесконечное. Идеи о бесконечности пространства находят свое отражение в трудах Н. Коперника, Дж. Бруно, И. Кеплера и других ученых.

Ньютон ввел два вида пространства. *Абсолютное пространство*, которое всегда остается одинаковым и неподвижным, является совершенно пустым и может существовать независимо от наличия в нем физических тел. Таким образом, абсолютное пространство – это идеальное пространство. Вторым видом пространства по Ньютону – это *относительное пространство*, которое познается в процессе измерения расстояний между заполняющими его объектами. Пространство в ньютоновской механике обладает рядом свойств. Оно трехмерно, непрерывно, бесконечно, однородно и изотропно. Однородность пространства подразумевает одинаковость его свойств в каждой точке, изотропность – в каждом направлении.

Развитие физики, открытие новых явлений, формирование новых теорий изменило представления о пространстве и доказало несостоятельность идеи абсолютного пространства. Важную роль в изменении представлений о пространстве сыграло введение в XIX в. нового понятия – «поля».

В современном представлении *физическое пространство* непрерывно, однородно, изотропно и – относительно.

В строгом определении *время* выражает порядок смены физических состояний и является объективной характеристикой любого физического процесса или явления [3]. Время универсально.

Подобно пространству в классической механике Ньютон различал и время как абсолютное (длительность) и относительное (мера продолжительности). В качестве одного из важных свойств времени выделяется его однонаправленность: от прошлого к будущему.

Специальная теория относительности (СТО) доказала, что абсолютное время не имеет физического смысла, оно – лишь идеальное математическое представление. Согласно СТО, время всегда относительно, так как в различных физических условиях оно течет с различной скоростью.

Время обладает рядом свойств. Оно непрерывно, однородно (одинаково во всех точках пространства), одномерно и однонаправлено (нельзя повернуть время вспять, т.е. вернуться назад).

СТО объединила пространство и время в единый *пространственно – временной континуум*: пространство – время. Согласно этой теории, для реального мира пространство и время имеют не абсолютный, а относительный характер [7].

Симметрия

Важным свойством природы в целом и пространства, в частности, является симметрия. Это свойство в природе, искусстве и науке давно стало предметом изучения и даже считается фундаментальным свойством живой природы. Последнее утверждение, правда, не является общепризнанным. Интерес к понятию «симметрия» восходит еще к пифагорейцам и представления о ней находят свое развитие в трудах Демокрита, Платона, Аристотеля и многих других ученых как Древней Греции, так и более поздних периодов развития науки.

В зависимости от области применения термин «симметрия» имеет множество определений, наиболее исчерпывающим и обобщенным представляется следующее. *Симметрия* – однородность, пропорциональность, гармония, инвариантность структуры материального объекта относительно его преобразований [17]. В настоящее время в симметрии выделяется 4 категории: симметрия, асимметрия, дисимметрия и антисимметрия. Как категорию симметрии асимметрию использовали еще атомисты Древней Греции, видя в ней причину образования вещей и указывая на важность этой категории в образовании мира. Под *асимметрией* понимают отсутствие симметрии. Если какому-либо объекту не присущи некоторые элементы симметрии, говорят о *дисимметрии* (расстроенная симметрия). *Антисимметрия* представляет из себя симметрию противоположностей (частица – античастица).

К основным видам симметрии (как и асимметрии) относят геометрическую или статическую симметрию; динамическую, выражающую свойства физических взаимодействий и калибровочную (обеспечивает сохранение полного заряда не только во всем пространстве, но и в каждой точке). Наиболее наглядным видом симметрии является пространственная (геометрическая) симметрия,

которая имеет ряд разновидностей: вращательная, зеркальная, трансляционная и др.

В начале XX в. немецкий математик Э. Нетер доказала теорему, связывающую свойства пространства и времени с законами сохранения (см. главу 3).

Вопросы для самоконтроля:

1. Сформулируйте на основании изложенного материала собственное определение материи и ее составляющих – вещества и поля. Что является главным различием этих понятий?
2. Какие уровни организации материи выделяют? Приведите примеры объектов, соответствующих каждому уровню.
3. Какие фундаментальные взаимодействия существуют в природе? Какими частицами они обеспечиваются? Какими свойствами обладают?
4. Что произойдет, если какое-либо фундаментальное взаимодействие исчезнет? Приведите примеры.
5. Что объясняет принцип тождественности?
6. Почему пространство и время являются всеобщими формами существования материи?
7. С чем связано развитие и изменение представлений о пространстве и времени? Проследите эти изменения на различных этапах развития физики.
8. Попробуйте, пользуясь представлениями Ньютона о пространстве и времени, привести примеры, характеризующие абсолютные и относительные составляющие этих категорий.
9. Какие категории симметрии вы знаете? Приведите примеры из окружающей жизни, характеризующие эти категории.
10. Какие виды симметрии различают? Приведите примеры.

3. МЕХАНИКА. КЛАССИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ НЬЮТОНА. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Классическая механика

Механика – это наука о движении. Главную задачу механики можно сформулировать как вывод уравнения (математического закона), описывающего движения тела и выяснение причин этого движения.

Классическая механика занимается изучением движения макроскопических тел со скоростями, значительно меньшими скорости света в вакууме.

В механике выделяют два вида движения тел:

- поступательное – движение по прямой линии;
- вращательное – движение по окружности относительно оси или вокруг точки;

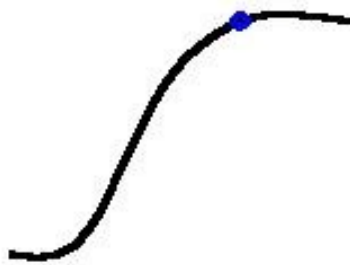
В качестве исходного объекта исследования механика использует две математические модели – материальную точку и абсолютно твердое тело.

Материальная точка – тело, размерами которого можно пренебречь при описании его движения (например, – математический маятник).

Абсолютно твердое тело – система материальных точек, в которой расстояние между частицами не изменяется.

Выводами законов, описывающих движение тела, занимается кинематика. **Кинематика** рассматривает методы описания механических движений с чисто геометрической точки зрения, без связи с причинами, которые вызывают эти движения или влияют на них. К основным понятиям кинематики относятся кинематические уравнения, траектория, скорость, ускорение. Широко используется в кинематике понятие координат, взятое из геометрии, а также понятие времени, используемое при описании всех физических процессов.

Итак, в пространстве движется тело (рис. 3.1). Что необходимо для описания его движения?



Во-первых, для изучения механических движений необходимо выбрать ту или иную систему отсчета. Но если выбрать систему отсчета произвольно, то может оказаться, что законы даже совсем простых явлений в ней будут выглядеть весьма сложно. Таким образом, возникает задача отыскания такой системы отсчета, в которой законы механики выглядели бы наиболее просто. Оказывается, что всегда можно найти такую систему отсчета, где пространство является однородным и изотропным, а время однородным.

Рис. 3.1

Траектория движения
тела

Такая система называется *инерциальной*, и в ней свободное тело, покоящееся или движущееся прямолинейно и равномерно, в некоторый момент времени, может покоиться неограниченно долго. Итак, выбрав *систему отсчета* (точка начала отсчета O + система координат + время), можно определить положение материальной точки в пространстве.

Если материальная точка (рис. 3.2) перемещается в пространстве из положения A в положение B , то радиус-вектор $\mathbf{r}_0$ задает положение точки в начальный момент времени t_0 ; радиус-вектор $\mathbf{r}$ задает положение точки в момент времени t .

Вектор $\mathbf{r}$ в трехмерном пространстве связан с координатами точки следующим образом:

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k},$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – тройка единичных взаимно перпендикулярных векторов, задающих направления координатных осей, иными словами – базис декартового пространства, привязанный к O – началу системы координат. Сами же коорди-

наты x, y, z – ни что иное, как численные значения проекций вектора $\mathbf{r}$ на соответствующие координатные оси.

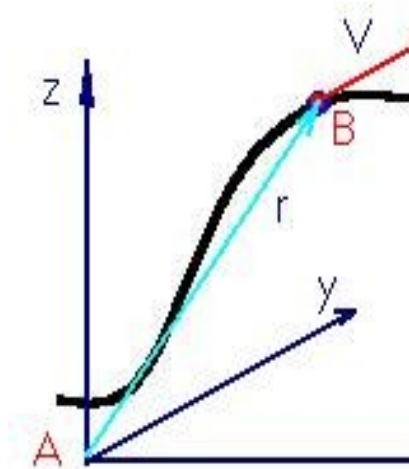


Рис. 3.2.

Траектория движения тела
в системе координат

Линия, вдоль которой движется точка, называется **траекторией**, а пройденный точкой **путь** является функцией времени $S(t)$.

Для описания движения этой точки необходимо знать зависимость проекций радиус-вектора от времени:

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k},$$

Производная $\mathbf{r}$ по времени t называется скоростью, а вторая производная – ускорением:

$$\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$$

$$\mathbf{a} = d^2\mathbf{r}/dt^2$$

В скалярном (разложенном по проекциям) виде данные уравнения принимают вид:

$$v_x = dx/dt$$

$$v_y = dy/dt$$

$$v_z = dz/dt$$

$$a_x = dv_x/dt$$

$$a_y = dv_y/dt$$

$$a_z = dv_z/dt$$

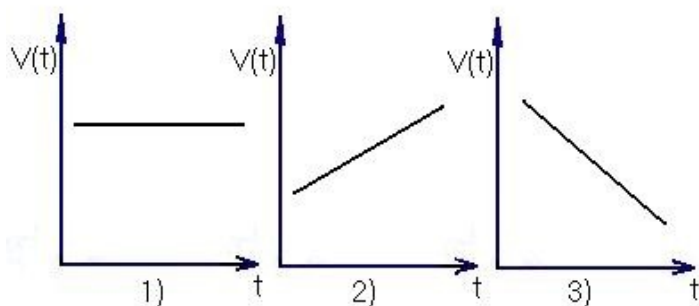
Эти соотношения, связывающие ускорение с координатами и скоростями, называется уравнениями движения.

Возникает необходимость определить такие понятия, как скорость и ускорение.

Скорость – это характеристика изменения координат тела в течение времени, **ускорение** – характеристика изменения скорости во времени [11].

Если скорость – величина постоянная, такое движение называется **равномерным**. Если ускорение – величина постоянная (скорость движения изменяется на одну и ту же величину), такое движение, в зависимости от знака ускорения, называется **равноускоренным** или **равнозамедленным**.

На рис. 3.3 приведены графики зависимости скорости движения тела от времени для равномерного, равноускоренного и равнозамедленного движения.



- 1) равномерное движение;
- 2) равноускоренное движение;

3) равнозамедленное движение

Для простоты далее рассмотрим одномерное движение, которое характеризуется изменением одной, произвольной координаты, поэтому индексы x, y, z можно опустить.

В случае равномерного прямолинейного движения $v = \text{const}$ и уравнение движения будет иметь вид:

$$S(t) = S_0 + vt$$

В случае равнопеременного движения, если $a = \text{const}$, движение будет представлено уравнениями:

$$S = S_0(t) + v_0t + at^2/2$$

$$v(t) = v_0t + at$$

Итак, мы рассмотрели два вида движения. Изучением причин, приводящих к тому или иному виду движения, занимается **динамика**. Повседневный опыт показывает, что именно действие тел друг друга приводит ко всевозможным изменениям и движениям. В макром мире взаимодействие тел происходит под действием сил тяготения или электромагнитных сил.

В классической механике понятие силы является фундаментальным.

Сила – физическая мера взаимодействия тел и причина их механического движения, т.е. перемещения относительно друг друга [3].

Источником силы, в соответствии с законом всемирного тяготения, является масса тел. Таким образом, понятие массы более фундаментально, чем силы.

Согласно квантовой теории поля, частицы, обладающие массой, могут появляться из физического вакуума при достаточно высокой концентрации энергии, которая тем самым выступает как еще более общая концепция, чем масса, т.е. энергия присуща не только веществу, но и безмассовым полям.

Развитие физики показало, что источником электрических и магнитных сил является электрический заряд.

Принято говорить о двух массах:

- **масса гравитационная** (тяжелая) – мера гравитационного воздействия (m_g).
- **масса инертная** – мера инертности, т.е. способности тел сопротивляться воздействию внешних сил (m_i).

Относительно точные измерения показывают равенство m_g и m_i .

Законы Ньютона

Как уже говорилось ранее, в основе классической механики лежат законы Ньютона, сформулированные им в 1667 г. Согласно [3] эти законы выглядят следующим образом.

Первый закон Ньютона: всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее изменить это состояние.

Второй закон Ньютона: ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):

$$a = F/m$$

Второй закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчета.

Третий закон Ньютона: всякое действие материальных точек (тел) друг на друга носит характер взаимодействия; силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки (тела), всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки. Эти силы имеют одну природу, так как обусловлены одним и тем же видом взаимодействия.

Закон всемирного тяготения: если взаимодействующие тела принять за материальные точки массами M и m , расположенные на расстоянии r друг от друга, то для модуля силы гравитационного взаимодействия F можно написать:

$$F = GMm / r^2,$$

Где G – гравитационная постоянная.

Принципы относительности

Важную роль в развитии естествознания сыграл принцип относительности, впервые сформулированный Галилеем для механического движения. Механическое движение относительно, а его характер зависит от системы отсчета. Такая система отсчета, которая либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно, называется инерциальной системой отсчета. Первый закон Ньютона утверждает существование инерциальных систем отсчета.

Установлено, что во всех инерциальных системах отсчета законы классической динамики имеют одинаковую форму.

То есть, уравнения динамики при переходе от одной инерциальной системы к другой не изменяются, т.е. инвариантны по отношению к преобразованию координат. В этом заключается сущность **принципа относительности Галилея**.

Распространенный А. Пуанкаре на все электромагнитные процессы и использованный Эйнштейном для специальной теории относительности, в современной трактовке **принцип относительности** таков: все инерциальные системы отсчета равноправны между собой (неотличимы друг от друга) в отношении

протекания физических процессов, то есть физические процессы не зависят от равномерного и прямолинейного движения системы отсчета [7].

Вместе с принципом относительности в физике утвердилось понятие инвариантности – неизменность физических величин, или свойств природных объектов при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Из *специальной теории относительности* (СТО) вытекает ряд инвариантов: скорость света, масса, электрический заряд.

Созданная А. Эйнштейном в 1905 г. СТО представляет собой современную физическую теорию пространства и времени, описывающую все физические явления, в которой (как и в механике Ньютона) предполагается, что время однородно, а пространство однородно и изотропно.

СТО часто называют релятивистской теорией.

В основе СТО лежат постулаты Эйнштейна:

- ***Принцип относительности***: никакие опыты (механические, электрические, оптические), проведенные в данной инерциальной системе отсчета не дают возможность обнаружить, покоится эта система или движется равномерно и прямолинейно, все законы инвариантны при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.
- ***Принцип инвариантности скорости света***: скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Согласно второму постулату, постоянство скорости света в вакууме – физическое свойство природы.

Независимость скорости света от движения Земли была доказана опытом А. Майкельсона.

Создание специальной теории относительности привело к тому, что такие понятия, как абсолютное время и абсолютное пространство потеряли всяческий смысл, хотя сам Эйнштейн исходил именно из этих свойств.

Закон сохранения массы

Как мы уже говорили, масса является фундаментальной величиной в классической механике. Анализ законов Ньютона позволяет сделать вывод о зависимости процессов движения макроскопических тел от массы.

Теория относительности Эйнштейна показала, что масса зависит от скорости, кроме того, между массой тела (**m**) и его энергией (**E**) существует связь, выражаемая соотношением

$$E = mc^2,$$

где **c** – скорость света в вакууме (около 300 000 км/с).

На основании изложенного становится необходимым сформулировать понятие массы и закон ее сохранения.

Это было сделано во второй половине XVIII в. М.В. Ломоносовым и А. Лавуазье независимо друг от друга. Ломоносов впервые сформулировал **закон сохранения массы** в 1748 г., а в 1756 г. экспериментально подтвердил его. В формулировке Ломоносова этот закон звучит следующим образом: масса (вес) веществ, вступающих в реакцию, равна массе (весу) веществ, образующихся в результате реакции [10].

Французский химик Лавуазье в 1789 г. установил, что в ходе химических реакций сохраняется не только масса реагирующих веществ, но и масса каждого из составляющих их элементов.

Закон сохранения энергии

Следующим важным законом является закон сохранения энергии. Формирование понятия механической энергии было связано с формированием понятия механической работы, т.е. превращения механического движения в другие формы движения.

Термин «энергия» впервые упоминается у Аристотеля как характеристика деятельности по осуществлению способности ее перехода в реализацию именно в связи с попыткой охарактеризовать движение в качестве общей категории. Представления о превращениях различных видов движения, неуничто-

жимости движения, зародившиеся в философии Древней Греции и Востока, стали принимать более определенные научные формы в XVII веке. В это время механистическая картина мира приводила идею несотворимости и неуничтожимости материи и движения к представлениям о несотворимости и неуничтожимости именно механического движения.

Возник спор о том, какой величиной измерять это движение: mV или mV^2 , где m обозначает массу тела, V – его скорость? Гюйгенсом и Вреном было установлено, что при упругом ударе величина mV^2 остается неизменной. Величина mV , введенная Декартом, называлась количеством движения. Величина mV^2 была введена Лейбницем и названа «живой силой» (*vis viva*). Для того, чтобы проследить развитие представлений о величинах, которыми можно выразить движение, профессор С. И. Самыгин [2] предлагает рассмотреть случай удара двух шаров.

Допустим, что два шара, двигаясь таким образом, что первый догоняет второй, соударяются и продолжают движение. Первый шар имеет массу m , скорость до удара – v , скорость после удара – u . Второй шар имеет массу M , скорость до удара – V , скорость после удара – U . Согласно утверждениям Декарта, справедливо равенство:

$$MV + mv = MU + mu$$

Гюйгенс и Лейбниц считали, что сохраняется «живая сила», и можно заключить, что:

$$MV^2 + mv^2 = MU^2 + mu^2$$

Спор о том, какое из указанных выше выражений верно, разрешился только после открытия закона сохранения (при превращении) механической энергии.

В 1829 г., практически через 100 лет, Кориолис вводит величину, равную половине «живой силы» ($mV^2/2$), которая в современном представлении определяет *кинетическую энергию*. Термин «энергия», как динамическая переменная, вводится лишь в начале XIX века в работах Юнга. Решение вопроса рас-

пространения понятия «энергия» за рамки механистического описания явлений природы и привело к открытию закона сохранения и превращения энергии.

Таковы исторические факты, предшествующие открытию одного из наиболее важных законов физики.

Для того, чтобы проследить, какие изменения претерпевает энергия, ответим на вопрос, как можно сообщить телу кинетическую энергию, и что с ней, в конечном итоге, произойдет?

Кинетическую энергию можно передать телу при столкновении (например, удар двух шаров), или ее можно получить, подталкивая тело с помощью некоторой силы [2].

Допустим, что тело под действием силы $\mathbf{F}$ выходит из состояния покоя и движется с возрастающей скоростью в течение времени t .

К моменту времени t скорость возрастает до V и тело проходит расстояние x . Использование законов механики дает равенство:

Величина Fx равна произведению модуля силы на расстояние, пройденное под действием этой силы, и называется работой A :

$$|\mathbf{F}| \cdot x = A$$

Необходимо решить вопрос, сможет ли тело потом, за счет запаса кинетической энергии, произвести столько же работы? Ответ положителен.

Если на пути тела окажется другое тело (например, пружина), то тело будет сжимать ее, действуя на пружину с некоторой силой, и, в конце концов, потратив всю свою кинетическую энергию, – остановится.

Вслед за этим пружина совершит работу над телом, которая уйдет на увеличение кинетической энергии (E_k) тела после остановки.

Вопрос: пружина сжата, тело покоится, не совершается работа, тело не имеет кинетической энергии. Куда все подевалось?

Очевидно, что пружина перешла в другое качественное состояние: из недеформированного – в сжатое, после чего, разжимаясь, пружина сама совершила работу. То есть, запас кинетической энергии перешел в запас энергии в сжатом состоянии. Первоначально эту энергию называли «мертвой силой». В на-

стоящее время неподвижную форму энергии принято называть **потенциальной**. Это определение подчеркивает возможность перехода потенциальной энергии в энергию движения.

Самый простой способ запasti потенциальную энергию ($E_{\text{п}}$) – поднять тело на высоту. При падении происходит переход потенциальной энергии в кинетическую.

Обычно термин потенциальная энергия относят к энергии, запасенной в деформированном теле, т.е. к запасу энергии, обусловленному положением тела в некотором поле.

Так как нам известны 4 типа взаимодействий и, соответственно, четыре типа полей, нельзя свести понятие потенциальной энергии только к механическому движению.

Потенциальная энергия определяется теми процессами, которые обусловлены конкретной природой взаимодействия системы тел. Например, в поле гравитационных сил для поднятого на высоту h тела:

$$E_{\text{п грав.}} = mgh,$$

где m – масса тела, g – ускорение силы тяжести у поверхности Земли ($9,8 \text{ м/с}^2$).

Для сжатой пружины:

$$E_{\text{п}} = (1/2)kx^2,$$

где k – коэффициент, зависящий от свойств пружины (определяется экспериментально).

Аналогичные выражения можно получить для потенциальной энергии двух взаимодействующих магнитов, для электростатической потенциальной энергии. Общий вывод будет таким: потенциальная энергия изменяется обратно пропорционально расстоянию, коэффициент пропорциональности характеризует некоторые внутренние свойства взаимодействующих объектов.

В задачи механики не входит изучение процессов, происходящих при взаимодействии атомов друг с другом (вспомним о коэффициенте пропорциональности). Задача механики – получить конечный результат, которым можно опре-

делить работу, необходимую для изменения конфигурации взаимодействующих объектов (в нашем случае – сжатие пружины). Запас этой работы и рассматривается как потенциальная энергия (пружины). Таким образом, потенциальная энергия входит в механику, как определяющее свойство системы материальных сил, совершающих работу при изменении конфигурации тел в системе.

Таким образом, мы приходим к выводу, что работа является мерой изменения энергии. Этот вывод послужил основанием для формулирования закона сохранения и превращения энергии применительно к механическим процессам: полная энергия замкнутой консервативной системы тел, равная сумме их потенциальной и кинетической энергии, остается величиной постоянной [2].

Необходимо заметить, что всякий физический закон имеет свои границы применимости, и закон сохранения механической энергии – не исключение. Во-первых, необходима изолированность системы тел от любых внешних воздействий (*замкнутая система*). Во-вторых, работа однозначно определяется изменением потенциальной энергии тела при перемещении его из одной точки в другую только в определенных типах полей, называемых *потенциальными*. Потенциальными считаются поля, работа сил которых не зависит от траектории движения тела в поле (гравитационные, электростатические). Силы этих полей называют *консервативными*.

Если работа сил зависит от формы пути (силы зависят от скорости движения), механическая энергия системы не сохраняется. Такие силы называются *диссипативными*.

Внимательный анализ данной проблемы дает однозначный результат – некоторые силы, не являющиеся консервативными, присутствуют в любых видах движения (например, – сила трения). Поэтому закон сохранения полной механической энергии системы выполняется лишь в идеализированных ситуациях.

Закон сохранения импульса

Для того чтобы вывести закон сохранения импульса, рассмотрим два взаимодействующих тела. Т.Я. Дубнищева [6] в качестве таких тел предлагает рассматривать два бегунка с укрепленными на торцах магнитами. Последнее условие необходимо для получения упругого удара, так как в случае неупругого удара закон сохранения импульса не выполняется. Условия выполнения закона сохранения импульса аналогичны условиям выполнения закона сохранения механической энергии системы: система должна быть замкнутой, в ней должны действовать только консервативные силы.

Импульсом называется величина, выраженная как произведение массы на скорость:

$$\mathbf{P} = \mathbf{MV}$$

Для двух бегунков, обладающих массами m и M , скоростью до удара – $\mathbf{v}$ и $\mathbf{V}$, скоростью после удара – $\mathbf{u}$ и $\mathbf{U}$, закон сохранения импульса будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{MV} + \mathbf{mv} = \mathbf{MU} + \mathbf{mu}$$

В зависимости от первоначального направления движения каждого из бегунков, их скорости и массы, будет определяться направление движения и скорость после соударения.

Закон сохранения импульса получен на основании экспериментальных данных, его идея была выдвинута М.В. Ломоносовым, а количественная формулировка – немецкими учеными Ю. Майером и Г. Гельмгольцем.

Закон сохранения момента импульса

Моментом импульса вращающегося вокруг оси тела называется векторное произведение импульса тела на радиус-вектор, проведенный из общего начала координат, расположенного на оси вращения, к центру масс данного тела. В замкнутой системе момент импульса есть величина постоянная. Так как момент импульса является векторной величиной, в замкнутой системе сохраняется и его направление, которое определяется по правилу правого буравчика. При

вращении момент импульса зависит от массы и скорости тела, а также от положения тела в пространстве.

Законы сохранения как следствие из свойств пространства и времени

Так как в широком смысле симметрия означает инвариантность как неизменность свойств системы относительно некоторых преобразований ее параметров, инвариантность непосредственно связана с симметрией, которая является характеристикой неизменности структуры материального объекта относительно его преобразований.

Связь между законами сохранения и симметрией пространства установила немецкий математик Э.Нетер. Фундаментальная теорема, доказанная ею и названная ее именем, гласит, что из однородности пространства вытекает закон сохранения импульса; из однородности времени вытекает закон сохранения энергии, из изотропности пространства – закон сохранения момента импульса. Такие следственные связи устанавливаются благодаря следующим свойствам пространства [11]: однородность пространства предполагает, что механические свойства замкнутой системы не изменяются при любом параллельном переносе системы как целого в пространстве. Под параллельным переносом понимают преобразование, при котором все точки системы смещаются на один и тот же постоянный вектор. Изотропность пространства обозначает, что механические свойства замкнутой системы не изменяются при любом повороте системы как целого в пространстве.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие задачи решает механика?
2. В чем разница между кинематикой и динамикой?
3. Почему основными понятиями кинематики являются скорость, ускорение, траектория?
4. Почему для исследований в механике используют математические модели?
5. Для изучения поведения материальной точки используют инерциальную систему отсчета. С чем это связано?
6. Почему сила и масса являются фундаментальными величинами в динамике? Существуют ли, по вашему мнению, другие величины, претендующие на фундаментальность?
7. Какую массу, инертную или гравитационную вы получаете в результате взвешивания на весах? Почему?
8. Определите значение законов Ньютона для развития физики.
9. В чем различаются принципы относительности в формулировках Галилея и Эйнштейна? Почему?
10. Законы сохранения выполняются, в основном, в замкнутых системах. Как это объяснить?
11. В чем значение теоремы Э.Нетер?

4. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ

Развитие представлений о теплоте

Как уже указывалось ранее, для того, чтобы рассматривать любой закон сохранения, необходимо ввести ряд ограничений.

В первую очередь это относится к закону сохранения механической энергии.

Во-первых, необходима изоляция рассматриваемой системы тел от внешних воздействий. Такую систему называют замкнутой.

Во-вторых, не всегда работа определяется изменением потенциальной энергии тела при перемещении его из одной точки поля в другую. Работа, как мера измерения потенциальной энергии, имеет место лишь в потенциальных полях (гравитационных и электростатических), т.е. там, где работа не зависит от траектории движения тела в поле. Силы этих полей называют консервативными.

В том случае, когда работа зависит от формы пути, или силы зависят от скорости движения, механическая энергия системы не сохраняется. Таким образом, как уже упоминалось ранее, закон сохранения механической энергии имеет смысл лишь применительно к идеализируемым ситуациям. И действительно, в реальном мире качающиеся маятники останавливаются, т.е. энергия на что-то тратится.

Наблюдения показывают, что происходит изменение системы: состояния, объема тел, их температуры.

Попытки обмануть природу и создать машину, движение которой было бы основано на вечном непреходящем превращении механической энергии, совершались и будут совершаться еще долгое время. Это особая страница развития человеческого общества – проблема создания «perpetum mobile» – *вечно двигателя*. Невероятные ухищрения человеческого ума привели к созданию, в общем-то, немногочисленного количества псевдовечных двигателей. Первый достоверный документ об «осуществлении» такого рода машины относится к

XIII веку. Еще до установления закона сохранения энергии в 1775 г. французской Академией было сделано заявление, где говорилось о невозможности создания вечного двигателя и отказе принимать к рассмотрению подобные проекты.

Итак, вывод однозначен: при наличии неконсервативных сил, в частности, силы трения, механическая энергия растрачивается. Куда? Увы, на этот вопрос нельзя ответить, опираясь на концепцию Ньютона. Вокруг нас происходят явления, внешне весьма мало связанные с механическим движением. Это явления, наблюдаемые при изменении температуры тел, при переходе этих тел из одного агрегатного состояния в другое. Такие явления называются тепловыми. История развития представлений о тепловых явлениях – пример сложного и противоречивого пути постижения научной истины.

Люди добились относительной независимости от окружающей среды тогда, когда научились добывать и поддерживать огонь.

О том, что такое теплота, люди задумывались очень давно. Такие понятия как «огонь», «свет», «теплород» встречаются уже в древнейших сказаниях Востока, в работах философов Древней Греции. Многие философы древности рассматривали «огонь» и связанную с ним теплоту, как одну из стихий, которая наряду с землей, водой и воздухом образует все тела. Одновременно теплоту пытались связать с движением, так как было замечено, что при соударении тела нагреваются.

Схоласты средневековья рассматривали холод, как противоположную субстанцию по отношению к теплоте, а не как ее недостаток.

Учение о тепловых явлениях начинает развиваться только с середины XVIII века. Толчком для этого развития явилось изобретение термометра. При этом нужно отметить, что долгое время понятие «тепло» и «температура» не различались, хотя, в переводе с латинского, *temperatura* – это смешивание в должном отношении.

Гален выделял 4 жидкости, которые, смешиваясь, создают темперамент человека, Гиппократ считал, что за темперамент человека отвечают 4 жидкости:

кровь, слизь, черная желчь, желтая желчь. При смешивании этих составляющих в определенных пропорциях проявляются четыре типа человеческого темперамента: холерик, сангвиник, меланхолик, флегматик.

Первый прибор для измерения температуры изобрел Галилей; этот прибор еще не имел без градуированной шкалы и получил название «термоскоп». Первый термометр (прибор для измерения температуры, имеющий шкалу) был сконструирован французским механиком и физиком Гийомом Амонтоном в 1702 г. Амонтон же пришел к идее абсолютного нуля, который по его данным соответствовал температуре $-293,8^{\circ}\text{C}$.

Далее изобретением различного рода термометров занимались флорентийские академики, Ньютон, фон Герике и многие другие ученые. Но все эти приборы имели существенный недостаток: отсутствие единообразия в шкалах.

Первую попытку изготовления термометров с одинаковыми показателями предпринял Фаренгейт (стеклодув из Данцига). В начале XVIII в. (1714 г.) шкала Фаренгейта получила широкое распространение сначала в спиртовых, а затем в ртутных термометрах. Эта шкала принята сейчас во многих странах (США, Австралия, Новая Зеландия). Совместными усилиями шведского астронома А. Цельсия и шведского ботаника К. Линнея был создан привычный нам термометр, где $t = 0^{\circ}\text{C}$ соответствует температуре таяния льда, а 100°C – температуре кипения воды.

Зимние уличные температуры ниже 0°C . Абсолютный 0 по шкале Цельсия, соответствующий такому состоянию вещества, когда от него никаким способом нельзя получить тепло, соответствует -273°C .

Уильямом Томсоном, получившим за научные труды титул лорда Кельвина, создана термодинамическая шкала (шкала Кельвина), в соответствии с которой температуры кипения и замерзания воды $373,2$ и $273,2$ К, соответственно, так как абсолютный ноль соответствует 0 К.

В большинстве стран принята шкала Цельсия. В научной литературе используется либо шкала Цельсия, либо Кельвина.

Термодинамика и молекулярно-кинетическая теория

Можно бесконечно долго перечислять фамилии ученых, внесших свой вклад в развитие концепции теплоты, и, по существу, в открытие закона сохранения и превращения энергии. Тем не менее, первая ясная формулировка этого закона была получена Р. Клаузиусом и У. Томсоном. Работы С. Карно положили начало новому методу рассмотрения превращения теплоты и работы друг в друга. Результатом огромного количества исследований стала наука, которую Томсон впоследствии назвал термодинамикой. Термодинамическое учение рассматривает, в основном, особенности превращения тепловой формы движения в другие, не интересуясь микроскопическим движением частиц, составляющих вещество.

Открытие закона сохранения и превращения энергии привело к изучению тепловых явлений в двух направлениях: термодинамическом, изучающем тепловые процессы без учета молекулярного строения вещества, и молекулярно-кинетическом (статистическом).

Термодинамика представляет собой науку о тепловых явлениях, в которой не учитывается молекулярное строение тел. Тепловые явления в термодинамике описываются с помощью величин, регистрируемых приборами, не реагирующими на воздействие отдельных молекул.

Термодинамика рассматривает в качестве объектов изучения тела с очень большим количеством молекул. Такие тела называют **макроскопическими**, а системы, образованные ими – **макросистемами**.

Все тепловые процессы обычно связаны с передачей и превращением энергии, описание которых и составляет одну из важнейших задач термодинамики. Термодинамика базируется на трех физических законах: I, II и III началах термодинамики. Основа термодинамического метода – определение состояния термодинамической системы, представляющей собой совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией, как между собой, так и с другими телами. Состояние системы задается термодинамически-

ми параметрами, характеризующими ее свойства: температурой, давлением, удельным объемом (объем единицы массы).

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы.

Любое изменение термодинамической системы, связанное с изменением хотя бы одного термодинамического параметра, называется **термодинамическим процессом**. Если состояние макросистемы со временем не меняется, то говорят о ее **термодинамическом равновесии**.

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) явилась развитием кинетической теории вещества. Она изучает макросистемы, как совокупность хаотически движущихся молекул. Для этого используется статистический метод, где рассматривается не движение отдельных молекул, а только средние величины, которые характеризуют движение огромной совокупности частиц. Поэтому в МКТ выделяется два подхода: статистическая физика и термодинамика.

В основе молекулярно-кинетических представлений о строении и свойствах макросистем лежат следующие положения:

- 1) Все тела, независимо от агрегатного состояния, состоят из большого числа молекул (атомы рассматриваются как одноатомные молекулы).
- 2) Молекулы всякого вещества находятся в непрерывном хаотическом движении.
- 3) Интенсивность движения молекул зависит от температуры вещества.

Количественным воплощением молекулярно-кинетических представлений служат опытные газовые законы, уравнения состояния Клапейрона – Менделеева, закон Максвелла для распределения молекул и др.

I и II начала термодинамики

Всякая термодинамическая система в любом состоянии обладает внутренней энергией – энергией теплового (поступательного, вращательного, колебательного) движения молекул и потенциальной энергией их взаимодействия. Возможны два способа изменения внутренней энергии термодинамической си-

стемы при ее взаимодействии с внешними телами: путем совершения работы и путем теплообмена.

До тех пор, пока Клаузиус и Томсон, используя работу тепловой машины Карно, не пришли к выводу о том, что в основе цикла Карно лежат два независимых принципа: I и II начала термодинамики, невозможно было утверждать правильность закона сохранения энергии.

Поскольку тепловое движение также является механическим (но хаотическим), то закон сохранения энергии должен распространяться не только на внешние, но и на внутренние движения. В этом заключается качественная формулировка I начала термодинамики, как закона сохранения энергии для термодинамической системы [7].

Количественно закон сохранения энергии термодинамической системы формулируется следующим образом:

Количество теплоты, сообщенное телу (ΔQ), идет на увеличение его внутренней энергии (ΔU) и на совершение телом работы над внешними телами (ΔA):

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

I начало термодинамики позволяет сделать заключение о невозможности *вечного двигателя I рода* (двигатель, основанный на «работе из ничего»).

Термодинамические процессы *необратимы*, так как если реализуется термодинамический процесс, то обратный процесс, при котором повторяются в противоположном направлении те же тепловые состояния, практически невозможен [13]:

1. Если привести в соприкосновение два тела с различной температурой ($T_1 > T_2$), то более нагретое тело (T_1), будет отдавать тепло менее нагретому (T_2) - процесс T_{1-2} . Обратный процесс (T_{2-1}) – никогда не произойдет.
2. Газ, находящийся в части сосуда, отделенной от другой части перегородкой, после удаления последней заполнит весь сосуд, и без посто-

ронного вмешательства не соберется в первоначальном объеме самопроизвольно.

Любая система, предоставленная сама себе, стремится перейти в состояние термодинамического равновесия ($T_1 = T_2$, $p_1 = p_2$ и т.д.), из которого самопроизвольно не выходит. Следовательно, все термодинамические процессы, стремящиеся к равновесному состоянию, необратимы.

Так же необратимы и все механические процессы, сопровождающиеся трением, так как при трении замедляется движение тел, и кинетическая энергия переходит в тепловую энергию.

Если система находится в состоянии термодинамического равновесия, в ней невозможны никакие процессы при отсутствии внешнего вмешательства.

В этом заключается сущность II начала термодинамики.

Академик С.Х. Карпенков [7] и профессор С.И. Самыгин [2] приводят различные формулировки II начала термодинамики:

- Невозможно получить работу за счет энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии.
- Невозможны такие процессы, единственным конечным результатом которых был бы переход тепла от тела, менее нагретого к телу, более нагретому.
- В природе возможны процессы, протекающие только в одном направлении – в направлении передачи тепла только от более горячих тел менее горячим.
- Коэффициент полезного действия (КПД) любой тепловой машины всегда меньше 100%, то есть, невозможен вечный двигатель II рода (так как невозможно построить тепловую машину, работающую не за счет перепада теплоты, а за счет теплоты одного нагревателя).
- КПД любой реальной тепловой машины всегда меньше КПД идеальной тепловой машины.

- Энтропия изолированной системы при протекании необратимых процессов возрастает, ибо система, предоставленная самой себе, переходит из менее вероятного состояния в более вероятное. Энтропия системы, находящейся в равновесном состоянии, максимальна и постоянна.

Последняя формулировка требует пояснений, которые становятся возможными только при рассмотрении таких понятий как энтропия и вероятность.

Цикл Карно

Необратимость тепловых процессов имеет вероятностный характер. Самопроизвольный переход тела из равновесного в неравновесное состояние не невозможен, но подавляюще маловероятен. Необратимость тепловых процессов, в конечном результате, обусловлена огромным количеством молекул, из которых состоит любое тело.

Понятие энтропии можно объяснить, используя цикл Карно [14]. Цикл Карно рассматривает работу идеальной тепловой машины, в которой все процессы являются обратимыми.

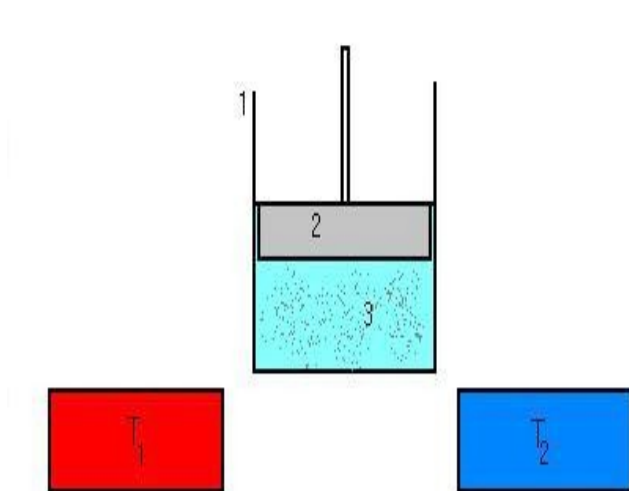


Рис. 4.1 Идеальная машина Карно.

Идеальная машина Карно (рис. 4.1) представляет собой цилиндр (1), оборудованный поршнем без трения (2), внутри которого имеется идеальный газ (3). Помимо этого необходимы две тепловые подушки – два очень больших тела, поддерживаемых при постоянных температурах T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$).

Обычно эти подушки называют нагревателем (T_1) и холодильником (T_2). Машина выполняет свою работу по циклу, состоящему из 4-х процессов (рис. 4.2).

При нагреве газа на нагревателе T_1 происходит расширение газа. При очень медленном расширении (медленном выдвижении поршня из цилиндра) расширение будет изотермическим (при постоянной температуре). Этот процесс соответствует кривой **a–b**, которая показывает, как изменяются объем и давление, если в цилиндре поддерживается постоянная температура T_1 . Для иде-

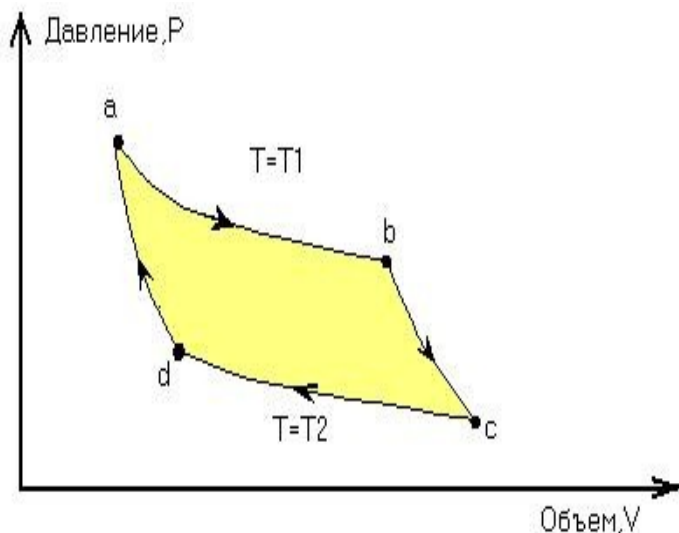


Рис. 4.2
Цикл Карно

ального газа эта кривая описывается уравнением $PV = NkT_1$, где N – количество молекул, k – постоянная Больцмана, T_1 – температура, при которой происходит процесс. В течение этого времени газ получает от нагревателя тепло Q_1 .

1. Цилиндр снимается с нагревателя, продолжается расширение

газа за счет выдвижения поршня. Так как нагреватель теперь в процессе не участвует, то с расширением газа температура начинает понижаться до тех пор, пока не достигнет температуры холодильника T_2 – такое расширение называется адиабатическим (тепло не поглощается и не выделяется). Вся работа идет на изменение внутренней энергии. На участке **b–c** кривая, называемая адиабатой, имеет вид $PV^\gamma = \text{const}$, где γ – постоянная, больше единицы. Поэтому адиабата круче изотермы.

2. Когда температура расширяющегося газа достигнет T_2 – цилиндр помещается на холодильник, и начинается медленное (!) сжатие газа. Температура газа при таких условиях не может подняться выше температуры холодильника, поэтому газ отдает все тепло Q_2 холодильнику – участок **c–d** (изотерма).

3. В точке *d* цилиндр снимается с холодильника и продолжается сжатие газа, но тепло Q_2 не отнимается. При этом температура газа повышается, а давление возрастает по кривой **d–a**.

Если все этапы проделаны тщательно, то мы вернемся в исходную точку «**a**» при температуре T_1 , и цикл можно будет повторить бесконечное количество раз.

Расчет показывает, что совершенная за весь цикл работа равна площади внутри кривых.

КПД идеальной и реальной машины

После смерти Карно Клаузиус описал цикл Карно с точки зрения закона сохранения энергии и получил выражение для КПД идеальной системы:

$$\text{КПД} = (T_{\text{нагревателя}} - T_{\text{холодильника}}) / T_{\text{нагревателя}} = (T_1 - T_2) / T_1$$

Кроме того, Клаузиус показал, что КПД любой машины должен быть меньше или равен КПД идеальной машины.

Для идеальной машины Карно верно, что

$$(Q_1 - Q_2) / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_2$$

Отсюда:

$$Q_1 / T_1 = Q_2 / T_2 \text{ или } Q_1 / T_1 - Q_2 / T_2 = 0$$

Так как Q_2 отдается холодильнику, его нужно взять с противоположным знаком. Если учитывать некоторую порцию ΔQ , которая получена от нагревателя, или отдана холодильнику, то предыдущее выражение приобретет вид:

$$\Delta Q_1 / T_1 + \Delta Q_2 / T_2 = 0$$

Полученное выражение напоминает закон сохранения, а это привлекает внимание к величине $\Delta Q / T$.

Энтропия

В 1865 г. Клаузиус ввел понятие *энтропии* (поворот, превращение):

Существует некоторая величина S , которая подобно энергии, давлению, температуре, характеризует состояние газа.

В термодинамике энтропией называется функция, полный дифференциал которой равен приведенному количеству теплоты.

Если к газу подвести некоторое количество теплоты ΔQ , то его энтропия S возрастет на величину

$$\Delta S = \Delta Q/T$$

Как мы уже говорили, термодинамические процессы могут быть обратимыми и необратимыми.

$S = \text{const}$ ($\Delta S = 0$) – для изолированной системы в случае обратимых процессов.

При необратимых процессах наблюдается закон возрастания энтропии, и в этом случае $\Delta S > 0$.

Обратимые и необратимые процессы

Процесс перехода системы из состояния 1 в состояние 2 называется обратимым, если возвращение этой системы в исходное состояние 1 из состояния 2 можно осуществить без каких бы то ни было изменений в окружающих внешних телах [13].

Процесс перехода системы из 1 в 2 называется необратимым, если обратный переход нельзя осуществить без изменений в окружающих телах.

Мерой необратимости процесса в замкнутой системе является изменение энтропии.

Примеры необратимых процессов [13]:

1. Процесс передачи тепла при конечной разности температур необратим, т.к. обратный переход связан с отнятием тепла у холодного тела, превращением его в работу, и затратой ее на увеличение энергии нагретого тела.

2. Расширение газа в пустоту необратимо, т.к. при таком расширении не совершается работа, а сжать газ, не совершая при этом работы, невозможно. Произведенная же при сжатии работа идет на нагревание газа.

3. Процесс диффузии необратим. Если в сосуде с двумя газами, разделенными перегородкой, снять эту перегородку, каждый газ начнет диффунди-

ровать в другой. Для разделения газов каждый из них нужно сжимать. Чтобы они при этом не нагревались, необходимо обеспечить отвод теплоты с превращением ее в работу, что невозможно без изменения в окружающих телах.

В основе термодинамики лежит различие между процессами обратимыми и необратимыми. Энтропия является мерой различия этих процессов.

Энтропия и вероятность

Работы Больцмана приводят к переходу этого различия с макроуровня на микроуровень. Любое макросостояние системы может быть осуществлено различными способами, каждому из которых соответствует свое микросостояние. Число микросостояний, соответствующих каждому макросостоянию, называется *статистическим весом* W или *термодинамической вероятностью* макросостояния.

Что это пояснить, рассмотрим пример [2]. В сосуде находится газ, число молекул которого равно N . Выделим одну молекулу, чтобы отследить ее поведение. Эта молекула может занимать любое положение в данном сосуде, причем это положение в любой момент времени случайно: $W = 1$.

Разделим объем на две половины. Молекула, постоянно блуждая, пробудет в половине сосуда половину времени ($W_1=1/2$). Если наблюдать за двумя такими молекулами, то вероятность того, что они одновременно находятся в одной из половинок сосуда, равна произведению вероятностей каждой молекулы.

$$W = W_1 * W_2 = 1/4;$$

Для трех молекул $W = W_1 * W_2 * W_3 = (1/2)^3$, для N молекул $W = (W_1)^n$

Исходя из *закона Авогадро* (в 1 моле содержится $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ молекул) – вероятность нахождения всех молекул в половине сосуда будет ничтожно мала: $W = (1/2)^{N_A}$

Вероятность же того, что все молекулы находятся во всем объеме данного сосуда, максимальна и равна 1. Это состояние может быть реализовано максимальным числом способов: любая молекула находится в любой точке про-

странства. В этом случае статистический вес W , т.е. число способов, реализующих данное состояние, максимален.

Допустим, что в некоторый момент времени удастся с помощью перегородок собрать все молекулы в $1/4$ сосуда. Остальные $3/4$ сосуда останутся пустыми. Как только мы уберем перегородки, молекулы сразу же заполнят весь объем, то есть перейдут из состояния с меньшей вероятностью в состояние с большей вероятностью.

Таким образом, все процессы идут только в одном направлении: от некоторой структуры к полной симметрии, т.е. от менее вероятного – к более вероятному состоянию.

Больцман первым увидел связь между энтропией и вероятностью и определил, что эта связь – логарифмическая. Эта связь энтропии с вероятностью была математически реализована в 1906 г. М. Планком в формуле:

$$S = k \cdot \ln W,$$

где k – постоянная Больцмана, рассчитанная Планком.

Идея Больцмана о вероятностном поведении частиц явилась развитием нового подхода при описании макросистем, впервые предложенного Максвеллом. Используя новый подход, Максвелл вывел **закон распределения числа молекул по скоростям**. Распределение Максвелла позволяет определить, какое количество молекул из общего числа молекул газа обладает при данной температуре скоростями, лежащими в заданном интервале скоростей, а также среднее значение скорости молекул и вероятность, с которой определенное число частиц имеет скорость, находящуюся в заданных пределах. Работы Клаузиуса, Томсона, Максвелла и Больцмана решили основную задачу построения кинетической теории газов: установлен закон, выражающий макропараметры идеального газа (давление и температуру) через микропараметры.

Пределы применимости II начала термодинамики

Применимость начал термодинамики ограничивается, прежде всего, рамками самой термодинамики: ее предметом и исходными положениями.

Поэтому законы термодинамики неприменимы к микросистемам, размеры которых сравнимы с размерами молекул. Это не означает, что в таких системах нарушается II начало термодинамики - вечный двигатель второго рода нельзя осуществить с помощью любых систем.

Таким образом, появляется нижняя граница применимости II начала термодинамики.

Верхняя граница связана с ограничением применения законов термодинамики к системам галактических размеров вследствие дальнедействующего характера гравитационных сил, которые играют в этих системах определяющую роль. Такое действие приводит к невыполнению в галактических системах исходных положений термодинамики. Следовательно, нельзя применить II начало термодинамики к большим участкам Вселенной, а тем более ко Вселенной целиком.

Гипотеза «тепловой смерти» Вселенной

Распространив принцип возрастания энтропии на Вселенную, Клаузиус выдвигает гипотезу «тепловой смерти» Вселенной. «Энергия мира постоянна. Энтропия мира стремится к максимуму» [2]. Следовательно, во Вселенной, из-за перехода в равновесное состояние с максимальной энтропией, должны прекратиться все физические процессы.

Эта проблема занимает лучшие умы человечества более ста лет, и все еще ждет своего разрешения.

III начало термодинамики

В начале XX в. в результате исследований свойств тел при низких температурах, немецкий физик и химик Нернст установил III начало термодинамики, к настоящему времени так же прочно обоснованное, как и первые два.

По мере приближения температуры к 0К энтропия всякой равновесной системы при изотермических процессах перестает зависеть от каких-либо термодинамических параметров состояния и в пределе $T = 0\text{К}$ принимает одну и ту

же для всех систем универсальную величину, которую можно принять равной нулю [13].

Одно из важных следствий третьего начала термодинамики – недостижимость абсолютного 0. Доказать это можно следующим образом: охлаждение системы осуществляется повторением чередующихся процессов адиабатического расширения (температура понижается) и изотермического сжатия (энтропия уменьшается). Согласно III началу термодинамики при изотермических процессах при приближении температуры к 0К, энтропия перестает изменяться при сжатии. Поэтому состояние с $S = 0$ недостижимо за конечное число указанных процессов. Следовательно, $T = 0$ К достигнуть невозможно, т.к. это состояние совпадает с состоянием $S = 0$. К $T = 0$ К можно лишь приблизиться.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие события, по вашему мнению, стали важнейшими в развитии представлений о теплоте?
2. Используя полученные ранее знания, определите события, которые стали причиной появления и развития термодинамики.
3. В чем различаются термодинамика и МКТ?
4. Что позволяет определить распределение Максвелла по скоростям?
5. Сформулируйте первое начало термодинамики и поясните, какая машина называется «вечным двигателем I рода»
6. Какая из формулировок II начала термодинамики кажется вам наиболее простой и понятной? Почему?
7. Что представляет собой «вечный двигатель II рода»?
8. Приведите примеры обратимых и необратимых процессов.
9. Что называется «энтропией»? Почему возникла необходимость введения нового понятия?
10. В чем заключается «тепловая смерть» Вселенной. Согласны ли вы с правильностью данной гипотезы?

11. Что определяет III начало термодинамики?

5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Развитие представлений об «эфире»

Как нам уже известно, в классическом представлении различают две формы существования материи: вещество и поле. Вопрос о существовании поля, как о связующем материальных тел и способе передачи взаимодействий развивался в двух направлениях.

Проблема среды (проблема «эфира»), в которой происходит взаимодействие между телами, возникла уже в Древней Греции. Аристотель, отрицая существование «пустоты», в которой взаимодействуют тела, считал, что при движении после удара тело «ведет среда». Это учение будет господствовать в науке два тысячелетия!

Демокрит, Эпикур и другие последователи концепции атомизма доказывали, что частицы, составляющие мир (атомы), движутся в пустоте, и любое явление природы объясняется перегруппировкой этих атомов.

Открытие в XVII в. торричеллиевой пустоты (вакуума) опровергло представления Аристотеля. Опыты немецкого естествоиспытателя фон Герике подтвердили гипотезу Торричелли о существовании безвоздушного пространства. В то же время было выяснено, что вакуум проводит свет, но не проводит звук.

Отрицающий пустоту французский физик Рене Декарт считал, что мир заполнен «эфиром» – тонкой невидимой материей, в которой взаимодействия передаются механическим путем через вихри.

Ньютоновская картина мира, где движение материальных точек подчиняется механическим законам, раз и навсегда вытеснила учение Аристотеля и стала критерием правильности любой теории. Теория Ньютона рассматривала движение и взаимодействие тел в пустом пространстве, не рассматривая процессов, происходящих в материи, не выясняя причин притяжения и отталкивания. Корпускулярная теория Ньютона рассматривала свет как поток частиц, летящих от светящегося тела по прямолинейным траекториям. По аналогии с этой теорией рассматривались все тепловые, электрические и магнитные явления.

Это привело к возникновению таких понятий, как теплород, флогистон, электрические и магнитные флюиды Кулона.

Но с позиций корпускулярной теории невозможно объяснить передачу действия на расстоянии, невозможно объяснить, что такое свет.

Теория света, предложенная Гюйгенсом, представляет свет, как колебания частиц, передающиеся от одного тела к другому через особую упругую среду, заполняющую пространство.

В конечном итоге проблема передачи взаимодействий на расстоянии стала называться проблемой «эфира». Электромагнитное поле сначала интерпретируется механически, как упругое напряжение «эфира». Но теория относительности отвергает «эфир» как среду, определяя поле как первичную физическую реальность.

В современной физике на роль «эфира» претендует физический вакуум, существование которого предположил английский физик П.Дирак («море Дирака»).

Концепции близкодействия и дальнодействия.

Развитие представлений о поле

В конце XIX – начале XX в.в. физика вышла на тот уровень описания микромира, где концепции классической физики оказались непригодными.

Новые научные открытия опровергли представления об атоме, как о последнем неделимом элементе материи.

История исследования строения атома начинается в конце XIX в. открытием электрона. Так как эта частица имела отрицательный заряд, а атом в целом электронейтрален, было сделано предположение о том, что помимо электронов в состав атома входит и положительная составляющая. Опыты Резерфорда доказали, что в атомах существуют ядра, размеры которых по сравнению с размерами атома малы, но в которых почти полностью сконцентрирована масса атомов.

Опыты Беккереля привели к открытию явления радиоактивности, т.е. превращения атомов одних веществ в атомы других в результате ядерных излучений. Это окончательно опровергло представления об атоме, как о структуре неделимой и непревращаемой.

Так при переходе к изучению микромира разрушались представления классической физики о веществе и поле, как о двух качественно различных видах материи.

Изучение микромира выявило, с точки зрения классической механики, парадоксальный факт: одни и те же объекты обнаруживали как волновые, так и корпускулярные свойства.

Первым шагом в этом направлении были работы М. Планка.

Но вернемся чуточку назад.

Итак, в классическом представлении различают две формы существования материи: вещество и поле. В настоящее время известно несколько разновидностей полей: электромагнитные, гравитационные, поля ядерных сил, волновые поля, соответствующие различным элементарным частицам.

Понятием поля, сформулированным применительно к конкретным объектам изучения, многие науки оперируют с середины XIX в., хотя общее представление о поле появилось уже в начале XIX в. после того, как была обнаружена связь между электрическими и магнитными явлениями.

Работы Эрстеда и Ампера положили начало науке об электромагнитных процессах – электродинамике. В 1820 г. Ампер заложил основы науки об электромагнитных процессах, ввел понятия электрического тока и напряжения, электрической цепи, разработал теорию электричества и магнетизма. Необходимо отметить, что первые попытки математического рассмотрения электрических явлений принадлежали немецкому ученому, эмигрировавшему в Россию, Ф. Эпинусу и относятся к середине XVIII в. Идеи Эпинуса были развиты Г. Кавендишем, а первый «электрический» закон сформулирован французским исследователем Ш. Кулоном. Это закон взаимодействия электрических зарядов.

В современном понятии *электродинамика* – это наука о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи – *электромагнитного поля*, посредством которого осуществляется взаимодействие между электрически заряженными телами [6].

Для описания электромагнитных явлений Фарадеем в 30-е годы прошлого века введено понятие «поля». *Поле* – это то, что излучается, распространяется с конечной скоростью в пространстве, взаимодействует с веществом. Для изображения поля Фарадей ввел силовые линии. Сформулированные Фарадеем идеи поля, как новой формы материи, были математически обработаны Максвеллом, который связал в своих уравнениях все экспериментальные законы, полученные в области электрических и магнитных явлений.

Система взглядов, которая легла в основу уравнений Максвелла, получила название «Максвелловской теории электромагнитного поля». После разработки во второй половине XIX в. этой теории началось широкое практическое использование электромагнитных явлений (радио Попова, электродвигатели, радиоприемники и т.д.). Впервые техническому применению предшествовали научные исследования.

Утверждению понятия «поле» способствовало стремление осознать характер электрических, электромагнитных и гравитационных сил.

После открытия закона всемирного тяготения (Ньютон) и – через 100 лет – закона Кулона возник ряд философских вопросов, возможность ответить на которые появилась только после введения понятия поля.

- Почему физические тела, обладающие массой, действуют друг на друга на любых расстояниях?
- Почему заряженные тела взаимодействуют даже через электрически нейтральную среду?

Долгое время ответ на эти вопросы давала *концепция дальнего действия*, основоположником которой был Рене Декарт.

Согласно этой концепции взаимодействие между телами может осуществляться непосредственно через пустое пространство, которое не принимает

участия в передаче взаимодействия, и передача взаимодействия происходит мгновенно [7].

Экспериментальные исследования электромагнитных явлений показали несоответствие этой концепции физическому опыту.

Кроме того, эта концепция противоречит постулатам СТО, в соответствии с которыми скорость передачи взаимодействия не может превышать скорости света в вакууме (300 000 км/с).

Впоследствии было доказано, что взаимодействие электрически заряженных тел не мгновенно, и что перемещение заряженной частицы приводит к изменению сил, действующих на другие частицы спустя конечное время. Взаимодействие заряженных частиц осуществляется через электромагнитное поле. Это привело к созданию *концепции близкодействия*, сущность которой заключается в том, что взаимодействие между телами осуществляется посредством тех или иных полей, непрерывно распределенных в пространстве [7]. На разработку данной концепции существенное влияние оказали труды Фарадея, Максвелла, Эйнштейна и многих других ученых, но основателем ее, безусловно, считается И. Ньютон.

Теория электромагнитного поля Максвелла

Теория электромагнитного поля Максвелла была первой теорией поля. Построенная на базе теории Фарадея об электромагнитном поле, теория Максвелла рассматривает только электрические и магнитные поля, объясняя многие электромагнитные явления.

Из закона Фарадея следует, что любое изменение сцепленного с контуром магнитного потока приведет к появлению электродвижущей силы (ЭДС) индукции, то есть, появляется индукционный ток. Следовательно, ЭДС электромагнитной индукции возможна в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле. Но ЭДС в цепи возникает только тогда, когда на носитель тока действуют сторонние силы (силы не электростатического происхождения). Опыт показывает, что эти сторонние силы не связаны ни с тепловыми, ни с хи-

мическими процессами в данном контуре; их так же нельзя объяснить силами Лоренца, т.к. они не действуют на неподвижный заряд [7].

Максвелл высказал гипотезу, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в пространстве электрическое поле, которое и становится причиной появления индукционного тока в контуре. Таким образом, по Максвеллу, контур, в котором появляется ЭДС, является лишь своего рода «прибором», обнаруживающим электрическое поле.

То есть, электрическое поле, возбуждаемое магнитным полем, является вихревым, как и само магнитное поле.

Согласно теории Максвелла, если всякое переменное магнитное поле возбуждает в пространстве вихревое электрическое поле, то должно существовать и обратное явление: любое изменение электрического поля должно вызывать появление вихревого магнитного поля.

Для установления количественных взаимосвязей между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем, Максвелл ввел новую характеристику: ток смещения, обладающий способностью создавать в окружающем пространстве магнитное поле.

Ток смещения в вакууме не связан с движением зарядов, а обусловлен только изменениями электрического поля во времени и вместе с тем возбуждает магнитное поле – в этом принципиально новое утверждение Максвелла.

Из уравнений Максвелла следует, что в качестве источников электрического поля могут выступать либо электрические заряды, либо изменяющиеся во времени магнитные поля. Магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися электрическими зарядами, либо переменными электрическими полями.

Уравнения Максвелла являются наиболее общими уравнениями для электрических и магнитных полей и в электродинамике играют такую же роль, что и законы Ньютона в классической механике.

Теория Максвелла не только объяснила уже известные факты, но и предсказала новые явления: существование электромагнитных волн – переменного

электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью.

Теоретические исследования свойств электромагнитных волн привели Максвелла к созданию *электромагнитной теории света*, в соответствии с которой свет представляет собой электромагнитные волны.

Электромагнитные волны обнаружены впервые Г. Герцем, доказавшим, что законы их возбуждения и распространения полностью описаны Максвеллом.

Вопросы для самоконтроля:

1. Чем обусловлено появление проблемы «эфира»? Как решалась эта проблема?
2. Почему первой стала концепция дальнего действия? Что она подразумевает? В чем ее ошибочность?
3. Какие этапы можно выделить в формировании электромагнитной концепции?
4. Дайте определение понятию «поле». Какие бывают поля?
5. Сформулируйте концепцию ближнего действия. Какой вклад в развитие этой концепции внесли указанные в тексте ученые?
6. Охарактеризуйте электромагнитную теорию Максвелла. Почему считается, что уравнения Максвелла сыграли такую же роль в электродинамике, что и уравнения Ньютона – в классической механике?

6. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. СВЕТ

Волновое движение – одно из основных в физике. Мир полон волн: электромагнитные волны (в частности, свет), звуковые волны, гравитационные волны, сейсмические волны этот список можно продолжать до бесконечности.

Волновые процессы, описанные математически, применимы для многих систем.

Для любого типа волн характерны одни и те же свойства: все волны обладают импульсом, длиной волны, частотой, амплитудой колебаний и т.д. Для волн, среди множества характеристик, выделяются главные: энергия, импульс, скорость.

Волновые свойства света и микрообъектов лежат в основе квантовой механики, а вместе с ней – в основе современной картины мира.

Так как колебательные движения имеют разную природу, но характеризуются общими чертами и закономерностями, то их принято классифицировать по другим признакам: способу возбуждения, зависимости переменных от времени и т.п.

По способу возбуждения: собственные, вынужденные, авто-, параметрические колебания.

По кинематическому признаку: периодические, непериодические колебания.

Важную роль среди периодических колебаний играют гармонические колебания.

Самым простым примером гармонических колебаний являются колебания тела, прикрепленного к пружине.

Если тело, прикрепленное к пружине (рис. 6.1), привести в движение, т.е. сместить из состояния равновесия на какое-то расстояние и отпустить, то на тело со стороны пружины будет действовать возвращающая сила, направленная противоположно смещению.

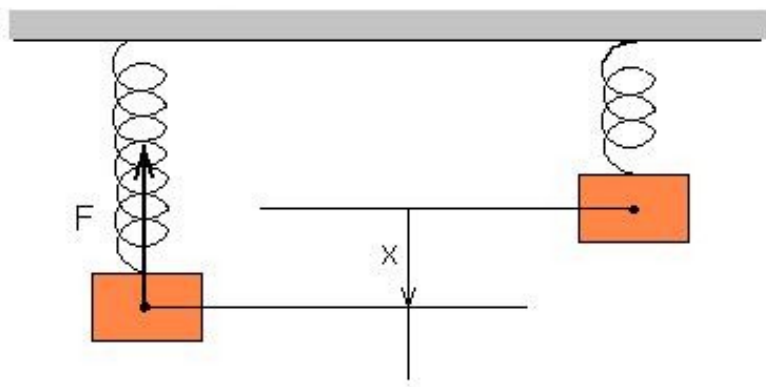


Рис. 6.1

Смещение тела из состояния равновесия

Согласно II закону Ньютона

$$F = ma = -kx$$

и ускорение будет: $a = (-kx)/m$

Это выражение представляет собой основной закон простого гармонического колебания [6].

При малой амплитуде колебания простым гармоническим движением можно считать любой колебательный процесс. Примерами таких процессов являются:

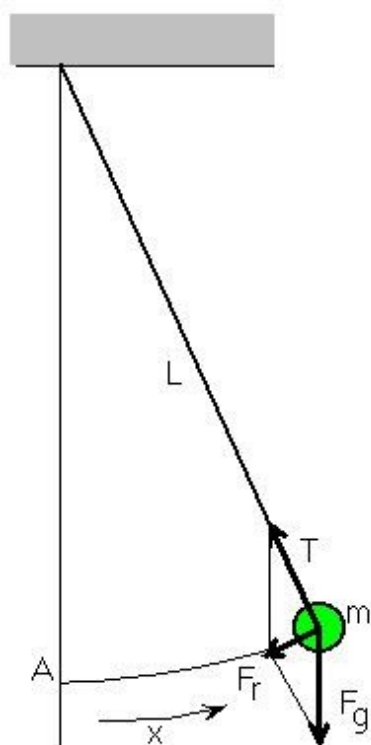


Рис. 6.2

Математический маятник

Математический маятник (рис. 6.2) – любой физический маятник, состоящий из точечной массы, подвешенной на невесомой, нерастяжимой нити. Длина его вычисляется от точки подвеса до точки касания [6].

Цепочка, состоящая из катушки индуктивности L и конденсатора C , где в качестве угла отклонения маятника выступает величина заряда на конденсаторе, а возвращающая сила равна силе отталкивания между электронами, препятствующей их скапливанию на одной обкладке конденсатора.

Для **периодов колебания** маятника и пружины справедливы следующие выражения:

$$T_M = 2\pi (L/g)^{1/2} - \text{период колебаний маятника}$$

$$T_\Pi = 2\pi (m/k)^{1/2} - \text{период колебаний пружины}$$

При гармонических колебаниях переменная, которая описывает систему, меняется по закону [6]:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

где A – амплитуда колебаний;

$[\omega t + \varphi_0]$ – фаза колебаний;

при $t = 0$: $[\varphi_0]$ – начальная фаза;

ω – угловая частота колебаний.

Все вышеизложенное относится к колебательному движению одного тела (частицы). Если таковых несколько и они взаимосвязаны, то в результате их взаимного влияния при движении образуется волновое движение.

Если возмущения среды при движении каждой из частиц невелики, то волновое движение подчиняется принципу суперпозиции.

Принцип суперпозиции

Результирующий эффект от наложения нескольких независимых величин есть сумма эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности [7].

Звуковые колебания

При нормальных условиях звуковые волны распространяются в воздухе со скоростью 330 м/с. Ухо человека способно воспринимать только ту часть звуковых колебаний, которая, попадая на барабанную перепонку, вызывает ответную нервную реакцию.

Попытки определить скорость звука относятся к XVII в. Этими вопросами занимались Бэкон, Мерсенн ($V_{зв} = 370$ м/с), Эйлер, Лаплас, Гассенди, Ньютон ($V_{зв} = 350$ м/с) и многие другие ученые. В формулу для определения скорости звука вводились различные поправки, одна из которых привела к определению строения молекул инертных газов. Сущность этой поправки заключалась в том, что скорость звука по формуле Ньютона должна быть умножена на коэффициент k :

$$k = (C_p / C_v)^{1/2}$$

где C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении,

C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Значение скорости звука в воздухе, исходя из этой поправки, составляло 345,55 м/с.

С помощью указанной поправки, измеряя скорость звука в газе, можно определить отношение C_p/C_v и установить, из какого количества атомов состоит молекула газа.

Волны могут отражаться, преломляться, им свойственны такие явления как дифракция, интерференция, поляризация (для поперечных волн).

Эти свойства волновых колебаний мы рассмотрим чуть позже, когда будем говорить о свете.

Эффект Доплера

В середине XIX века австрийский физик К. Доплер обнаружил, что частота волнового импульса зависит от движения источника волн относительно наблюдателя. Этот эффект был назван его именем. Самыми простыми примерами эффекта Доплера являются:

- звук свистка проходящего мимо платформы поезда меняется для неподвижного наблюдателя;
- возбуждение волн в воде. Если в неподвижную воду равномерно периодически погружать палец (руку), так, чтобы на поверхности образовались волны, и перемещать источник возмущения в одном направлении, то в этом направлении волны будут сгущаться, а с противоположной стороны – станут более разреженными.

С точки зрения колебаний этот процесс описывается следующим образом: в направлении движения длина волны λ будет меньше некоторой средней длины волны $\lambda_{\text{ср}}$, в противоположном направлении λ больше $\lambda_{\text{ср}}$.

Рассмотрим этот процесс подробнее на примере из [6]. Пусть источник возмущения (В) движется к наблюдателю (А) с постоянной скоростью v (рис. 6.3), причем в данной системе отсчета звуковые волны имеют определенную частоту, такую, что за время t источник испустит t волн. В промежутке времени от 0 до t , волна, испущенная в начальный момент времени $t = 0$, пройдет рас-

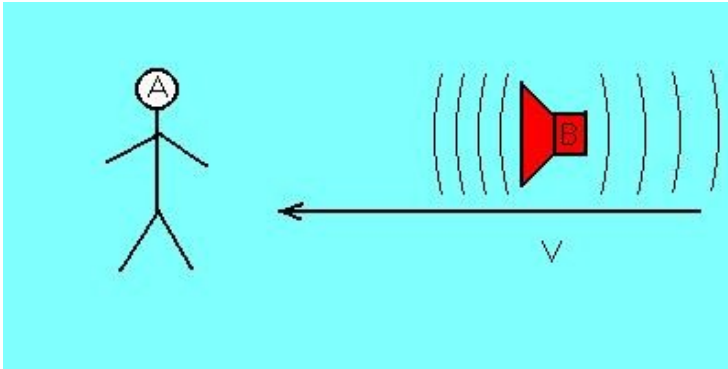


Рис. 6.3
Эффект Доплера

стояние ut (u – скорость волны в среде). К моменту испускания последней волны источник пройдет расстояние ut , причем все волны займут в пространстве область длиной $(ut - vt)$. С точки зрения наблюдателя их длина будет равна:

$$\lambda = (ut - vt) / vt = (u - v) / v$$

Частота звука, слышимого наблюдателем, будет равна:

$$\nu = u / \lambda = u / ((u - v) / v) = v / (1 - (v/u))$$

Когда источник движется к наблюдателю, частота звука увеличивается.

При удалении источника от наблюдателя меняется знак u , и частота уменьшается.

Эффект Доплера справедлив для всех типов волн: звуковых – в воздухе или газах, волн на воде, света, упругих волн в твердом теле.

Свет. Законы распространения света

Установление природы света развивалось по двум, казалось бы, взаимоисключающим направлениям. **Корпускулярная теория света** была предложена Ньютоном и в течение ста лет главенствовала в этой области физики. Современник Ньютона Х. Гюйгенс предложил **волновую теорию света**, которая рассматривала свет как упругую волну, распространяющуюся в мировом «эфире». Волновая теория Гюйгенса пребывала в забвении до начала XIX в., пока работы Френеля и Фуко на основе волновых представлений не объяснили все известные оптические явления (прил. 3). И теперь почти на сто лет забыли о корпускулярной теории. В начале XX в. было доказано, что свет имеет сложную природу и представляет собой единство противоположных свойств – корпускулярных и волновых. Длительный путь развития оптики привел к современным представлениям о **корпускулярно-волновом дуализме** света.

Итак, *свет* – это электромагнитное излучение. Свет, с помощью которого мы видим, составляет лишь небольшую часть широкого спектра явлений одной природы, причем разные части этого спектра характеризуются разными значениями определенной физической величины, называемой длиной волны. По мере того, как эта величина проходит свои значения в пределах видимого света, цвет световых лучей меняется от красного до фиолетового.

Систематизацию спектра от длинных волн к коротким Р. Фейнман [12] предлагает начинать с так называемых радиоволн.

В радиовещании используются волны длиной от 500 м, далее идут так называемые короткие волны, радиолокационные, миллиметровые и т.д. Между указанными диапазонами нет четких границ, они не созданы природой, поэтому численные характеристики и названия диапазонов условны. После миллиметрового диапазона следуют инфракрасные волны, затем спектр видимого света и ультрафиолетовое излучение. За ультрафиолетовым диапазоном следует рентгеновское излучение, граница между двумя последними находится в пределах 10^{-8} м.

Рентгеновское излучение включает область мягких рентгеновских лучей, обычное рентгеновское излучение, жесткое излучение, далее следует гамма (γ) - излучение, и так далее, с уменьшением длины волны λ , м. Длины волн, характерные для различных типов излучения представлены в таблице 6.1 [7].

Таблица 6.1

Шкала электромагнитных волн

10^4	10^{-3}	$8 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	10^{-11}	10^{-13}
Радиоволны		Инфра- красные	Видимые	Ультрафи- олетовые	Рентге- новские лучи	Гамма-лучи
		Оптический диапазон				

А теперь вернемся к свету, который с рождения знаком каждому из нас и изучается с незапамятных времен. Первая проблема изучения света заключалась в определении механизма его видения. Теорий при решении этого вопроса

было множество, но они свелись к одной: существует нечто, попадающее в глаз при отражении от предметов. «Эта идея столь легка и понятна, и столь привычна, что трудно представить, что были другие, предложенные весьма умными людьми, например: нечто выходит из глаза и чувствует окружающие предметы» (Р. Фейнман).

Позднее было обнаружено, что свет распространяется из одной точки в другую по прямой линии, если ему ничто не препятствует, и лучи не взаимодействуют друг с другом. То есть, свет распространяется в любом замкнутом объеме во всех направлениях, но луч, перпендикулярный направлению нашего взгляда, не воздействует на лучи, идущие к нам от какого-либо предмета. Этот аргумент Гюйгенс использовал против корпускулярной теории.

До сих пор мы говорили о световом луче, который распространяется по прямой линии между двумя точками. Что происходит со светом, который наталкивается на препятствие? Удобнее всего в качестве такого препятствия

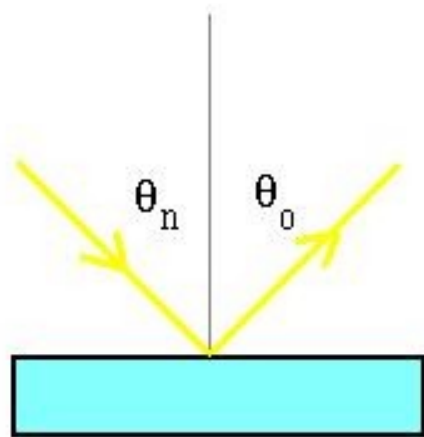


Рис. 6.4
Отражение света

рассматривать зеркало. Попадая на зеркало, луч света не проходит через него, а отражается и снова идет по прямой линии, причем направление прямой зависит от наклона зеркала. Еще в древности людей занимал вопрос о соотношении между этими углами. Решением этого вопроса стал **закон отражения света**, который гласит: угол падения светового луча θ_n равен углу отражения θ_o , относительно нормали, проведенной к поверхности зеркала в точку падения – рис. 6.4.

Но если луч света не отражается от препятствия, а переходит из одной среды в другую, возникает более сложный закон – свет движется не по прямой (рис. 6.5).

Пусть мы имеем две среды, через которые проходит свет: вода и воздух. Относительно направления луча в воздухе направление луча в воде имеет некоторый угол отклонения. Когда луч падает почти вертикально, угол отклонения невелик; если же луч направить под большим углом, отклонение становится значительным. Каково соотношение между углами? С древних времен этот вопрос ставил людей в тупик, но решение так и не было найдено. Тем не менее, в древнегреческой физике по этому вопросу можно найти редкую сводку экспериментальных данных.

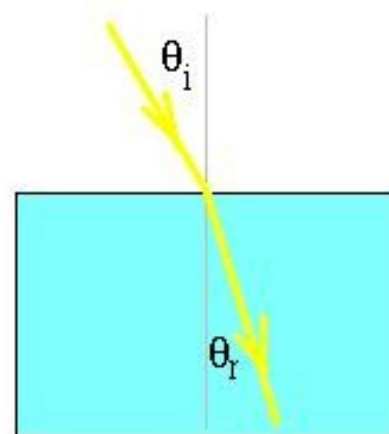


Рис. 6.5
Преломление света

Клавдий Птолемей во II в. нашей эры составил таблицу углов отклонения света в воде для ряда углов падения из воздуха. Это был важный шаг становления физического закона – наблюдаемый эффект, для изучения и объяснения которого проводились и систематизировались измерения. На основе полученных данных была предпринята попытка вывести закон сопоставления величин. Но успехом она не увенчалась.

Закон преломления света был открыт только в начале XVII в. голландским математиком Снеллом (Снеллиусом) и назван его именем. Закон Снелла устанавливает, что синус угла падения светового луча θ_i (в воздухе) пропорционален синусу угла преломления θ_r (в воде). Коэффициентом пропорциональности является некоторая константа n , характеризующая свойства среды, в которой происходит преломление.

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r$$

Если мы будем сравнивать значения углов преломления света, полученные с помощью закона Снелла с данными, экспериментальным путем полученными Птолемеем, то увидим, что они поразительно близки. Эти данные представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Преломление света в воде

Угол в воздухе θ_i , град.	Угол в воде θ_r , град. (по Птолемею)	Угол в воде θ_r , град. (по закону Снелла)
10	8.0	7.5
20	15.5	15.0
30	22.5	22.0
40	28.0	29.0
50	35.0	35.0
60	40.5	40.0
70	45.0	48.0
80	50.0	49.5

Закон Снелла позволяет предсказать отклонение света при переходе света из воздуха в воду (для воды $n = 1.33$).

Интерференция света

Интерференцией света называется пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн; это частный случай общего явления интерференции волн. То есть, **явление интерференции** заключается в том, что при взаимном наложении двух волн может происходить усиление или ослабление колебаний [7]. Объяснение интерференции, как волнового явления, дано в начале XIX в. французским физиком О. Френелем и английским ученым Т. Юнгом. Интерференция характеризуется образованием стационарной интерференционной картины – регулярного чередования областей повышенной и пониженной интенсивности света.

Простую интерференционную картину можно наблюдать в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плоско-выпуклой линзой в большом радиусом кривизны. Картинка имеет вид концентрических колец, получивших название колец Ньютона.

Дифракция света

Дифракция света, в узком смысле – огибание световым лучом непрозрачных тел, проникновение света в область геометрической тени; в широком смысле – отклонение от законов геометрической оптики.

В естественных условиях дифракция обычно наблюдается в виде нерезкой, размытой границы тени предмета, освещаемого удаленным источником.

Исследование дифракции наиболее широко представлено в работах Френеля, который построил количественную теорию дифракции, позволяющую, в принципе, рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Френель первым объяснил прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории. Сущность теории Френеля, объединившей принцип Гюйгенса с интерференцией вторичных волн, заключается в следующем: волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции (принцип Гюйгенса—Френеля).

Поляризация света

Поляризация света – это явление, описывающее поперечную анизотропию световых волн, то есть неэквивалентность различных направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

Сущность поляризации можно проиллюстрировать простым опытом. При пропускании света через два расположенных на одной прямой прозрачных кристалла его интенсивность зависит от взаимной ориентации кристаллов. Если кристаллы ориентированы одинаково, то свет через них проходит без ослабления. Но стоит только повернуть один из кристаллов на угол в 90° , как свет гасится (перестает проходить через кристалл).

Дисперсия света

Дисперсия света – разложение в спектр пучка белого света при прохождении его сквозь призму. Честь «первоисследования» этого явления принад-

лежит И. Ньютону, хотя само явление дисперсии ученые, да и простые смертные, наблюдали задолго до него.

Опыт Ньютона был гениально прост. Он направил на призму световой пучок малого поперечного сечения. Проходя в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне, этот пучок света падал на стеклянную призму, преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал спектром.

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв отверстие синим стеклом, он наблюдал синее пятно и т.д. Отсюда следовало, что призма не окрашивает белый свет, как предполагалось раньше, а лишь разлагает его на составные части.

Квантовые свойства света

Квантовые свойства света находят свое подтверждение в явлении фотоэффекта и в эффекте Комптона.

В конце XIX века Г. Герц обнаружил явление, названное фотоэлектрическим эффектом. Освещение цинковой пластины, соединенной со стрелом электрометра приводит к разрядке последнего, если пластина заряжена отрицательно. При положительном заряде пластины разрядки не происходит.

Опыт доказывает, что с пластины под действием света вырываются отрицательные заряды. Измерение заряда и массы вырываемых частиц показало, что это электроны. Явление испускания электронов под действием электромагнитного излучения называется фотоэффектом.

Количественные закономерности фотоэффекта [7] установлены Столетовым:

- Сила тока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения, падающего на пластину.

- Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности излучения.
- Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты, то фотоэффект не наблюдается (красная граница фотоэффекта).

На основании электромагнитной теории фотоэффект объяснить не удалось. Объяснение этого явления стало возможным только на основании квантовых представлений (Эйнштейн, 1905 г. – квантовая теория света).

Наиболее полно квантовые свойства света проявляются в эффекте Комптона или комптоновском рассеянии, сущность которого заключается в следующем: если монохроматическое рентгеновское излучение подвергнуть рассеянию веществом с легкими атомами, то в составе рассеянного излучения наряду с излучением, характеризующимся первоначальной длиной волны, наблюдается излучение с более длинной волной.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите примеры волновых движений.
2. Как классифицируют колебательные движения?
3. Сформулируйте закон простого гармонического колебания. Приведите примеры простых гармонических движений.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции. Приведите примеры, характеризующие этот принцип.
5. В чем заключается эффект Доплера? Где он используется?
6. Сформулируйте законы распространения света.
7. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм света?
8. Перечислите явления, характеризующие корпускулярные и волновые свойства света. Приведите примеры.

7. СТРОЕНИЕ АТОМА

История вопроса

В конце XIX в. большинство ученых склонялось к мнению, что физическая картина мира в основном построена и останется в дальнейшем неизменной.

Но «каскад» научных открытий, совершенных в последние годы XIX в. и в первые десятилетия XX в. существенно изменил эту точку зрения.

А началось все с того, что в 1896 г. французский физик Антуан Беккерель открыл явление самопроизвольного излучения урановой соли. На основании известных фактов это явление объяснить не удалось, но это не остановило исследователей.

В 1898 г. супруги Кюри открывают новые элементы, обладающие, подобно урану, способностью испускать «беккерелевы лучи» – полоний и радий. Это свойство было названо ими *радиоактивностью*, и с 1898 г. начинается эпоха открытия радиоактивных элементов.

Годом раньше, в 1897 г., английский ученый Дж. Томсон открыл первую элементарную частицу – *электрон*. На основании проведенных опытов Томсон делает вывод о том, что число электронов в атоме имеет порядок величины заряда химического элемента. Но так как к этому времени было известно, что атом в целом электрически нейтрален в нормальном состоянии, то в каждом атоме должно наблюдаться равенство разноименно заряженных частиц.

Модель атома Томсона

И в 1902 г. Кельвин предлагает модель атома, согласно которой положительный заряд распределен в достаточно большой (возможно – сферической) области, а электроны вкраплены в него, как «изюм в пудинг». Дж. Томсон развивает эту идею, исследуя на устойчивость различные конфигурации электронов, пытается объяснить периодическую таблицу элементов.

Модель Томсона, над которой он работал около 15 лет, основанная на законах электричества, не устояла перед опытной проверкой и критикой. В частности, модель Томсона не объясняла испускания альфа – частиц радиоактивными веществами.

Модель атома Резерфорда

Для проверки гипотезы Томсона и более точного определения строения атома Э. Резерфорд проводит серию опытов по рассеянию альфа-частиц тонкими металлическими пластинками [10].

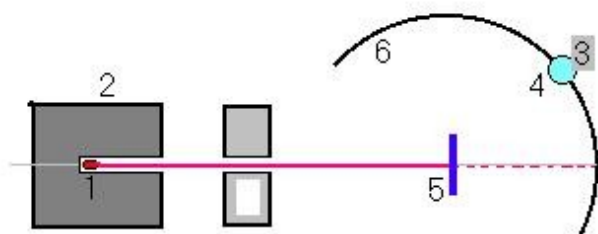


Рис 7.1
Опыт Резерфорда

Суть опыта (рис.7.1) заключалась в следующем. Источник альфа-излучения (1) помещали в свинцовый куб (2) с просверленным в нем каналом. Таким образом, удавалось получить поток альфа-частиц, летящих в

определенном направлении. Попадая на экран (3), альфа-частицы вызывали его свечение, т.к. экран был покрыт сульфидом цинка ZnS. В лупу (4) можно было увидеть и подсчитать отдельные вспышки, возникающие в результате попадания каждой альфа-частицы на экран.

Между источником излучения и экраном помещали тонкую металлическую фольгу (5). По вспышкам на экране можно было судить об отклонении альфа – частиц от первоначального направления при прохождении через слой металла, то есть, об их рассеянии.

Оказалось, что большинство альфа-частиц проходит через фольгу без отклонения, хотя толщина металла соответствовала 100 тыс. атомных радиусов. Но некоторая доля альфа-частиц отклонялась на небольшие углы, причем изредка альфа-частицы резко сменяли направление движения и даже отбрасыва-

лись назад, как бы натолкнувшись на значительное препятствие. Такое отклонение альфа-частиц фиксировалось при перемещении экрана по дуге (6).

Анализируя полученные результаты, Резерфорд пришел к выводу, что большая часть пространства, занимаемая атомом металла, не содержит тяжелых частиц – там находятся только электроны. Это объясняется тем, что масса электрона в 7500 раз меньше массы альфа-частицы, и столкновение последней с электроном не может повлиять на направление ее движения.

Резкое отклонение альфа-частиц от первоначальной траектории было объяснено существованием в атоме ядра, сосредоточившего в себе преобладающая часть массы. Причем ядро это занимает очень малый объем, так как отклонения альфа-частиц были весьма редкими, и должно иметь положительный заряд, который и приводит к отталкиванию одноименно (положительно) заряженных альфа-частиц.

Исходя из вышеперечисленных соображений, Резерфорд в 1911 г. предлагает модель атома, согласно которой атом состоит из маленького положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена основная масса, и вращающихся вокруг ядра электронов. Положительный заряд ядра нейтрализуется суммой отрицательных зарядов электронов, поэтому в целом атом электронейтрален. Эта модель получила название *«планетарной модели атома»*.

Возникающая вследствие вращения электронов центробежная сила уравновешивается силой электростатического притяжения электронов к противоположно заряженному ядру.

Чем больше заряд ядра, тем сильнее будет отклонение альфа-частиц, следовательно, опыты Резерфорда позволили не только обнаружить наличие атомного ядра, но и определить его заряд. Из опытов Резерфорда следовало, что заряд ядра, выраженный в единицах заряда электрона, численно равен порядковому номеру элемента в периодической системе.

Опыты Резерфорда и его ассистента Г. Мозли позволили установить физический смысл порядкового номера элемента. *Закон Мозли* связал заряд ядра атома с его порядковым номером. *Порядковый номер элемента* – важная

константа элемента, выражающая положительный заряд ядра его атома. А так как атом электронейтрален, то число вращающихся вокруг ядра электронов также равно порядковому номеру элемента.

Ядерная модель Резерфорда была важным шагом на пути познания строения атома. **Основные черты** этой модели: положительно заряженное ядро, имеющее большую массу, и окруженное электронами – выдержали испытание временем и подтверждены колоссальным количеством экспериментов. Но эта модель имела ряд существенных недостатков.

Во-первых, теория Резерфорда не объясняла устойчивость атома. Электрон, вращающийся вокруг ядра, должен испускать электромагнитную энергию, подобно колеблющемуся электрическому заряду. Но такое излучение, в конечном счете, должно привести к нарушению равновесия между центробежной силой, связанной с вращением электрона, и силой электростатического притяжения электрона к ядру. Для восстановления равновесия электрон должен переместиться ближе к ядру, и, продолжая излучать энергию, продолжать такое перемещение до тех пор, пока не произойдет «падение» электрона на ядро. В этом случае атом должен прекратить свое существование. Такое положение дел противоречит реальным свойствам атомов, так как последние представляют собой устойчивые образования и могут существовать достаточно долго.

Во-вторых, модель Резерфорда приводила к неверным выводам о характере атомных спектров. Электрон, вращающийся вокруг ядра, должен, по теории Резерфорда, приближаться к ядру, непрерывно меняя скорость своего движения. Частота испускаемого им излучения определяется частотой вращения, следовательно, должна непрерывно меняться. Это означает, что спектр излучения атома должен быть непрерывным (сплошным), что не соответствовало действительности, так как полученные к тому времени атомные спектры были линейчатыми.

Модель атома Бора

Следующий существенный шаг в развитии представлений о строении атома был предпринят Н. Бором. В 1913 г. Бор предложил теорию, объединяющую ядерную модель атома Резерфорда с квантовой теорией света, в основе которой лежит уравнение Планка.

В 1900 г. при построении теории равновесного излучения немецкий физик М. Планк показал, что способность нагретого тела к излучению можно количественно правильно описать, только предположив, что лучистая энергия испускается и поглощается телами не непрерывно, а дискретно, отдельными порциями (квантами). При этом энергия E каждой порции связана с частотой излучения ν соотношением, получившим название уравнения Планка

$$E = h\nu$$

где h – постоянная Планка, универсальная константа.

Итак, Н. Бор, основываясь на положениях квантовой теории о дискретной природе излучения и на линейчатом характере атомных спектров, сделал вывод, что энергия электронов в атоме не может меняться непрерывно, а изменяется скачками, то есть – дискретно. Поэтому в атоме возможны не любые, а лишь определенные («разрешенные») состояния. Основные положения своей теории Бор сформулировал в виде **постулатов** – утверждений, принимаемых без доказательства:

- Электрон может вращаться вокруг ядра не по любым, а только по некоторым определенным круговым орбитам. Эти орбиты называются стационарными (условие стационарности: $mvr = h\nu$)
- Двигаясь по стационарной орбите, электрон не излучает электромагнитной энергии.
- Излучение происходит при скачкообразном переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую. При этом испускается или поглощается квант электромагнитного излучения, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях.

Что это значит?

Энергия электрона, вращающегося вокруг ядра, зависит от радиуса орбиты. Минимальной энергией электрон обладает, находясь на ближайшей к ядру орбите (так называемое нормальное состояние атома). Чтобы перевести электрон на более удаленную орбиту, нужно преодолеть притяжение к «положительному» ядру, что требует затрат энергии. Этот процесс может быть осуществлен при поглощении кванта света. Энергия атома при этом увеличится, и он перейдет в возбужденное состояние.

Обратный переход электрона приведет к уменьшению энергии атома, так как при подобном переходе должен выделяться квант излучения. Если обозначить через E_n начальную энергию электрона, находящегося на более удаленной орбите, через E_k – энергию для более близкой к ядру орбиты, то

$$E = E_k - E_n$$

будет соответствовать энергии кванта, излучаемого при перескоке электрона с орбиты на орбиту. С учетом уравнения Планка получим выражение:

$$\nu = (E_n - E_k)/h,$$

позволяющее вычислить возможные частоты (или длины волн) излучения, испускаемого или поглощаемого атомом, то есть, рассчитать его спектр.

Теория Бора не только объясняла физическую природу атомных спектров, как результата перехода электронов одних стационарных орбит на другие, но и впервые позволила рассчитывать спектры. Расчет простейшего атома водорода дал блестящее совпадение вычисленных спектральных линий с их действительным местоположением в спектре.

Но, наряду с явными успехами, теория Бора не отвечала на ряд вопросов, самый важный из которых: где находится электрон в процессе перехода с одной орбиты на другую? С одной стороны, согласно концепции близкодействия, такой переход не может осуществляться мгновенно, с другой – промежуточное положение электрона между орбитами в момент перехода запрещается постулатом, согласно которому электрон может находиться только на стационарной орбите.

Следующая проблема возникла при попытке построения количественной теории спектра для следующего за водородом атома гелия и более сложных атомов. Теория Бора позволила сделать только качественные заключения о спектрах, хотя от этого своей значимости не лишилась.

Таким образом, теория Бора показала, что нельзя автоматически распространять законы природы, справедливые для большинства объектов макромира – на объекты микромира.

Корпускулярно – волновой дуализм микрообъектов

Возникла задача разработки новой физической теории, пригодной для описания свойств и поведения микрочастиц. Эта задача была успешно решена в 20-е годы нашего века в результате создания новой отрасли теоретической физики – *квантовой механики*, которую часто именуют *неклассической физикой*.

Становление квантовой механики произошло на пути обобщения представлений о *корпускулярно-волновом дуализме фотона* на все объекты микромира, и, в первую очередь, на электрон.

Корпускулярные свойства фотона выражаются уравнением Планка

$$E = h\nu$$

Волновые свойства фотона находят свое отражение в выражении

$$\lambda\nu = c$$

Использование в этом выражении понятия о длине волны и предполагает, что фотон обладает волновыми свойствами. Если мы объединим эти два уравнения, выразив из второго частоту, то получим:

$$E = hc/\lambda$$

Но мы также знаем, что, согласно уравнению Эйнштейна,

$$E = mc^2$$

Следовательно:

$$\lambda = h/(mc)$$

Из классической механики известно, что произведение массы на скорость называется количеством движения тела или его импульсом. Тогда последнее выражение можно переписать в новом виде:

$$\lambda = h/p$$

Обратите внимание на то, что последнее уравнение выведено на основании того, что фотону присущи как корпускулярные, так и волновые свойства.

В 1924 г. французский физик Луи де Бройль предположил, что корпускулярно-волновой дуализм присущ не только фотонам, но и электронам. Из этого предположения следует, что электрон должен проявлять волновые свойства, и, следовательно, для электрона с массой m и скоростью v можно записать:

$$\lambda_e = h/(m_e v_e)$$

Это уравнение обычно называют *уравнением волны де Бройля*. Гипотеза де Бройля о наличии у электрона волновых свойств была подтверждена независимыми экспериментами Девиссона и Джермера в США, Дж.Томсона – в Англии, Тарковского – в СССР.

Подтвердилось также, что уравнение волны де Бройля справедливо не только для электронов, но и для любых микрообъектов.

Следовательно, волновыми свойствами должны обладать и макротела, поскольку все они состоят из микрочастиц. Почему же не проявляются волновые свойства окружающих нас тел? Дело в том, что движущимся телам большой массы соответствует очень маленькая длина волны. И если задаться целью определить длину волны для макроскопического тела, то окажется, что данные измерения лежат вне пределов наших возможностей.

Для доказательства этого утверждения Н.Л. Глинка приводит следующий пример [10]. Для пылинки массой 0,01 мг, движущейся со скоростью $1 \cdot 10^{-2}$ м/с, длина волны будет порядка 10^{-23} м. А такая величина пока измерениям не поддается (см. табл. 2.1). Поэтому считается, что макрообъекты проявляют только корпускулярные свойства.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга

А теперь вспомним классическую механику. Если материальная точка движется по определенной траектории, то в любой момент времени, зная ее массу и скорость, мы можем для этой точки определить координату и импульс.

Так как микрочастицы, помимо корпускулярных, обладают еще и волновыми свойствами, возникает необходимость введения некоторых ограничений в применении к микрообъектам понятий и законов классической механики.

Такое ограничение было сформулировано в 1927 г. немецким физиком Гейзенбергом:

«Если вы изучаете какое-то тело, и вы в состоянии определить p -компоненту импульса тела с неопределенностью Δp , то вы не можете одновременно определить координату X тела с точностью, большей, чем $\Delta x = h/\Delta p$ » [12].

В современном изложении соотношение неопределенностей Гейзенберга звучит так:

«Микрочастица не может иметь одновременно координату X и определенный импульс P , причем неопределенности этих величин удовлетворяют условию $\Delta x * \Delta p \geq h$, то есть произведение неопределенностей координаты и импульса не может быть меньше постоянной Планка» [7].

Соотношение неопределенностей неоднократно являлось предметом философских дискуссий, суть которых сводилась к идеалистическому его толкованию: соотношение неопределенностей Гейзенберга устанавливает, с одной стороны, границу познаваемости мира; с другой стороны – существование микрообъектов вне пространства и времени.

На самом же деле соотношение неопределенностей Гейзенберга только указывает, насколько применимы понятия классической механики к микромиру. Вероятностное поведение микрообъектов приводит к выводу, что **случайность и неопределенность** – фундаментальные свойства природы, присущие каждому ее объекту.

Принцип дополнительности

В том же 1927 г. для описания свойств микрообъектов Н. Бор формулирует принципиальное положение квантовой механики – принцип дополнительности:

«Получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих микрообъект, неизбежно связано с потерей информации о других величинах, дополнительных к первым» [7].

Такими взаимно дополняемыми величинами для микрообъекта можно считать его координату и скорость (импульс), энергию и время.

Так как частицы, изучаемые квантовой механикой и приборы, которые используются для их изучения, относятся к разным уровням организации физической материи – микро- и макроуровню, соответственно, – было установлено, что измерительный прибор влияет на состояние микрообъекта, то есть, невозможны невозмущающие измерения.

Итак, мы рассмотрели гипотезу де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме микрообъектов в совокупности с принципами неопределенности и дополнительности, экспериментальное подтверждение которой явилось одной из предпосылок создания квантовой механики.

Волновая функция Шредингера

Одной из возникших в ходе становления этой отрасли физики проблем была проблема, связанная с пониманием физической природы волн де Бройля, решением которой стал вероятностный подход к описанию микрочастиц.

Исходя из представлений о наличии волновых свойств у электронов, австрийский физик Э. Шредингер в 1925 г. предположил, что состояние движущегося электрона должно описываться известным в физике уравнением стоячей электромагнитной волны. Подставляя в это уравнение вместо длины волны ее значение из уравнения де Бройля, Шредингер получил уравнение, связывающее энергию электрона с пространственными координатами и так называемой вол-

новой функцией Ψ (пси-), соответствующей в этом уравнении амплитуде трехмерного волнового процесса.

$$\Delta\Psi + (\omega^2 / u^2) \Psi = 0 \text{ – волновое уравнение в оптике}$$

$$\Delta\Psi + (8 \pi^2 m / h^2) * (E - V) \Psi = 0 \text{ – уравнение Шредингера}$$

Наиболее важным параметром для характеристики состояния электрона является **волновая функция Ψ** . Подобно амплитуде любого волнового процесса, она может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Но величина $|\Psi|^2$ всегда положительна, причем, чем больше Ψ^2 в данной области пространства, тем выше вероятность обнаружения электрона в данной области пространства.

Более точным будет утверждение: вероятность обнаружения электрона в некотором малом объеме ΔV выражается произведением $|\Psi|^2 \Delta V$. Таким образом, величина $|\Psi|^2$ выражает плотность вероятности нахождения электрона в соответствующей области пространства.

Для того, чтобы легче было понять такое толкование, Н.Л. Глинка [10] проводит аналогию: вероятность связана с плотностью вероятности $|\Psi|^2$ так же, как масса тела m , занимающего объем ΔV , связана с плотностью тела ρ :

$$m = \rho \Delta V$$

То есть:

$$W = |\Psi|^2 \Delta V$$

Современные представления о строении атома

Атомом называется минимальная часть вещества, сохраняющая его свойства.

Центр атома – **ядро**, состоящее из протонов и нейтронов. В ядре сосредоточена большая часть массы атома. Ядро имеет положительный заряд, причем число протонов равно числу электронов, и число протонов определяется порядковым номером элемента в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева (число протонов равно порядковому номеру элемента в таблице).

Протоны – это стабильные элементарные частицы с массой покоя $1,673 \cdot 10^{-27}$ кг, заряженные положительно.

Нейтроны – нейтральные элементарные частицы, с массой несколько большей массы протона ($1,675 \cdot 10^{-27}$ кг). В свободном состоянии нейтроны нестабильны, в ядре (вместе с протонами) – стабильны. Общее название протона и нейтрона – **нуклон**. **Электроны** движутся вокруг ядра, причем общее количество электронов равняется общему количеству протонов.

Современная физика представляет атом как тяжелое ядро с окружающим его электронным облаком сложной структуры. Определить точное местоположение электронов в любой момент времени невозможно из-за двойственности его свойств (корпускулярно-волновой дуализм). Масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, то есть электрон более чем в 1000 раз легче протона и нейтрона.

Опыты и расчеты на основе законов квантовой механики показывают, что в каждом атоме имеется несколько групп электронов, образующих вокруг ядра так называемые электронные оболочки, которые можно представить в виде концентрических сфер. Максимальное число оболочек равно 7. Каждая из них имеет свое буквенное обозначение. По мере удаления от ядра: К, L, M, N, O, P, Q.

В зависимости от того, на какой оболочке находится электрон, судят об энергии, которой он обладает: на ближайшей к ядру К-оболочке энергия электрона минимальна. Размеры электронных оболочек определяют размеры атома в целом.

Если входящий в состав атома электрон переходит с $n+1$ на n уровень, он излучает квант энергии – фотон. Для характеристики этого явления каждой оболочке присваивают так называемое **главное квантовое число**. Оно обозначается « n » и равно целому числу из ряда 1...7.

К = 1, L = 2, M = 3 и т.д.

Главное квантовое число « n » показывает максимально возможное число квантов, которые могут излучаться электроном при последовательном переходе от Q до К орбиты. Таким образом, « n » определяет размеры электронного облака и

запас энергии электронной оболочки. Наиболее устойчивым является такое состояние атома, в котором электроны имеют самую низкую энергию, т.е. находятся в ближайших к ядру орбиталях – в этом заключается сущность **принципа наименьшей энергии**.

Электроны одной и той же оболочки могут двигаться по орбитам разного типа. Поэтому внутри каждой главной оболочки различают электронные под-оболочки. Их число зависит от « n » и равно ему. Каждый тип образующих под-оболочку орбит характеризуется **побочным (орбитальным) квантовым числом « l »**. Как и все квантовые числа, « l » является целым и изменяется в интервале $0 \dots n-1$.

Для электронных подоболочек используются обозначения: s, p, d, f, соответствующие орбитальным квантовым числам 0, 1, 2, 3.

$$n = 1 (l = 0); n = 2 (l = 0; 1); n = 3 (l = 0; 1; 2); n = 4 (l = 0; 1; 2; 3)$$

Электроны, характеризующиеся такими значениями орбитального квантового числа « l » называются **s-электронами, p-электронами, d-электронами, f-электронами**, соответственно.

Если рассматривать форму электронных облаков с точки зрения волновой функции Шредингера, то:

- s-электроны имеют сферическую форму с несколькими максимумами плотности для 1s, 2s, 3s подуровней;
- 2p-электронное облако напоминает гантель;
- 3d-электронное облако ($l = 2$) – четырехлепестковая фигура с чередованием знаков ψ -функции в лепестках.

Ориентация электронного облака в пространстве тоже не может быть произвольной. Она определяется значением **магнитного квантового числа m_l** (в ряде учебников магнитное квантовое число обозначается « m »). m_l – целое число в пределах от $-l$ до $+l$, то есть для различных значений « l » число возможных значений m различно.

$$\text{s-электроны: } n = 1; l = 0; m = 0$$

$$\text{p-электроны: } n = 2; l = 1; m = (-1, 0, 1)$$

То есть, любому значению « l » соответствует $(2l + 1)$ возможных значений магнитного квантового числа m_l .

Итак, состояние электрона в атоме характеризуется определенными значениями квантовых чисел n , l , m . Зная эти числа, можно определить размеры, форму и ориентацию в пространстве электронного облака, то есть атомную **электронную орбиталь**.

Помимо этих квантовых чисел электроны характеризуются еще одной величиной, определяющей его собственное состояние, а не движение вокруг ядра. Эта величина называется **спиновым** (от англ. *spin* – кручение, вращение) **квантовым числом** и обозначается m_s (в ряде учебников это квантовое число обозначено « s »). Спиновое квантовое число может принимать только два значения: $+1/2$ и $-1/2$. Таким образом, возможные значения m_s отличаются друг от друга на 1. Спин можно представить как веретенообразное вращение электрона вокруг своей оси.

Итак, четыре квантовые числа полностью определяют состояние электрона в атоме.

Принцип Паули

Для определения состояния электрона в атоме важное значение имеет **принцип Паули**: «В атоме не может быть двух электронов, у которых все 4 квантовых числа одинаковы»[10].

Из этого следует, что каждая атомная орбиталь, характеризующаяся определенными значениями n , l , m может быть занята только двумя электронами, спины которых имеют противоположное значение. Такие два электрона называются спаренными.

Подсчитаем максимальное число электронов на одном из подуровней:

- При $n = 1$, $l = 0$ (s-подуровень); $m_l = (-l \dots l) = 0$ – то есть имеется одна орбиталь, так называемая «квантовая ячейка». На ней может быть не более двух электронов с противоположными спинами, т.е. максимальное число электронов на s-подуровне равно двум;

- при $n = 1$, $l = 0$ (s-подуровень) или $l = 1$ (p – подуровень); $m_l = (-l \dots l) = -1; 0; 1$, магнитное квантовое число имеет 3 значения, то есть имеется три орбитали, на каждой из которых по 2 электрона (суммарное количество электронов равно 6).

Наиболее устойчивое состояние электрона в атоме соответствует минимальному значению энергии. Любое другое состояние называется возбужденным, т.е. неустойчивым, из него электрон стремится перейти в состояние с более низкой энергией – более устойчивое.

Правило Хунда

Порядок размещения электронов в атоме выражается **правилом Хунда**: «Устойчивому состоянию атома соответствует такое распределение электронов в пределах энергетического подуровня, при котором абсолютное значение суммарного спина атома максимально» [10].

Правила Клечковского

Последовательность заполнения электронных орбиталей в зависимости от значений главного и орбитального квантовых чисел определяется **правилами Клечковского**, установившего, что энергия электрона возрастает по мере увеличения суммы $(n+l)$:

- При увеличении заряда ядра атома последовательное заполнение электронных орбиталей происходит от орбиталей с наименьшим значением суммы $(n+l)$ к орбиталям с большим значением этой суммы.
- При одинаковых значениях суммы $(n+l)$ заполнение орбиталей происходит последовательно в направлении возрастания значения главного квантового числа.

Перечисленные выше правила позволяют установить порядок заполнения электронных орбиталей в многоэлектронных атомах. Об этом будет рассказано в томе IV данного учебного пособия «Концепции современной химии».

Вопросы для самоконтроля:

1. С чем связано изменение представлений об атоме, произошедшее в конце XIX – начале XX в.в.?
2. В чем ошибочность модели атома Томсона?
3. Расскажите о модели атома Резерфорда. Укажите ее достоинства и недостатки.
4. Как Н. Бор «исправил» модель атома Резерфорда? В чем заключаются противоречия модели атома по Бору?
5. Почему квантовую механику называют неклассической физикой?
6. Охарактеризуйте корпускулярно-волновые свойства микрообъектов. Сформулируйте принципы неопределенности и дополнительности и попытайтесь привести к ним примеры.
7. Запишите уравнение волны де Бройля и попытайтесь определить, в чем заключается проблема физической природы волн де Бройля.
8. Каковы современные представления о строении атома? В чем вы видите изменения?

8. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Термин *«элементарные частицы»* первоначально означал первичные, самые простые, не имеющие в себе никаких составных частей, далее ни на что не разложимые частицы, из которых состоит вся материя. Позднее была осознана условность термина «элементарный» применительно к микрообъектам, так как не существует четкого критерия элементарности.

Использование названия «элементарные частицы» имеет исторические причины и связано периодом исследований, когда единственно известными представителями данной группы были протон, нейтрон, электрон и частица электромагнитного поля – фотон. Эти четыре частицы тогда естественно было считать элементарными, так как они служили основой для построения окружающего нас вещества и взаимодействующего с ним электромагнитного поля, а сложная структура протона и нейтрона была неизвестна.

Открытие новых частиц материи постепенно разрушило эту простую картину. Вновь обнаруженные частицы во многих отношениях были близки к первым четырем известным частицам. Их объединяло то, что все они являются специфическими формами существования материи, не ассоциированной в ядра и атомы. Пока количество таких частиц было не велико, сохранялось убеждение, что они играют фундаментальную роль в строении материи. Возрастание числа микрочастиц, выявление у многих из них определенной внутренней структуры показало, что они не обладают свойствами элементарности, но традиционное название за ними сохранилось.

В современной физике термин «элементарные частицы» употребляется не в своем точном значении, а менее строго – для наименования большой группы мельчайших частиц материи, которые не являются атомами или атомными ядрами (исключение составляет протон) [18].

Краткие исторические сведения

Открытие элементарных частиц явилось закономерным результатом в изучении строения вещества, достигнутых физикой в конце 19 века. Оно было

подготовлено всесторонними исследованиями оптических спектров атомов, изучением электрических явлений в жидкостях и газах, открытием фотоэлектричества, рентгеновских лучей, естественной радиоактивности, свидетельствовавших о существовании сложной структуры материи.

Исторически первой открытой элементарной частицей был электрон – носитель отрицательного элементарного электрического заряда в атомах. В 1897 г. английский физик Дж. Томсон установил, что катодные лучи образованы потоком мельчайших частиц, которые были названы электронами (от греч. *electron* – янтарь).

В 1911 г. английский физик Э. Резерфорд, пропуская α -частицы от естественного радиоактивного источника через тонкие фольги различных веществ, выяснил, что положительный заряд в атомах сосредоточен в компактных образованиях – ядрах. В 1919 г. среди частиц, выбитых из атомных ядер, он обнаружил частицы с положительным зарядом и массой, в 1836 раз превышающей массу электрона, названные протонами.

Другая частица, входящая в состав ядра, – нейтрон (от лат. *neutrum* – «ни то ни другое») – была открыта в 1932 Дж. Чедвиком при исследованиях взаимодействия α -частиц с бериллием. Нейтрон имеет массу, близкую к массе протона, но не обладает электрическим зарядом. Открытием нейтрона завершилось выявление частиц, являющихся структурными элементами атомов и их ядер.

Вывод о существовании частицы электромагнитного поля – фотона (от греч. *photos* – свет) – берёт своё начало с работы М. Планка (1900 г.). Предположив, что энергия электромагнитного излучения абсолютно чёрного тела квантована, Планк получил формулу для спектра излучения. В 1905 г. А. Эйнштейн, развивая идею Планка, постулировал, что электромагнитное излучение (свет) в действительности является потоком отдельных квантов (фотонов), и на этой основе объяснил закономерности фотоэффекта. Прямые экспериментальные доказательства существования фотона были даны Р. Милликеном в 1912 г.

Открытие нейтрино – частицы, почти не взаимодействующей с веществом, ведет свое начало от теоретической догадки В. Паули (1930 г.), позво-

лившей за счет предположения о рождении такой частицы устранить трудности с законом сохранения энергии в процессах β -распада радиоактивных ядер. Экспериментально существование нейтрино было подтверждено лишь в 1953 г. американскими учеными Ф. Райнесом и К. Коуэном.

В 30-е гг. XX в. изучение элементарных частиц было тесно связано с исследованием космических лучей. В 1932 г. в их составе К. Андерсен обнаружил первую античастицу – позитрон, имеющую массу электрона и положительный электрический заряд.

С начала 50-х гг. XX в. основным инструментом для исследования элементарных частиц явились ускорители заряженных частиц – установки, создающих интенсивные потоки быстрых протонов и электронов. При столкновении с веществом ускоренные протоны и электроны рожают новые частицы, которые и становятся предметом изучения.

В 1970-80-е гг. поток открытий новых элементарных частиц усилился, и ученые заговорили о семействах элементарных частиц. На данный момент науке известно более 350 элементарных частиц, различающихся рядом физических характеристик [6].

Характеристики элементарных частиц

Каждая элементарная частица описывается набором дискретных значений определенных физических величин, или своими характеристиками. В ряде случаев эти дискретные значения выражаются через целые или дробные числа и некоторый общий множитель – единицу измерения.

Общими характеристиками всех элементарных частиц являются масса, электрический заряд, время жизни и спин. Кроме общих характеристик выделяют ряд специфических – внутренние квантовые числа (лептонный заряд, барионный заряд, странность, очарование, внутренняя четность и др.). Внутренние квантовые числа связаны со специальными типами симметрий, возникающими за счет свободы преобразований в особых «внутренних» пространствах, что позволяет выделять те или иные группы частиц [18].

Первой основной характеристикой является **масса элементарных частиц m** – это масса покоя, так как она не зависит от состояния движения. Ее определяют по отношению к массе покоя электрона m_e , самой маленькой из масс покоя. В зависимости от массы все частицы можно подразделить на несколько групп:

- **частицы, не имеющие массы покоя.** К этой группе частиц относят фотоны, движущиеся со скоростью света;
- **лептоны** (от греч. *leptos* – мелкий, тонкий, легкий) – легкие частицы (электрон, нейтрино);
- **мезоны** (от греч. *mesos* – средний, промежуточный) – средние частицы с массой от одной до тысячи масс электрона;
- **барионы** (от греч. *barys* – тяжелый, массивный) – тяжелые частицы с массой более тысячи масс электрона (протоны, нейтроны, гипероны, резонансы) [19].

Второй важной характеристикой элементарных частиц является **электрический заряд Q** . Он всегда кратен элементарному электрическому заряду $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл. У известных элементарных частиц $Q = 0, \pm 1, \pm 2$. Так, например, у электрона $Q = -1$, у нейтрона $Q = 0$, у протона $Q = +1$. В 1967 г. американский физик М. Гелл-Манн высказал гипотезу о существовании кварков – частиц с дробным электрическим зарядом [6].

Третьей основной характеристикой элементарных частиц выступает их **время жизни t** , которое определяет их стабильность или нестабильность. По времени жизни частицы делятся на:

- **стабильные частицы** не распадаются длительное время. Они могут существовать от бесконечности до 10^{-10} с. Стабильными частицами считаются протон ($t > 2 \times 10^{30}$ лет), электрон ($t > 5 \times 10^{21}$ лет), фотон, нейтрино.
- **квазистабильные частицы** распадаются за счет электромагнитного и слабого взаимодействий. Время их жизни составляет от 10^{-10} до 10^{-24} с. Примером квазистабильной частицы является свободный нейтрон. Он распадается из-за слабого взаимодействия, среднее время жизни – 15,3 мин.

- **нестабильные частицы** существуют 10^{-24} до 10^{-26} с. Примером нестабильных частиц являются резонансы, которые распадаются за счет сильного взаимодействия [19].

Спин J – одна из важнейших характеристик элементарных частиц. Она определяет собственный момент количества движения (импульса) частицы. В отличие от классического момента количества движения, который может принимать любые значения, спин принимает только целое или полуцелое кратное величине $\hbar$ значение. Частицы с полуцелым спином ($1/2, 3/2$) называются **фермионами**, а с целым спином ($0, 1, 2$) – **бозонами**.

- **Фермионы** (название дано в честь Энрико Ферми) – частицы вещества, которые хотя и обладают волновыми свойствами, но в классическом пределе воспринимаются как истинные частицы. К ним относятся такие известные частицы, как электроны, протоны, нейтроны, спин которых равен $1/2$. Известна частица, спин которой равен $3/2$, – **омега-гиперон**. Системы фермионов описываются квантовой статистикой Ферми-Дирака, которая требует антисимметрии волновой функции системы относительно перестановки пары частиц и, следовательно, запрещает двум частицам полуцелого спина находиться в одинаковом состоянии (подчиняются запрету Паули).
- **Бозоны** (название дано в честь индийского ученого Шатъендраната Бозе, одного из создателей квантовой статистики) – это частицы с целым спином ($0, 1, 2$). Примером бозонов служит **фотон**, спин которого равен 1 , и **мезон**, спин которого равен 0 . Возможно, существуют частицы со спином 2 – **гравитоны**. Системы таких частиц описываются **статистикой Бозе-Эйнштейна**, которая требует симметрии волновой функции относительно перестановок частиц и допускает нахождение любого числа частиц в одном и том же состоянии. Бозоны не подчиняются запрету Паули. Перечисленные элементарные частицы являются переносчиками физических взаимодействий [6].

Между частицами существуют четыре типа фундаментальных взаимодействий, каждое из которых переносится своим типом бозонов. Фотон является частицей-переносчиком электромагнитного взаимодействия Гравитон – пере-

носчик гравитационного взаимодействия, действующего между любыми телами, имеющими массу. Восемь *глюонов* (от англ. *glue* - клей) переносят сильные ядерные взаимодействия, связывающие *кварки*. *Промежуточные векторные бозоны* переносят слабые взаимодействия, ответственные за некоторые распады частиц (например, β -распад) [18].

В зависимости от участия в тех или иных видах взаимодействий элементарные частицы можно подразделить на три группы, приведенные ниже:

- **Фотоны**. К этой группе относится единственная частица – фотон, который участвует только в электромагнитных взаимодействиях. В электромагнитном взаимодействии участвуют практически все как заряженные так и нейтральные частицы за исключением нейтрино.
- **Лептоны** – участвуют во всех типах взаимодействий кроме сильного. К группе лептонов относятся электрон, мюон, таон, соответствующие им нейтрино, а также их античастицы. Все лептоны имеют спин $1/2$, следовательно, являются фермионами, подчиняясь *статистике Ферми–Дирака*. Так как лептоны не участвуют в сильном взаимодействии, то изотопический спин им не присписывается.

Элементарные частицы дополнительно характеризуются рядом *внутренних квантовых чисел*. Так, лептоны несут специфический *лептонный заряд L* . Для лептонов $L = +1$, для антилептонов $L = -1$, для всех остальных частиц $L = 0$. Это введение позволяет сформулировать *закон сохранения лептонного заряда*: в замкнутой системе при всех процессах взаимопревращаемости элементарных частиц лептонное число сохраняется.

- **Адроны** (от греч. *hadros* – крупный, сильный) характеризуются прежде всего тем, что они обладают сильными взаимодействиями, наряду с электромагнитными, слабыми и гравитационными. К группе адронов относятся пионы, каоны, нуклоны, гипероны, а также их античастицы.

Адронам присписывают *барионный заряд B* . Адроны с $B = 0$ образуют подгруппу *мезонов* (пионы, каоны, мезоны), а адроны с $B = +1$ образуют подгруппу *барионов*. К числу барионов относятся гипероны и нуклоны. **Нуклоны** – общее на-

звание протонов и нейтронов, являющихся основными составляющими атомных ядер. Если принять для барионов $B = +1$, для антибарионов $B = -1$, а для всех остальных частиц $B = 0$, то можно сформулировать **закон сохранения барионного числа**: в замкнутой системе при всех процессах взаимопревращения элементарных частиц барионное число сохраняется [20].

Кроме того, адроны характеризуются особыми квантовыми числами, такими как **странность S** и **очарование Ch** (от англ. *charm*) с допустимыми значениями: $S = 0, 1, 2, 3$ и $Ch = 0, 1, 2, 3$. В зависимости от значений этих характеристик барионы и мезоны подразделяются на несколько совокупностей:

- **обычные (нестранные)** частицы (протон, нейтрон, π -мезоны), имеющие $S = 0$ и $Ch = 0$;
- **странные частицы** (гипероны, K -мезоны): $S = \pm 1$ и $Ch = 0$;
- **очарованные частицы**: $S = 0, 1, 2$ и $Ch = 1, 2, 3$.

Можно отметить, что странные частицы несколько тяжелее обычных частиц, а очарованные частицы тяжелее странных [19].

Специфической характеристикой адронов является – **внутренняя четность P** – квантовое число, определяющее симметрию волновой функции относительно зеркального отражения. Если при зеркальном отражении волновая функция частицы не меняет знак, то ее четность положительна, если меняет знак – отрицательна. Эта квантово-механическая характеристика подчиняется **закону сохранения четности**: при всех превращениях системы частиц четность состояния не изменяется. Закон сохранения четности выполняется для сильного и электромагнитного взаимодействий, но может нарушаться в слабых взаимодействиях. Это подтверждено экспериментально в 1956 г. американскими физиками Т. Ли и Ч. Янгом [7].

Основные элементарные частицы и их характеристики приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Основные элементарные частицы и их характеристики

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. q_e	Масса покоя, ед. m_e	Спин, ед. $\hbar$	Изоспин, I	Лептонное число, L	Барионное число, B	Странность, S	Время жизни, τ
		Частица	Античастица								
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11
Фотоны	фотон	γ		0	0	1	–	0	0	0	стабилен
Лептоны	электрон	e^-	e^+	1	1	1	–	+1	0	0	стабилен
	электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	/21 /2	–	+1	0	0	стабильно
	мюон	μ^-	μ^+	1	206,8	1	–	+1	0	0	$\approx 10^{-6}$
	мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	/21 /2	–	+1	0	0	стабильно
	таон	τ^-	τ^+	1	3487	1	–	+1	0	0	$\approx 10^{-12}$
	таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	/21 /2	–	+1	0	0	?

Адроны	Мезоны	пионы	π^o		0	264,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-16}$
			π^+	π^-	1	273,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-8}$
		каоны	K^o	$\sim K^o$	0	974,0	0	1	0	0	+1	$10^{-10}\text{--}10^{-8}$
			K^+	$\sim K^-$	1	966,2	0	/21 /2	0	0	+1	$\approx 10^{-8}$
	Барионы	этта-мезон	η^o		1	1074	0	—	0	0	0	$\approx 10^{-19}$
		протон	p	$\sim p$	1	1836	1/2	1/2	0	+1	0	стабилен
		нейтрон	n	$\tilde{n}$	0	1839	1/2	1/2	0	+1	0	$\approx 10^3$
		гипероны: лямбда	Λ^o	$\sim \Lambda^o$	0	2183	1/2	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
		сигма	Σ^o	$\sim \Sigma^o$	0	2334	1	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-20}$
			Σ^+	$\sim \Sigma^+$	1	2328	/21	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
			Σ^-	$\sim \Sigma^+$	1	2343	/2 1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
				$\sim \Sigma^-$ —								
		кси	Ξ^o	Ξ^o	0	2573	1	1/2	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$
	Ξ^-		Ξ^-	1	2586	/21 /2	1/2	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$	
	омега	Ω^-	Ω^-	1	3273	3/2		0	+1	-3	$\approx 10^{-10}$	

Квантовые числа элементарных частиц можно подразделить на точные и неточные.

- **Точные квантовые числа** – связаны с физическими величинами, которые сохраняются во всех процессах. Спин связан со строгим законом сохранения момента количества движения и потому является точным квантовым числом. Электрический, лептонный и барионный заряд также сохраняются при всех превращениях элементарных частиц.
- **Неточные квантовые числа** – для которых соответствующие физические величины в части процессов не сохраняются. Изотопический спин, сохраняясь в сильных взаимодействиях, не сохраняется в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Странность и очарование сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняются в слабых взаимодействиях. Слабые взаимодействия изменяют также внутреннюю четность. Причины, вызывающие несохранение многих квантовых чисел, связаны с их

природой, а также с глубинной структурой электромагнитных и слабых взаимодействий./1/

Частицы, обладающие одинаковыми физическими характеристиками: массой, спином, электрическим зарядом, внутренними квантовыми числами, называют **тождественными частицами**. Например, все электроны Вселенной считаются тождественными. Тождественные частицы подчиняются принципу тождественности.

Принцип тождественности является одним из основных различий между классической и квантовой механиками. В классической механике в принципе всегда можно проследить за движением отдельных частиц по траекториям и таким образом отличить их друг от друга. В квантовой механике тождественные частицы полностью лишены индивидуальности. Состояние частицы в квантовой механике описывается с помощью волновой функции ψ , которая позволяет определить лишь вероятность $|\psi|^2$ обнаружения частицы в данной точке пространства./5/

Все элементарные частицы обладают некоторыми общими свойствами.

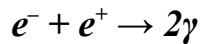
Одно из них – **свойство корпускулярно-волнового дуализма**, то есть наличие у всех микрообъектов как свойств волны, так и свойств вещества.

Другим общим свойством является наличие почти у всех частиц своих «зеркальных двойников» – **античастиц**. Античастицы имеют ту же массу, спин, время жизни и некоторые другие характеристики, что и их частицы-двойники, но отличаются от них знаками электрического, лептонного, барионного заряда, странности, очарования и др.

Частицы, не имеющие античастиц, называются **абсолютно (истинно) нейтральными**. Примерами таких частиц могут служить фотон, η -мезон и π^0 -мезон. Каждая из истинно нейтральных частиц тождественна со своей античастицей [19].

Гипотеза о существовании античастиц была предложена в 1928 г. П. Дираком в результате решения релятивистского волнового уравнения. В 1932 г. американский физик К. Андерсен экспериментально обнаружил первую анти-

частицу – *позитрон* – в составе космических лучей. При столкновении частицы и античастицы происходит их аннигиляция, при которой образуются другие элементарные частицы. Например, при аннигиляции пары электрон-позитрон рождаются фотоны:



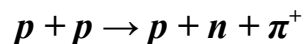
В последнее время процессы аннигиляции все чаще используются как одни из самых совершенных методов исследования микромира. Аннигиляция 1 г вещества и антивещества приводит к выделению 10^{14} Дж энергии, что эквивалентно взрыву средней атомной бомбы в 10 килотонн.

Электрон и позитрон – не единственная пара частица–античастица. Современная наука доказала принципиальную возможность существования антивещества – материи, построенной из античастиц. В 1969 г. в г. Протвино советские физики открыли ядра антигелия-3, состоящие из 2 антипротонов и антинейтрона. Затем были открыты ядра антитрития – тяжелого антиводорода, состоящие из одного антипротона и двух антинейтронов. В принципе можно представить и антиатомы, и антивещество, и антимирры.

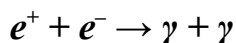
Большинство ученых уверено в том, что Вселенная состоит в основном из обычного вещества. Но так было не всегда. На ранней стадии развития Вселенной при очень высоких температурах количество частиц и античастиц почти совпадало: на каждые несколько миллиардов антипротонов приходилось столько же протонов и плюс один «лишний». При остывании Вселенной все частицы и античастицы проаннигилировали, породив фотоны, и из ничтожного в прошлом избытка частиц возникло все, что нас окружает. Аннигиляционные фотоны дожили до наших дней в виде реликтового излучения [6].

Важнейшим свойством элементарных частиц является ***их универсальная взаимопревращаемость***. Такого свойства нет ни в макро-, ни в мегамире. Элементарные частицы способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться) при взаимодействии с другими частицами. Все процессы с элементарными частицами протекают через последовательность актов их поглощения и

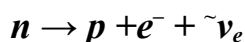
испускания. На этой основе можно понять процесс рождения π^+ -мезона при столкновении двух протонов:



или процесс аннигиляции электрона и позитрона, когда взамен исчезнувших частиц возникают два фотона:



Распад нестабильных частиц на более легкие частицы отвечает той же закономерности и является процессом, в котором продукты распада рождаются в момент самого распада и до этого момента не существуют. Примером может служить распад нейтрона до протона, электрона и антинейтрино:



Для процессов взаимопревращаемости элементарных частиц, обусловленных сильными взаимодействиями, выполняются все законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса, зарядов (электрического, лептонного, барионного), изоспина, странности и четности). В процессах, обусловленных слабыми взаимодействиями, не сохраняются только изоспин, странность и четность [19].

Теория кварков

К середине 60-х гг. XX в. частиц, называемых элементарными, стало так много, что возникли серьезные сомнения в их элементарности. Ученые пришли к мысли, что наблюдаемые частицы не отражают предельного уровня делимости материи. В 1964 г. американский ученый М. Гелл-Манн и независимо от него швейцарский физик Д. Цвейг выдвинули гипотезу, согласно которой известные частицы построены из более мелких частиц, названных **кварками**. Термин «кварк» они позаимствовали из романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану», герою которого снился сон, в котором летали чайки и кричали: «Три кварка для мистера Марка!». Само по себе слово «кварк» не имеет какого-либо смыслового значения и в переводе с немецкого языка оно означает «чепуха». Авторы данной теории рассматривали кварк как гипотетический материальный объект, существование которого еще не доказано наукой. Имея форму гипотезы, кварковая теория

позволила систематизировать известные частицы и предсказать существование новых.

Основные положения теории кварков заключаются в следующем. Адроны состоят из более мелких частиц – кварков, которые представляют собой истинно элементарные частицы и поэтому бесструктурны. Возможно, бесструктурность кварков отражает лишь достигнутый уровень исследования этих материальных образований. Однако ряд специфических особенностей кварков дает некоторые основания предполагать, что кварки являются частицами, замыкающими цепь структурных составляющих материи. Главная особенность кварков – их дробный электрический заряд. Кварки могут соединяться друг с другом двумя способами – парами и тройками. Соединение трех кварков приводит к образованию барионов, трех антикварков – к образованию антибарионов, кварка и антикварка – к образованию мезонов [21].

Кварки различаются ароматом и цветом. **Аромат** кварка – это особая физическая характеристика, которая не имеет никакого отношения к аромату, понимаемому буквально (аромат цветов, духов и др.). Существует шесть видов кварков, различающихся ароматом. Их обозначают первыми буквами своих названий:

- u (*up* – верхний),
- d (*down* – нижний),
- s (*strange* – странный),
- c (*charm* – очарование),
- b (*beauty* – прелесть),
- t (*truth* – истинный).

Протон является комбинацией кварков uud , а нейтрон – udd .

Считается, что каждый кварк имеет один из трех возможных цветов, которые учеными выбраны произвольно: красный, желтый, синий. **Цвет** кварка не имеет никакого отношения к обычному оптическому цвету в макром мире. Каждому кварку соответствует антикварк с противоположным цветом (антикрасный, антижелтый и антисиний). Таким образом, шесть кварков и шесть антикварков призваны объяснить все многообразие частиц, кроме лептонов.

Кварки объединяются между собой благодаря сильному взаимодействию. Переносчиками сильного взаимодействия выступают глюоны, которые «склеивают» кварки между собой. Предполагается, что кварки участвуют также в электромагнитных и слабых взаимодействиях [19].

Долгое время ученые пытались обнаружить кварки в многочисленных экспериментах, но в свободном состоянии они пока не наблюдались, хотя имеются свидетельства их существования в связанном состоянии. В 1969 г. в Стэнфордском университете США были проведены опыты, доказавшие существование кварков внутри адронов. В ходе экспериментов при бомбардировке протонов электронами было обнаружено, что электроны налетали на твердые крохотные вкрапления и отскакивали от них под различными углами. Ученые предположили, что эти твердые вкрапления и были кварками. В настоящее время теория кварков продолжает развиваться и уточняться, поэтому ее нельзя считать окончательно сформированной [21].

Кварки постепенно приобретают статус новых элементарных частиц, являющихся претендентами на роль истинно элементарных частиц для адронной формы материи.

Среди огромного множества элементарных частиц можно выделить частицы, которые не имеют внутренней структуры (несоставные). Их называют **фундаментальными**. К фундаментальным частицам относят лептоны, кварки и их античастицы. Они естественным образом разбиваются на три поколения, каждое из которых состоит из четырех членов. Самые легкие частицы образуют первое поколение – «верхний» и «нижний» кварки, электрон и электронное нейтрино. В каждое последующее поколение входят более тяжелые частицы.

Во втором поколении – «очарованный» и «странный» кварки, мюон и мюонное нейтрино.

В третьем поколении – «истинный» и «прелестный» кварки и тау-частица со своим нейтрино.

Фермионы первого поколения в совокупности с фотонами являются той материей, из которой построена Вселенная. Из u - и d -кварков состоят нуклоны,

а значит и ядра атомов, из электронов – атомные оболочки, без электронных нейтрино не могли бы протекать реакции ядерного синтеза в Солнце и в других звездах. Что касается фермионов второго и третьего поколений, то они играли важную роль в ранней Вселенной, в первые мгновения Большого Взрыва. В частности число видов нейтрино определило соотношение между водородом и гелием во Вселенной.

В физике остается нерешенным ряд вопросов, связанный с происхождением кварков и лептонов, о том, являются ли они основными кирпичиками природы и насколько фундаментальны. Ответы на эти вопросы ищут в современной космологии, в моделях первичного нуклеосинтеза, породившего те или иные частицы в момент рождения Вселенной. Большое значение в решении этих проблем имеет исследование рождения элементарных частиц из вакуума [6].

В настоящее время разработана фундаментальная физическая теория – квантовая теория поля, – которая описывает элементарные частицы, их взаимодействия и взаимопревращения на основе понятия квантованного физического поля. Квантовая механика является частным случаем квантовой теории поля при скоростях, много меньших скорости света.

В основе квантовой теории поля лежит представление о том, что все элементарные частицы являются квантами соответствующих полей. Понятие квантового поля возникло в результате развития представлений о классическом поле и частицах, а также синтеза этих представлений в рамках квантовой теории. С одной стороны квантовые принципы привели к пересмотру классических взглядов на поле как на непрерывно распределенный в пространстве объект. Возникло представление о квантах поля. С другой стороны частице в квантовой механике ставится в соответствие волновая функция ψ , имеющая смысл амплитуды волны, причем квадрат модуля этой амплитуды $|\psi|^2$ дает вероятность обнаружить частицу в той точке пространства-времени. В результате с каждой материальной частицей оказалось связано новое поле – поле амплитуд вероятности. Таким образом, на смену полям и частицам, принципиально

разным объектам в классической физике, пришли единые физические объекты – квантовые поля в четырехмерном пространстве-времени, по одному для каждого вида частиц. Элементарное взаимодействие при этом рассматривается как взаимодействие полей в одной точке или мгновенное превращение в этой точке одних частиц в другие. Квантовое поле оказалось наиболее фундаментальной и универсальной формой материи, лежащей в основе всех ее проявлений.

В квантовой теории поля наиболее фундаментальными полями в настоящее время являются поля, связанные с *бесструктурными фундаментальными частицами* со спином $1/2$ (кварками и лептонами) и поля, связанные с квантами-переносчиками четырех фундаментальных взаимодействий (фотоном, промежуточными бозонами, глюонами, гравитоном), которые называют фундаментальными (или калибровочными) бозонами. Несмотря на то, что фундаментальные взаимодействия и соответствующие им калибровочные поля имеют некие общие свойства, в квантовой теории поля эти взаимодействия представлены в рамках отдельных полевых теорий: квантовой электродинамики, электрослабой теории, квантовой хромодинамики, а квантовой теории гравитационного поля пока не существует. Так, квантовая электродинамика – это квантовая теория электромагнитного поля и электронно-позитронного полей, их взаимодействий. *Квантовая хромодинамика* – квантовая теория глюонных и кварковых полей и их взаимодействий, обусловленных наличием у них цветовых зарядов. Центральной проблемой квантовой теории поля является проблема создания единой теории, объединяющей все квантовые поля [22].

Рассмотрим электромагнитное поле (поле фотонов). Такое поле имеет запас энергии и может отдавать ее порциями. При исчезновении одного фотона энергия поля уменьшается. В результате последовательности таких переходов в конечном итоге образуется состояние, в котором число фотонов равно нулю, и дальнейшая отдача энергии полем становится невозможной. Однако, электромагнитное поле при этом не перестает существовать, оно лишь находится в состоянии с наименьшей возможной энергией. Так как в таком состоянии фотонов нет, его можно назвать вакуумным состоянием электромагнитного поля,

или фотонным вакуумом (от лат. *vacuum* – пустота). Следовательно, **вакуум** электромагнитного поля – *низшее энергетическое состояние этого поля*.

Кроме электромагнитного поля существуют и другие типы физических полей: мезонные поля, поля нейтрино и антинейтрино, нуклонные, гиперонные и др. Если физическое поле не испытывает никаких взаимодействий, то его можно рассматривать как совокупность невзаимодействующих квантов этого поля, которые просто называют частицами данного поля. Аналогично и для других частиц можно ввести представление о вакууме как о низшем энергетическом состоянии полей этих частиц.

Представление о вакууме как об одном из состояний поля является физически обоснованным. Электромагнитное поле в вакуумном состоянии не может быть поставщиком энергии, но из этого не следует, что вакуум вообще никак не может проявить себя. Физический вакуум – не «пустое место», а состояние с важными свойствами, которые проявляются в реальных физических процессах.

Физический вакуум – пространство, не содержащее реальных частиц и энергии, поддающейся непосредственному измерению. Согласно современным физическим представлениям, это наиболее низкое энергетическое состояние любых квантованных полей, характеризующееся отсутствием реальных частиц. Вакуум наполнен появляющимися и исчезающими всевозможными частицами – квантами соответствующих полей, которые в отсутствии внешних полей не могут превратиться в реальные. По современным представлениям в вакууме непрерывно образуются и исчезают пары частиц–античастиц: электрон–позитрон, нуклон–антинуклон и др. Они не поддаются регистрации и называются **виртуальными (призрачными) частицами**. Это частицы с очень малым сроком жизни порядка 10^{-21} – 10^{-24} с. Вакуум «кипит» виртуальными частицами и насыщен сложными взаимодействиями между ними. Отдельные виртуальные частицы нельзя обнаружить, но их суммарное воздействие на обычные микрочастицы обнаруживается экспериментально. Все взаимодействия между реальными частицами происходят при участии вакуумного виртуального фона. Однако при определенных обстоятельствах виртуальные частицы становятся реальными. Так, напри-

мер, столкновения частиц высоких энергий или сильные поля рожают из вакуума множества различных частиц и античастиц.

Большое значение для решения проблем вакуума имеют работы П. Дирака. До их появления считалось, что вакуум есть чистое «ничто», которое невозможно изменить никакими преобразованиями. Теория Дирака открыла путь преобразованиям вакуума, в которых прежнее «ничто» обращалось во множество пар «частица–античастица».

Вакуум у Дирака представляет море электронов с отрицательной энергией как однородный фон, не влияющий на прохождение в нем электромагнитных процессов. Наблюдаемыми могут быть только изменения состояния вакуума, его возмущения.

Когда в море электронов попадает богатый энергией световой квант – фотон, то он вызывает возмущение и электрон с отрицательной энергией может перескочить в состояние с положительной энергией, то есть будет наблюдаться как свободный электрон. Тогда в море отрицательных электронов образуется «дырка» и рождается пара: электрон + дырка.

Вопрос о реальном существовании дырок был решен в 1932 г. американским физиком К. Андерсеном, который фотографировал треки космических частиц. Он обнаружил в космических лучах след неизвестной частицы, по всем параметрам тождественной электрону, но имеющей положительный заряд. Эта частица названа позитроном.

В результате явления, обратного «рождению» пары, взаимодействие частицы с ее античастицей приводит к их «уничтожению» (аннигиляции): энергия их массы покоя переходит в электромагнитную энергию фотона.

Огромная заслуга П.Дирака заключалась в том, что он разработал релятивистскую теорию движения электрона, предсказавшую позитрон, аннигиляцию и рождение из вакуума электронно-позитронных пар. Стало ясно, что вакуум обладает сложной структурой, из которой могут рождаться пары: частица–античастица. Эксперименты на ускорителях подтвердили это предположение.

Изучение структуры и свойств физического вакуума является одной из центральных задач фундаментальной физики. Структура вакуума во многом определяет свойства элементарных частиц и их взаимодействий. Эти вопросы изучает квантовая теория поля и физика элементарных частиц.

Исходя из того, что физический вакуум – это динамическая система, обладающая флуктуациями, можно полагать, что вакуум является источником материи и энергии как уже реализованных во Вселенной, так и находящихся в скрытом состоянии. По словам академика Г.И. Наана, «вакуум есть все, и все есть вакуум» [4].

Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение понятию «элементарные частицы».
2. Какие частицы называют фундаментальными? Приведите примеры.
3. Укажите общие и специфические характеристики элементарных частиц.
4. По каким критериям можно классифицировать элементарные частицы?
5. Назовите частицы–переносчики различных видов фундаментальных взаимодействий?
6. Какие частицы называют тождественными? В чем заключается принцип тождественности?
7. Какие общие свойства характерны для всех элементарных частиц?
8. Что такое античастицы? Какими чертами они обладают? Существуют ли частицы, тождественные своим античастицам? Какова роль частиц и античастиц в формировании Вселенной? физического вакуума?
9. Какие законы сохранения характерны для объектов микромира?
10. Какие физические теории описывают поведение элементарных частиц, их взаимодействия и взаимопревращения?
11. Что представляет собой физический вакуум? Какими свойствами он обладает?

12. Какие частицы называют виртуальными?

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелов А.А. Концепции современного естествознания. М.:Центр, 1998.
2. Концепции современного естествознания/ под ред. С.И.Самыгина. Ростов-на-Дону: Феникс, 1997.
3. Карпенков С.Х. Основные концепции естествознания. М.: Культура и спорт, 1998.
4. Концепции современного естествознания/ В.Н.Лавриненко, В.П.Ратников, В.Ф.Голубь и др.М.: Культура и спорт, 1997.
5. Миронов В.В. Философия. М.: Проспект, 1998.
6. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. Новосибирск: ЮКЭА, 1997.
7. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания. М.: Культура и спорт, 1997.
8. Радугин А.А. Философия. М.:Центр, 1998.
9. Краткий философский словарь/ под ред. А.П.Алексеева. М.: Проспект, 1998.
- 10.Глинка Н.Л. Общая химия. Л.: Химия, 1984.
- 11.Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика.М.: Наука, 1988.
- 12.Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, т.3. М.: Мир, 1977.
- 13.Базаров И.П. Термодинамика.М.: Высшая школа, 1991.
- 14.Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 4. М.: Мир, 1977.
- 15.Концепции современного естествознания/ Е.В.Иванова, И.Б.Копылова, В.В. Надточий и др. Благовещенск: АмГУ, 1998.
- 16.Хорошавина С.Г. Курс лекций «Концепции современного естествознания». Ростов-на-Дону: Феникс, 2000.
- 17.Соломатин В.А. История и концепции современного естествознания. – М.: ПЕРСЭ, 2002.
- 18.Кейн Г. Современная физика элементарных частиц. – М.: Мир, 1990.

19. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 5. – М.: Наука, 1997.
20. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: «Высшая школа», 2001.
- 21.. Садохин А.П. Концепции современного естествознания. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006.
22. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. – М., 1987.
23. Азимов А. Популярная физика. От рычага до квантовой теории / Пер.с англ. – М.: ЗАО Центрполиграф, 2007.
24. Фейман Р., Вайнберг С. Элементарные частицы и законы физики. –М.: Мир, 2000.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Гео – и гелиоцентрическая системы мира

Гелиоцентрическая система мира пришла на смену геоцентризму Аристотеля.

Сущность геоцентрической системы мировых сфер Аристотеля заключается в том, что Земля, имеющая форму шара, неподвижно располагается в центре Вселенной. Учение Аристотеля о Вселенной (космология) основывалось на представлениях о пространственной конечности мироздания. Границами космоса, по Аристотелю, являются кристалльно – прозрачные сферы, на которых неподвижно закреплены планеты и звезды. Вращение сфер создает впечатление о подвижности этих звезд и планет. Источником движения является соприкасающийся с внешней сферой «Перводвигатель Вселенной». Это есть Бог, или разум мирового масштаба. Впоследствии космология Аристотеля была обоснована Птолемеем и занимала господствующее положение в науке вплоть до XVI в.

Гелиоцентрическая система мироустройства, предложенная Н.Коперником на основе астрономических наблюдений и расчетов, исходит из того, что вокруг Солнца по круговым орбитам движутся планеты, одной из которых является Земля. Вращаясь вокруг Солнца, Земля одновременно вращается и вокруг своей оси. Этим объясняется смена дня и ночи. Гелиоцентризм Коперника отвергал учение Аристотеля о «Перводвигателе», так как Коперник рассматривал движение планет как естественное свойство, обусловленное закономерностями механики. Недостатком теории Коперника была конечность мироздания. Идеи гелиоцентризма были продолжены и развиты в работах Тихо Браге, Джордано Бруно, Иоганна Кеплера, открывшего законы движения планет.

Диалектизация естествознания

Науке известны два противоположных подхода к изучению окружающей действительности – диалектический и метафизический.

Метафизика (греч. *ta meta ta physica* – то, что идет после физики) – термин, появившийся в I веке до н.э. Согласно Аристотелю, метафизика – важнейший раздел «первой философии», умозрительно трактующий наивысшие, последние начала бытия, недоступные для чувственного понимания. Главные категории метафизики – Бог и субстанция. Верховным, последним началом бытия является само себя мыслящее мышление, источником и завершающей целью всех изменений в мире природы и человека является Бог [9].

В отличие от метафизического, диалектический подход предполагает рассмотрение всех объектов и явлений с учетом их взаимосвязей, процессов изменения и развития. Первоначально термин «диалектика» обозначал искусство ведения спора, в целях совершенствования ораторского искусства. Затем – как метод анализа действительности в философии. Наиболее развитую и совершенную форму диалектике придал Гегель, сформулировав три основных закона: закон перехода количественных изменений в качественные, закон отрицания отрицания и закон единства и борьбы противоположностей [8].

Процесс стихийной диалектизации естествознания начался с работ немецкого ученого и философа И. Канта о происхождении Солнечной системы. Опираясь на классическую механику, Кант смог создать развивающуюся картину мира, не соответствующую философии Ньютона. Независимо от Канта французский математик и астроном П. С. Лаплас высказал идеи, развившие и дополнившие учение Канта. В науке эти идеи известны как космогоническая гипотеза Канта – Лапласа.

В XIX в. диалектика распространилась на широкие области естествознания. В области биологии – это работы французского испытателя Ж. Б. Ламарка, всем известные труды Ч. Дарвина, работы ботаника М. Шлейдена и биолога Т. Шванна. В геологии – труды английского естествоиспытателя Ч. Лайеля.

Фундаментальные работы, раскрывающие процессы эволюции, развития природы и открытия, подтверждающие связь и единство всего органического мира, позволили вывести универсальный закон природы – закон сохранения и превращения энергии, главными «идеологами» которого являются немецкий врач Ю. Майер и английский исследователь Д. Джоуль.

Большую роль в диалектизацию естествознания внесли и химики – Ф. Велер (впервые получено искусственное органическое вещество), Ш. Жерар (учение о гомологии), Д. Менделеев (Периодический закон и Периодическая система элементов).

Развитие представлений о свете

Размышлять о природе света начали ещё в древние времена. Первые гипотезы были наивны и туманны. Так, Аристотелю предписывают утверждение, что свет есть нечто, исходящее из глаз. Лучи света как бы ощупывают предметы, доставляя наблюдателю информацию об их форме и качестве. Естественно, возникал вопрос, почему же в таком случае человек не видит в темноте.

В школе Пифагора утверждали, что лучи Солнца «проникают через густой и холодный эфир». Впервые появляется мысль о том, что свет каким-то образом передаётся материальной сферой-эфиром.

Независимо от гипотез света развивалась геометрическая оптика.

До второй половины XVII в. оптика представляла, по существу, один из разделов геометрии. Световой луч-прямая линия и светящаяся точка-начало этой линии. Далее были установлены законы отражения и преломления света. Первый был известен ещё в Древней Греции. Закон преломления света открыли независимо друг от друга голландский учёный Виллеброд Снеллиус и французский учёный Рене Декарт.

В эпоху Возрождения оптика входит в практику, становится жизненно важной областью физики в связи с созданием подзорной трубы и микроскопа.

Усовершенствованием оптических приборов занимаются естествоиспытатели разнообразных научных направлений. Создание рациональных конструкций оптических приборов требовало устранения сферических и хроматических aberrаций. Исследование последних и явилось началом развития физической оптики.

Сравнение расчетов оптических приборов с опытом ясно показало недостаточность принципов геометрической оптики для правильного описания и объяснения распространения света.

Первой проблемой физической оптики была проблема цветности световых лучей. До XVII в. естествоиспытатели, следуя традиции Аристотеля, считали, что цвета являются результатом смешения света с темнотой в разных про-

порциях. Были также известны призматические цвета. Появление их относили или за счет каких-то особенностей источника света, или за счет особых свойств тела, имеющего данный цвет.

Чешский естествоиспытатель Мариус Марци де Кронланд указал, что проблему можно решить, разгадав происхождение призматических цветов. Он впервые высказал правильную мысль, что «различные виды призматических цветов являются частями с различными преломлениями», однако дальше он не пошел.

Ещё более трудная проблема физической оптики возникает во второй половине XVII в. В 1655 г. в г. Болонье иезуит Франческо Мария Гримальди впервые описал явление дифракции света. В темную комнату сквозь узкое отверстие был пропущен солнечный свет. В световой конус Гримальди поместил палку и наблюдал характер тени на белом экране. Образовалась картина, которая свидетельствовала о том, что лучи света, могут отклоняться от прямолинейного распространения. Варьируя условия опыта, Гримальди нашёл, что это новое физическое явление, и назвал его дифракцией.

Проблема света, связанная с ней проблема совершенствования оптических инструментов, необходимость объяснения явления дифракции - всё это настоятельно требовало создания действенной системы оптических представлений, определенных гипотез о природе света. Назрела необходимость построения физической основы оптики.

Наблюдение явлений дифракции навело на мысль о световых волнах. В 1665 г. Гримальди высказал мысль об аналогии световых и звуковых явлений. Гук обогащает аналогию света и звука намеком на связь цветов с колебательными движениями, намеком на периодичность света. Однако дальше Гук эту мысль не развивает.

Дальнейшее развитие волновая гипотеза получила в «Трактате о свете» Христиана Гюйгенса. В нем содержится вошедшее в физику под названием принципа Гюйгенса предположение о механизме распространения света. Светящийся предмет, также как и звучащее тело, приводит в движение окружающую

среду, и это движение распространяется так же, как и при звуке, сферическими поверхностями и волнами, Принцип формулировался так.

«Каждая частица вещества, в котором распространяется волна, сообщает своё движение не только ближайшей частице, лежащей на прямой, проведенной от светящейся точки, но и необходимо сообщает его всем другим частицам, которые касаются её и препятствуют её движению. Таким образом, вокруг каждой частицы должна образоваться волна, центром которой она является».

Итак, свет, по Гюйгенсу, – это распространение импульсов, возбуждаемых светящимся телом в упругом эфире

Фундамент учения о свете заложил Исаак Ньютон. Серией экспериментов Ньютон устанавливает следующие фундаментальные факты оптики:

- Причина цветов находится не в телах, а в свете, цвета являются приращёнными свойствами света.
- Показатель преломления находится в строгой зависимости от цвета луча.
- Принцип неизменности простого цвета.

Данная Ньютоном «анатомия света» послужила базой для выяснения природы света. У Ньютона мы впервые встречаем своеобразный синтез волновой и корпускулярной картины. Он даёт следующую модель скорости корпускул. Обгоняя корпускулы, волны подводят к «грубым частицам» то «фазу расширения», то «фазу сгущения», вызывая этим «приступы» поочерёдно следующих друг за другом прохождений и отражений. Опираясь на своеобразную корпускулярно – волновую гипотезу, Ньютон объясняет механизм преломления и отражения света. Ньютон считал, что ни волновая, ни корпускулярная гипотезы не отражают всего богатства оптических явлений.

В оптических воззрениях XVIII в. господствует корпускулярная гипотеза. Однако М.В. Ломоносов и Л. Эйлер подвергают резкой критике данную гипотезу. Развивая воззрения Гюйгенса и Гука, Эйлер последовательно проводит аналогию между светом и звуком: звук распространяется в воздухе, свет – в эфире продольными волнами. Однако в отличие от Гюйгенса, Эйлер вводит в волновую оптику её важнейший элемент – представление о периодичности света.

Цветность светового луча, по Эйлеру, определяется длиной его волны. Цвета тел являются результатом вибрации частиц тела под действием падающего света. Опираясь на эти представления, Эйлер развивает качественную теорию оптических явлений.

Наряду с теоретическими конструкциями к концу XVIII в. появляются экспериментальные факты, тесно связанные с решением вопроса о природе света. В 1791 г. аббат Прево устанавливает общность свойств тепловых и световых лучей, Вильям Гершель в 1800 г. открывает инфракрасные лучи по их тепловым действиям, а Иоганн Риттер – ультрафиолетовые лучи по их химическим действиям. Далее выясняется, что невидимые излучения по своим свойствам тождественны свету.

Однако представление о свете как о потоке корпускул изолировало световые явления от химических и электрических явлений. В то же время гипотеза эфира давала простор для теоретических построений, способных учесть связи между физическими явлениями. Не случайно физики снова обращаются к идее связи света и электричества.

В 1801 г. Томас Юнг формулирует гипотезу о том, что светящееся тело возбуждает колебательные движения в эфире; ощущение цветов зависит от частоты колебаний, возбуждённых светом на сетчатке.

Юнг вводит понятия частоты колебаний и длины волны, устанавливает соотношение между ними и скоростью распространения волны. Он даёт первые вычисления длин волн, определяя крайние границы видимого спектра.

Однако самым важным вкладом Юнга в оптику, обеспечившим победу Волковых представлений, было открытие принципа интерференции. Изучая звуковые волны и волны на поверхности воды, Юнг убеждается в аналогии свойств этих волновых движений со свойствами света.

Юнг ставит серию экспериментов для утверждения принципа интерференции и убедительно демонстрирует его эффективность в объяснении оптических явлений.

В 1818 г. французский физик Огюстен Френель высказал плодотворную идею соединить принцип интерференции Юнга с принципом Гюйгенса. Эта идея позволила построить первую количественную теорию дифракционных явлений. Однако, начиная ещё с 1808 г. развиваются события, которые заставляют усомниться в преимуществе волновой теории по сравнению с корпускулярной.

В конце 1808 г. Малюс открывает новый оптический факт – поляризацию света при отражении. Араго в 1811 г. устанавливает возможность вращения плоскости поляризации, а Био в 1813 г. описывает явление хроматической поляризации. Наконец, Френель в 1816 г. ставит ряд экспериментов, обнаруживающих, что интерференция поляризованных лучей происходит только при параллельном расположении плоскостей поляризации.

Эти факты не укладывались в рамки волновой теории. Особенно явно противоречил этому представлению последний факт, установленный Френелем. Для осуществления интерференции поляризованных лучей нужно, чтобы колебания эфира совершались в одном и том же направлении, но это противоречит самому существу интерференции. Поляризационные явления вели к гипотезе о поперечности световых волн. К концу XIX в. кристаллизовалось представление о свете, как поперечных электромагнитных волнах. Следующий шаг к раскрытию природы света принадлежит квантовой теории.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Научные революции в естествознании.	4
Этапы развития физики	
Первая научная революция	6
Вторая научная революция	7
Третья научная революция	8
Альтернативные подходы к выделению научных революций	8
Вопросы для самоконтроля	9
Материя. Пространство. Время	11
Уровни организации материи	13
Фундаментальные взаимодействия	15
Принцип тождественности	17
Пространство и время	18
Симметрия	20
Вопросы для самоконтроля	21
Механика. Классическая концепция Ньютона. Законы	22
сохранения.	
Классическая механика	22
Законы Ньютона	26
Принципы относительности	27
Закон сохранения массы	29
Закон сохранения энергии	29
Закон сохранения импульса	34
Закон сохранения момента импульса	34
Законы сохранения как следствие свойств пространства и	35
времени	
Вопросы для самоконтроля	35
Начала термодинамики. Энтропия	37
Развитие представлений о теплоте	37
Термодинамика и молекулярно-кинетическая теория	40
I и II начала термодинамики	41
Цикл Карно	44
КПД идеальной и реальной тепловой машины	46
Энтропия	46
Обратимые и необратимые процессы	47
Энтропия и вероятность	47
Пределы применимости I и II начала термодинамики	49
Гипотеза «тепловой смерти» Вселенной	50
III начало термодинамики	50

Вопросы для самоконтроля	51
Электромагнитная концепция	52
Развитие представлений об «эфире»	52
Концепции «дальнодействия» и «близкодействия». Развитие представлений о поле	53
Теория электромагнитного поля Максвелла	56
Вопросы для самоконтроля	58
Колебания и волны. Свет	59
Принцип суперпозиции	61
Звуковые колебания	61
Эффект Доплера	62
Свет. Законы распространения света	63
Интерференция света	67
Дифракция света	68
Поляризация света	68
Дисперсия света	68
Квантовые свойства света	69
Вопросы для самоконтроля	70
Строение атома	71
История вопроса	71
Модель атома Томсона	71
Модель атома Резерфорда	72
Модель атома Бора	75
Корпускулярно-волновой дуализм микрообъектов	77
Соотношение неопределенностей Гейзенберга	79
Принцип дополнительности	80
Волновая функция Шредингера	80
Современные представления о строении атома	81
Принцип Паули	84
Правило Хунда	85
Правила Клечковского	85
Вопросы для самоконтроля	86
Элементарные частицы	87
Краткие исторические сведения	87
Характеристики элементарных частиц	89
Теория кварков	98
Вопросы для самоконтроля	105
Литература	106
Приложения	108

Для заметок

[illegible]

Охотникова Галина Генриховна,

доцент кафедры химии и естествознания АмГУ, канд. техн. наук

Лескова Светлана Анатольевна,

доцент кафедры химии и естествознания АмГУ, канд. хим. наук

Концепции современного естествознания. Часть II. Физические концепции.

Учебное пособие

Изд-во АмГУ. Подписано к печати __. __. __. Формат _____. Усл. печ. л. _____. Тираж 150. Заказ ____

Отпечатано в типографии АмГУ.