

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Н.А. Очкина, А.А. Шумкина

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ МИРОЗДАНИЯ

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению 38.03.01 «Экономика»

Под общей ред. доктора технических наук,
профессора Г.И. Грейсуха

Пенза 2015

УДК 50.001.1(075.8)
ББК 20в.я73
О-94

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент
С.В. Тертычная (ПГУ);
кандидат физико-математических
наук, доцент П.П. Мельниченко
(ПГУАС)

Очкина Н.А.

О-94 Концепции современного естествознания. Структурные уровни
организации мироздания: учеб. пособие / Н.А. Очкина, А.А. Шум-
кина; под общ. ред. Г.И. Грейсуха. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 200 с.

Подробно изложены структурные уровни организации микро-, макро- и мегамира. В конце каждой из глав пособия приведены вопросы для самопроверки, которые помогут студентам самостоятельно оценить качество усвоения материала. В учебное пособие включены методические указания к лабораторным работам по физике, химии и астрономии, а также задания разных уровней сложности для расчетно-графических работ, что позволит осуществлять процесс обучения на основе компетентного, личностно-ориентированного подхода.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Физика и химия» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению 38.03.01 «Экономика», при изучении дисциплины «Концепции современного естествознания».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2015
© Очкина Н.А., Шумкина А.А., 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Концепции современного естествознания» ФГОС ВПО третьего поколения для направления 38.03.01 «Экономика» и имеет целью совершенствование компетенций в процессе овладения студентами знаниями о явлениях природы.

Пособие, посвященное изучению одного из разделов курса «Структурные уровни организации мироздания», состоит из двух частей.

Первая часть содержит три главы:

1. Структура микромира.
2. Физика и химия макромира.
3. Мегамир.

В каждой из глав приводится подробное описание концепций устройства микромира, макромира и мегамира.

Вторая часть включает методические указания к лабораторным и расчетно-графическим работам, выполнение которых способствует более глубокому пониманию студентами теоретического материала, а также позволяет приобрести элементарные навыки экспериментирования.

Учитывая, что пособие предлагается студентам гуманитарного направления, обычно мало знакомым с естествознанием и испытывающим определённые трудности в освоении технических дисциплин, автор попыталась сделать изложение материала простым и доступным.

В тексте учебного пособия наиболее важные положения и термины, а также формулировки законов выделены **жирным шрифтом** и *курсивом*. Это способствует более эффективному усвоению материала студентами. Вопросы для самопроверки, помещённые в конце глав, помогут студентам самостоятельно оценить качество усвоения материала.

Систематическая работа с пособием как в аудитории, так и во внеаудиторное время способствует формированию у студентов:

знаний фундаментальных законов физики, химии и астрономии;

умений правильно применять законы естествознания для понимания явлений природы; самостоятельно работать с учебной, научной и справочной литературой; осуществлять самооценку и самоанализ на основе самопроверки в процессе выполнения заданий.

Работа с учебным пособием в аудитории под руководством преподавателя в коллективе с другими студентами позволяет **овладеть** способ-

ностью к коммуникации в устной и письменной формах (ОК-4), а также способностью работать в коллективе (ОК-5).

Внеаудиторная работа (самостоятельное выполнение расчетно-графических работ) позволяет **овладеть** способностью к самоорганизации и самообразованию (ОК-7); навыками работы с дополнительной литературой.

Успешное освоение законов и теорий естествознания позволит выпускнику-бакалавру:

– **сформировать** целостное систематизированное представление о явлениях природы;

– **овладеть** навыками адекватного поведения в окружающем мире.

ВВЕДЕНИЕ

Материя – это сущность мира, то общее, что входит в состав всех объектов природы. *Окружающий нас мир, всё существующее вокруг нас представляет собой движущуюся материю.*

В классической механике, изучающей макромир, различают два вида материи – вещество и поле.

Вещество – основной вид материи, обладающий массой покоя. К вещественным объектам относятся элементарные частицы, атомы, молекулы и многочисленные образованные из них тела. Вещество – прерывистый (дискретный) вид материи. Свойства вещества зависят от внешних условий и интенсивности взаимодействия его атомов и молекул, что и обуславливает различные агрегатные состояния вещества.

Поле – особый вид материи, обеспечивающий взаимодействие материальных объектов и их систем. Поля могут накладываться друг на друга, занимать одно и то же место в пространстве. Поле непрерывно, и этим оно существенно отличается от вещества. К физическим полям относятся: гравитационное и электромагнитное поля, поле ядерных сил, а также волновые (квантовые) поля, соответствующие различным частицам (например, электрон-позитронное поле). Источниками физических полей являются частицы (например, для электромагнитного поля – заряженные частицы). Созданные частицами физические поля переносят с определенной скоростью взаимодействие между ними.

Поле и вещество обладают разными свойствами и верно характеризуют реальный мир в макроскопическом приближении. В микромире понятия частицы (вещество) и волны (поля) выступают как дополнительные характеристики, выражающие внутренне противоречивую сущность микрообъектов.

Движение и взаимодействие микрочастиц с учетом их волновых свойств описывает квантовая механика, обобщением которой является квантовая теория поля. Важную роль в квантовой теории поля отводят ещё одному виду материи – *физическому вакууму, представляющему собой основное состояние квантовых полей, обладающих наименьшей энергией, в котором флуктуации нулевых колебаний вакуума проявляются как непрерывный процесс рождения и исчезновения неограниченного числа непосредственно ненаблюдаемых частиц, имеющих чрезвычайно короткое время жизни.* Такие частицы получили название *виртуальных*. Свойства физического вакуума во многом определяют динамику развития Вселенной

В современном естествознании принято, что наиболее естественным и наглядным признаком структуры материи являются характерный размер

объекта на данном уровне и его масса. В соответствии с этими представлениями выделяют следующие уровни строения материи:

1. **Микромир** – мир предельно малых, непосредственно не наблюдаемых микрообъектов, пространственная размерность которых исчисляется от 10^{-8} до 10^{-18} см, а время жизни – от бесконечности до 10^{-24} с. Масса объектов микромира не более 10^{-10} кг. К ним относятся элементарные частицы и античастицы, ядра атомов, атомы, молекулы.

2. **Макромир** – мир макрообъектов, размерность которых соотносима с масштабами человеческого опыта: пространственные величины выражаются в миллиметрах, сантиметрах и километрах, время – в секундах, минутах, часах, годах. Масса объектов макромира от 10^{-10} до 10^{20} кг. К ним относятся макромолекулы, вещества в различных агрегатных состояниях, живые организмы, начиная с элементарной единицы живого – клетки, человек и продукты его деятельности, т.е. макротела.

3. **Мегамир** – мир огромных космических масштабов и скоростей, расстояние в котором измеряется световыми годами, а время существования космических объектов – миллионами и миллиардами лет. Масса объектов мегамира более 10^{20} кг. Мегамир образуют планеты, звёзды, галактики, системы галактик.

1. СТРУКТУРА МИКРОМИРА

1.1. Общие характеристики элементарных частиц

Представления о том, что мир состоит из **элементарных частиц** (от лат. *elementarius* – первоначальный, простейший, основной), имеют долгую историю.

Впервые мысль о существовании мельчайших неделимых частиц вещества была высказана в IV веке до нашей эры греческим философом **Демокритом** (ок. 460 до н.э. – ок. 370 до н.э.). Он назвал эти частицы *атомами* (от греч. *atomos* – неразложимый).

Наука начала использовать представление об атомах только в начале XVIII в., так как к этому времени в работах французского химика **Антуана Лавуазье** (1743–1794 гг.), русского естествоиспытателя **Михаила Васильевича Ломоносова** (1711–1765 гг.) и английского физика **Джона Дальтона** (1766–1844 гг.) была доказана реальность существования атомов. Однако в это время вопрос о внутреннем строении атомов даже не возникал, так как они по-прежнему считались неделимыми.

Во второй половине XIX в. в результате открытия явлений *ионизации атомов* **Майклом Фарадеем** и *радиоактивности* французским физиком **Антуаном Беккерелем** (1852–1908 гг.) ученые пришли к выводу, что в состав атомов входят электроны. Поскольку атом электронейтрален, то из этого следовало, что в нём должна быть положительно заряженная частица.

В 1911 г. существование такой частицы в атоме было доказано в опытах английского физика **Эрнеста Резерфорда** (1871–1937 гг.), а сама частица получила название *атомного ядра*. Опыт Резерфорда подтвердил, что *атомы не являются простейшими частицами, а имеют сложное строение*.

В 1919 г. Резерфорд обнаружил среди частиц, выбитых из атомных ядер, положительно заряженные *протоны*. В 1932 г. в опытах английского физика **Джеймса Чедвика** (1891–1974 гг.) по бомбардировке бериллия α -частицами, был открыт *нейтрон*. Сразу же после открытия нейтрона российский физик-теоретик **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904–1994 гг.) и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о протонно-нейтронном строении атомных ядер, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями.

Стало ясно, что атомы состоят из электронов и ядер, а ядра – из протонов и нейтронов (нуклонов).

Таким образом, первоначально элементарными (не способными ни к каким изменениям и превращениям) частицами считали электрон, протон и нейтрон. Казалось, что из этих частиц можно построить целостную картину материального мира. Протоны и нейтроны, образующие ядро,

вместе с электронами составляют атомы, из атомов комбинируются молекулы, которые, объединяясь друг с другом, образуют вещество.

Однако позже было обнаружено, что нейтрон, распадаясь, превращается в протон, электрон и антинейтрино.

В 1935 г. японский физик-теоретик **Хидэки Юкава** (1907–1981 гг.) предсказал существование частиц с массами около 200 электронных масс – мезонов. И действительно, в 1936 г. американские физики **Карл Андерсон** (1905–1991 гг.) и **Сет Неддермейер** (1907–1988 гг.) обнаружили в космическом излучении частицы с массой в 207 электронных масс, названные μ -мезонами (**мюонами**). Но они оказались не мезонами Юкавы, а двойниками электронов с очень большой массой.

Затем в 1947–1950 гг. английский физик **Сесил Пауэлл** (1903–1969 гг.) открыл в космических лучах ядерно-активные частицы π -мезоны (**пионы**), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между нуклонами в ядре. Масса заряженного пиона – 273 электронные массы, нейтрального пиона – 264 электронные массы.

В течение 10 лет, последовавших за открытием пиона, в космических лучах были зафиксированы K -мезоны (каоны) с массами, приблизительно равными 970 электронных масс, Λ -гипероны и Σ -гипероны, имеющие массу в пределах 2183–3273 электронных масс.

С 1950-х гг. началась новая эра в изучении микромира: были созданы ускорители заряженных частиц – циклотроны, фазотроны, синхрофазотроны и т.д., которые стали основным инструментом исследования элементарных частиц.

В 1955 г. при рассеянии протонов (ускоренных на крупнейшем в то время синхрофазотроне Калифорнийского университета) на нуклонах ядер мишени (мишенью служила медь) был открыт антипротон (античастица протона). Электрический заряд антипротона отрицателен. Годом позже (1956) на том же ускорителе удалось обнаружить антинейтрон. Антинейтрон отличается от нейтрона знаком магнитного момента и так называемого барионного заряда.

В 1960 г. был открыт анти- Σ -гиперон, в 1964 г. – самый тяжелый W -гиперон. В 1960-х гг. на ускорителях обнаружили большое число крайне неустойчивых частиц – резонансов. В 1962 г. выяснилось, что существуют два разных нейтрино: электронное и мюонное. В 1974 году обнаружены массивные (в 3–4 протонные массы) и в то же время относительно устойчивые (по сравнению с обычными резонансами) частицы, которые оказались тесно связанными с новым семейством элементарных частиц – «очарованных» (их первые представители открыты в 1976 году).

В 1975 г. обнаружен тяжелый аналог электрона и мюона – τ -лептон, в 1977 г. – частицы с массой порядка десяти протонных масс, в 1981 –

«красивые» частицы. В 1983 г. открыты самые тяжелые из известных элементарных частиц – бозоны (W^+ , W^- и Z^0).

Таким образом, за годы, прошедшие после открытия электрона, было выявлено огромное число разнообразных микрочастиц, общими характеристиками которых являются:

1. Масса покоя.

Самой лёгкой частицей с ненулевой массой покоя является электрон. Массу покоя электрона ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг) принимают за единицу массы микрочастиц.

В зависимости от величины массы покоя все частицы можно разделить на:

- 1) частицы, не имеющие массы покоя (например, фотоны, движущиеся со скоростью света);
- 2) легкие частицы – лептоны (к ним относятся электрон и нейтрино);
- 3) средние частицы с массой от одной до тысячи масс электрона – мезоны;
- 4) тяжелые частицы с массой более тысячи масс электрона – барионы (к ним относятся протоны, нейтроны, гипероны).

2. Электрический заряд.

Электрический заряд элементарных частиц кратен фундаментальной единице заряда – заряду электрона ($e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Заряд частицы может быть отрицательным, положительным либо нулевым. Должны существовать также частицы с дробным электрическим зарядом – кварки.

3. Время жизни.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на *стабильные* и *нестабильные* (с временем жизни τ от 15 минут до триллионных и более малых долей секунды).

Стабильными частицами являются: электрон (время жизни не менее $4,6 \cdot 10^{26}$ лет), протон (более 10^{32} лет), фотон и нейтрино.

Остальные частицы нестабильны. Нестабильные частицы через определенные промежутки времени **самопроизвольно** превращаются в другие частицы. Наиболее долгоживущей из них является нейтрон. Время жизни нейтрона порядка 15 мин. Другие частицы «живут» гораздо меньшее время. Например, среднее время жизни μ -мезона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, нейтрального π -мезона – $0,87 \cdot 10^{-16}$ с. Многие массивные частицы – гипероны – имеют среднее время жизни порядка 10^{-10} с. Существует несколько десятков частиц со временем жизни, превосходящим 10^{-17} с. По масштабам микромира это значительное время. Такие частицы называют **относительно стабильными**. Большинство **короткоживущих** элементарных частиц имеют времена жизни порядка 10^{-22} – 10^{-23} с (они называются резонансами).

Разумеется, наиболее важная роль в мире принадлежит стабильным частицам, из которых и состоят все макротела.

4. Спин (собственный момент импульса частицы) – самая важная характеристика частиц.

В классической механике такая величина характеризует вращение тела, например волчка. Но буквальный перенос этого понятия на микрочастицы теряет смысл, поскольку элементарные частицы невозможно представить вращающимися крохотными шариками. В физике элементарных частиц спин интерпретируется как внутренняя степень свободы частицы, обеспечивающая ей дополнительное физическое состояние. В отличие от классического момента количества движения, который может принимать любые значения в их непрерывной последовательности, спин принимает только положительные дискретные значения, пропорциональные постоянной Планка. Коэффициент пропорциональности называется *спиновым квантовым числом*. У одних частиц он имеет целочисленные значения (0, 1, 2), а у других – полуцелые значения (1/2, 3/2). Частица со спином 0 при любом угле поворота выглядит одинаково. Частица со спином 1 принимает тот же вид после полного оборота на 360° , а частица со спином 2 – после оборота на 180° . Чтобы легче представить себе частицы с различными спинами, можно провести аналогию и сравнить частицу со спином 0 с точкой, со спином 1 – со стрелой, а со спином 2 – со стрелой, заточенной с обеих сторон. Частицы со спином 1/2 принимают тот же вид при повороте на 720° .

Свойства и поведение частиц существенно зависят от того, целое или полуцелое значение имеет их спин. Исходя из этого значения, можно систематизировать и классифицировать данные обо всех элементарных частицах, разделив их на частицы вещества и частицы полей.

Частицы с полуцелым спином называются *фермионами* (в честь итальянского физика Э. Ферми). Это не что иное, как частицы вещества, которые, хотя и обладают волновыми свойствами, в классическом пределе воспринимаются как истинные частицы. К ним относятся такие известные частицы, как электрон, протон, нейтрон, спин которых равен 1/2. Известна частица, спин которой равен 3/2 – омега-гиперон. Все эти частицы обладают свойством, имеющим характер закона, – *частицы с полуцелым спином могут находиться вместе лишь при условии, что их физические состояния, т.е. совокупность характеризующих частицу параметров, не одинаковы*. Этот закон в квантовой механике называется запретом Паули. Если бы этого запрета не существовало, то еще в первые мгновения существования нашей Вселенной образовавшиеся частицы вещества слиплись бы и превратились в более или менее однородное «желе», не позволив образоваться современной структурной Вселенной.

Частицы с целочисленным спином называются *бозонами* (в честь индийского физика Ч. Бозе). Бозоны – это кванты полей, которые, хотя и обладают корпускулярными свойствами, в классическом пределе выступают как поля. На них запрет Паули не распространяется. Примерами

бозонов являются фотоны, спин которых равен 1, и мезоны, спин которых равен 0. Возможно, существуют частицы со спином 2 – гравитоны.

1.2. Античастицы

Элементарные частицы существуют в двух разновидностях: частицы и античастицы. В этом состоит *принцип зарядового сопряжения*: для каждой элементарной частицы должна существовать античастица.

Античастица \tilde{a} (элементарной частицы a) – это элементарная частица, имеющая (по отношению к a) равную массу покоя, одинаковый спин, время жизни и противоположный заряд.

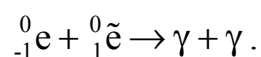
Первая античастица была экспериментально обнаружена в 1932 г. американским физиком **Карлом Андерсоном** (1905–1991 гг.) при исследовании космического излучения. Её назвали *позитроном* (от лат. *positivus* – положительный).

Позитрон (e^+) – античастица электрона (e^-). Он имеет полуцелый спин, его масса точно равна массе электрона и по всем своим свойствам он ничем не отличается от электрона за исключением того, что его электрический заряд по знаку противоположен заряду электрона.

В 1947 г. был обнаружен антипион (π^-), в 1955 г. – антипротон, в 1956 г. антинейтрон и т. д. Были получены атомы антидейтерия, антитрития и антигелия, у которых отрицательно заряженные ядра и оболочка из позитронов. *Антивещество – вещество, построенное из антинуклонов и позитронов*. Истинно нейтральной частицей является фотон, совпадающий со своей античастицей. При столкновении частицы и античастицы они исчезают (*аннигилируют*).

Аннигиляция – процесс взаимодействия элементарной частицы с ее античастицей, в результате которого они превращаются в γ -кванты (фотоны) электромагнитного поля или другие частицы.

Например, при столкновении электрона и позитрона обе частицы исчезают, а рождаются два γ -кванта (фотона):



Образование только одного γ -кванта невозможно из-за необходимости одновременного выполнения законов сохранения импульса и энергии. Минимальная энергия рождающихся γ -квантов составляет

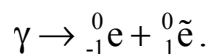
$$E_{\min} = 2m_e c^2 = 2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,02 \text{ МэВ}.$$

При аннигиляции протона и антипротона выделяется энергия, примерно в 2000 раз большая, а при аннигиляции вещества – почти в 1000 раз большая, чем при термоядерном взрыве.

Фундаментальные частицы взаимопревращаются – они могут как исчезать, так и рождаться.

Рождение пары – процесс, обратный аннигиляции.

Электрон-позитронная пара может возникнуть, например, при взаимодействии γ -кванта с веществом. Одновременно рождение заряженных частиц противоположного знака свидетельствует о соблюдении закона сохранения заряда для реакции



Электрически нейтральный квант превращается в частицы, общий заряд которых равен нулю. Для рождения пары у γ -кванта должна быть достаточная минимальная энергия, равная энергиям покоя частиц ($2m_e c^2 = 1,02$ МэВ). При больших энергиях возможно рождение частиц большей массы.

1.3. Классификация элементарных частиц

Начиная с 1932 года, было открыто более 400 элементарных частиц, и это число продолжает расти. В многообразии элементарных частиц, известных к настоящему времени, обнаруживается более или менее стройная система классификации по типу взаимодействия, в котором они участвуют.

1.3.1. Фундаментальные физические взаимодействия

Взаимодействие представляет собой развертывающийся во времени и пространстве процесс воздействия одних объектов на другие путем обмена материей и движением.

Взаимодействие всегда выступает как движение материи, а любое движение включает в себя различные виды взаимодействия.

Последовательное описание взаимодействия, раскрытие его механизма – одна из центральных задач всей физики. На протяжении столетий в науке сформировались два принципиально различных способа описания механизма физического взаимодействия. Это принципы дальнего действия и ближнего действия.

Принцип дальнего действия был сформулирован И. Ньютоном. Согласно этому принципу, *взаимодействие между телами происходит мгновенно на любом расстоянии, без каких-либо материальных посредников* (носителей взаимодействия). С помощью принципа дальнего действия И. Ньютон пытался объяснить механизм действия гравитационных сил.

В XIX в. был сформулирован принцип ближнего действия, который известен в двух вариантах. Первый вариант был предложен М. Фарадеем,

который считал, что *взаимодействие между телами переносится полем, от точки к точке, с конечной скоростью*. В XX в. принцип близкодействия был уточнен, в его современном варианте утверждается, что *каждое фундаментальное физическое взаимодействие переносится соответствующим полем, от точки к точке, со скоростью, не превышающей скорость света в вакууме*.

В современной физической картине мира все многообразие взаимодействий сводится к взаимодействиям четырех типов: гравитационному, электромагнитному, слабому и сильному. Все взаимодействия имеют обменную природу, т.е. реализуются в результате обмена фундаментальными частицами – переносчиками взаимодействий. Каждое из взаимодействий характеризуется так называемой константой взаимодействия, временем протекания и радиусом действия.

Константа взаимодействия – это безразмерный параметр, характеризующий интенсивность взаимодействия, т.е. силу взаимодействия (вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия).

Отношение значений констант дает относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.

Радиус действия – это максимальное расстояние между частицами, за пределами которого их взаимодействием можно пренебречь. При малом радиусе взаимодействие называют короткодействующим, при большом –дальнодействующим.

Гравитационное взаимодействие – это взаимодействие за счет сил притяжения между телами.

Оно имеет универсальный характер (охватывает все без исключения частицы и тела). В классической физике гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения И.Ньютона, сформулированным в 1687 г. в его работе «Математические начала натуральной философии»:

две любые материальные частицы с массами m_1 и m_2 притягиваются друг к другу с силой F , прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Под материальными частицами здесь понимаются любые тела при условии, что их линейные размеры намного меньше расстояния между ними. Коэффициент пропорциональности G называется *постоянной тяготения Ньютона* или *гравитационной постоянной* ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$). Если известна масса одного из тел (эталоны) и сила гравитации, то из закона всемирного тяготения можно определить и массу второго тела. Масса, найденная из закона всемирного тяготения, называется *грави-*

тационной. Гравитационная масса равна инертной, поэтому масса является одновременно и мерой инертности и мерой гравитации.

Гравитационное взаимодействие обладает специфическими свойствами, отличающими его от других фундаментальных взаимодействий. Во-первых, оно является самым слабым из всех известных взаимодействий и проявляется только при наличии достаточно больших масс. В микромире не учитывается. Если принять константу сильного взаимодействия равной 1, то константа гравитационного взаимодействия составит 10^{-39} (табл. 1)

Т а б л и ц а 1.

Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

Вид взаимодействия	Примеры проявления взаимодействия	Константа взаимодействия	Радиус взаимодействия
Сильное	Взаимодействие нуклонов в ядрах атомов	10^0	10^{-15} м
Электромагнитное	Взаимодействие электрических зарядов, токов, электрических и магнитных полей	10^{-2}	∞
Слабое	Взаимодействие элементарных частиц при радиоактивном распаде	10^{-14}	10^{-18} м
Гравитационное	Взаимодействие всех тел	10^{-39}	∞

Тем не менее, это очень слабое взаимодействие определяет строение всей Вселенной: образование всех космических систем, существование планет, звезд и галактик, концентрацию рассеянной в ходе эволюции звезд и галактик материи и включение ее в новые циклы развития. Оно удерживает атмосферу, моря и все живое и неживое на Земле, Землю, вращающуюся по орбите вокруг Солнца, Солнце в пределах Галактики.

Радиус и время действия гравитационного взаимодействия не ограничены. Следовательно, *гравитационное взаимодействие является дальнедействующим* (медленно убывает при увеличении расстояния между частицами и не имеет конечного радиуса действия).

Предполагают, что квантом (переносчиком) *гравитационного взаимодействия является гравитон* (эта гипотетическая фундаментальная частица пока не обнаружена).

Электромагнитное взаимодействие осуществляется между заряженными частицами или телами. В отличие от гравитационного взаимодействия, которое всегда выступает в виде притяжения, электромагнитное взаимодействие может проявляться и как притяжение (между разноимёнными зарядами), и как отталкивание (между одноимёнными зарядами).

Сила электромагнитного взаимодействия определяется по закону Кулона:

сила F взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 в вакууме прямопропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная $\left(\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \right)$.

Константа электромагнитного взаимодействия порядка 10^{-2} , радиус взаимодействия не ограничен (это дальнедействующее взаимодействие), время взаимодействия $t \sim 10^{-20}$ с.

Электромагнитное взаимодействие занимает первое место по широте и разнообразию противлений. Оно связывает электроны и ядра в атомах и молекулах. Оно объединяет атомы и молекулы в различные вещества, определяет их химические и физические свойства. Это взаимодействие характеризуется силами упругости, трения, вязкости, магнитными силами. В частности, электромагнитное отталкивание молекул, находящихся на малых расстояниях, вызывает силу реакции опоры, в результате чего мы, например, не проваливаемся сквозь пол. Оно позволяет видеть окружающие нас предметы и тела, так как свет – одна из форм электромагнитного поля.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия является квант электромагнитного поля – *фотон*.

Сильное, или ядерное – самое мощное (оно в 100–1000 раз сильнее электромагнитного). Сильное взаимодействие обуславливает сильную связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и кварков в нуклонах. Оно обеспечивает исключительную прочность ядер, лежащую в основе стабильности вещества в земных условиях.

Сильное взаимодействие осуществляется с помощью ядерных сил, обладающих следующими свойствами:

1. Ядерные силы являются *силами притяжения*, т.к. они удерживают нуклоны внутри ядра (при очень тесном сближении нуклонов ядерные силы между ними имеют характер отталкивания).

2. Ядерные силы – это не электрические силы, т.к. они действуют не только между заряженными протонами, но и между нейтронами, не имеющими зарядов. Эти силы не являются гравитационными, т.к. слишком велики для объяснения гравитационных эффектов.

3. Радиус их действия $(1...2) \cdot 10^{-15}$ см. При увеличении расстояния интенсивность ядерного взаимодействия быстро ослабевает. Ядерные силы в

отличие от гравитационных и электромагнитных сил являются *короткодействующими*.

4. Ядерное взаимодействие протекает за время 10^{-23} с (в 100–1000 раз меньше времени электромагнитного взаимодействия).

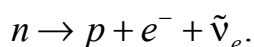
5. Один и тот же нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами ядра, а только с несколькими соседними.

Согласно современным представлениям, ядерное взаимодействие между нуклонами осуществляется при помощи π -мезонов, которые являются *квантами ядерного взаимодействия*. В процессе ядерного взаимодействия один нуклон испускает π -мезон, а другой поглощает его.

Переносчиками сильного взаимодействия между кварками являются глюоны. Глюоны взаимодействуют только с кварками и с другими глюонами.

Слабое взаимодействие – это распадное взаимодействие. Оно ответственно за все виды распада ядер (включая e -захват), за многие распады элементарных частиц и за процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Это наиболее медленное из всех взаимодействий, протекающих в микромире. Для радиоактивных атомных ядер, также распадающихся за счёт слабого взаимодействия, время жизни может достигать порядка 10^{10} лет.

Примером слабого взаимодействия является распад нейтрона, при котором он превращается в протон, электрон и электронное антинейтрино:



Впервые распад нейтрона был изучен экспериментально в 1950 г. одновременно в СССР (П.Е. Спиваком и его сотрудниками), США и Канаде.

Слабое взаимодействие присуще всем частицам, кроме фотонов, и не приводит к образованию связанных состояний, то есть не удерживает вместе какие-либо частицы. Оно отвечает за радиоактивность и существует между всеми частицами вещества со спином $1/2$, но в нем не участвуют частицы со спином $0, 1, 2$ (фотоны и гравитоны).

Слабое взаимодействие в миллион раз менее интенсивно, чем сильное (константа этого взаимодействия 10^{-14}). Оно действует между большинством элементарных частиц, находящихся друг от друга на расстоянии, меньшем 10^{-17} м. Слабым взаимодействием определяется радиоактивный распад урана, реакции термоядерного синтеза на Солнце.

Квантами слабого взаимодействия являются промежуточные векторные бозоны.

1.3.2. Теории объединения взаимодействий

Выявление общности обменного механизма всех взаимодействий стимулировало попытки учёных, свести четыре типа взаимодействий к одному всеобщему и универсальному. Такая попытка удалась в отношении электромагнитного и слабого взаимодействий.

1. *Теория электрослабого взаимодействия (теория Вайнберга-Салама).* В 1967 г. Ш. Глэшоу, А. Салам и С. Вайнберг создали теорию, согласно которой электромагнитное и слабое взаимодействия представляют собой проявление единого электрослабого взаимодействия, которое они описывают, используя понятия фотонов и векторных бозонов. Открытие W -бозонов и Z -бозонов в 1983 году на ускорителе Европейской организации ядерных исследований в Женеве стало первым подтверждением теории электрослабого взаимодействия. Таким образом, число фундаментальных взаимодействий сократилось до трех.

2. *Теории «Великого объединения» (GUT)* – группа теоретических моделей, описывающих единым образом сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия. Предполагается, что при чрезвычайно высоких энергиях (выше 10^{24} эВ) эти взаимодействия объединяются. Если до разработки GUT протоны, а следовательно, атомы и вещество в целом считались стабильными, то GUT-взаимодействия предсказали распад протона таким же образом, каким слабое взаимодействие приводит к распаду нейтрона. Если экспериментально будет обнаружен распад протона, то GUT получат подтверждение.

3. *Теории «Сверхвеликого объединения»* – в их основе лежит идея объединения всех четырёх фундаментальных взаимодействий (электромагнитного, сильного, слабого и гравитационного). Они объединяют пространственную симметрию общей теории относительности и внутреннюю симметрию GUT, связанную с квантовыми числами элементарных частиц, и вводят частицы – переносчики со спином $s = 2$ (гравитоны) и $s = \frac{3}{2}$ (гравитино).

Реализацией идеи «Сверхвеликого объединения» явилось создание теории суперструн М.Грина (Великобритания) и Дж.Шварца (США), описывающей протяжённые объекты-струны (пространственно одномерные отрезки с длиной 10^{-33} см). Предполагается, что на таких малых расстояниях должны проявляться 6 дополнительных пространственных измерений, которые в отличие от обычных четырёх компактифицированы (свёрнуты в точки, замкнуты, ограничены в определённых областях).

Суперструна – синоним понятия микрочастицы (или локализованного в пространстве объекта). Все частицы представляют собой определённое возбуждённое состояние суперструны.

Согласно этой теории фундаментальным объектом современной физики является квантованное суперструнное поле, возбуждениями которого

являются суперструны, взаимодействующие друг с другом и с вакуумом (возникающие и поглощающиеся в нём). Струны же, в свою очередь, порождают элементарные частицы. Эта теория ведёт к некоторым нетривиальным следствиям. Так, среди порождённых струнами элементарных частиц должны быть, по расчётам, гипотетические частицы – тахионы – движущиеся со скоростью, большей скорости света. Как следствие этой теории возникает и представление о «теневом мире». Оно объясняет открытый астрономами факт, что галактики и скопления галактик содержат большую массу невидимого вещества, в десятки раз превосходящую массу самих галактик.

1.3.3. Классы элементарных частиц. Взаимодействие элементарных частиц

В зависимости от вида взаимодействий элементарные частицы классифицируют на:

- фотоны, участвующие в электромагнитном взаимодействии;
- лептоны, участвующие в электромагнитном и слабом взаимодействиях;
- адроны, участвующие в электромагнитном, слабом и сильном взаимодействиях;
- частицы – переносчики взаимодействий.

В табл. 2 представлены некоторые сведения о свойствах элементарных частиц со временем жизни более 10^{-20} с.

Частицы в ней расположены в порядке возрастания массы. Кроме массы (в электронных массах), в таблице указаны также электрический заряд (в единицах элементарного заряда), момент импульса (**спин**) в единицах постоянной Планка $\hbar = h / 2\pi$ и среднее время жизни частицы.

В соответствии с их свойствами частицы подразделяют на три группы: фотоны, лептоны и адроны.

К первой группе относится единственная частица – **фотон**, которая является носителем электромагнитного взаимодействия. Масса покоя фотона равна нулю, поэтому скорость электромагнитных волн в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с) представляет собой предельную скорость распространения физического взаимодействия и является одной из фундаментальных физических постоянных.

Вторая группа элементарных частиц – лептоны.

Лептоны – это элементарные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.

Название «лептон» происходит от греч. *leptos* – тонкий, лёгкий, т.е. лептоны – частицы с малой массой. В самом деле, масса электрона, μ -мезона (мюона), а также электронного и мюонного нейтрино меньше масс всех остальных частиц. Однако в 1975 г. в группу лептонов была включена ещё одна частица, тоже не участвующая в сильном взаимодействии – тау-лептон (таон), масса которой почти вдвое больше массы протона.

Т а б л и ц а 2

Группа	Наименование частицы	Символ		Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни, с
		Частица	Античастица				
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	Стабилен
	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	Стабильно
Лептоны	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	Стабильно
	Тау-нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	1/2	Стабильно
	Электрон	e^-	e^+	1	-1 1	1/2	Стабилен
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8	-1 1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	3492	-1 1	1/2	$1,46 \cdot 10^{-12}$
	Пи-мезоны	π^+	π^-	264,1	0	0	$1,83 \cdot 10^{-16}$
Мезоны	К-мезоны	K^+	K^-	974,1	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	Эта-нуль-мезон	η^0		1074	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$
	Протон	p	\bar{p}	1836,1	1 -1	1/2	Стабилен
	Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6	0	1/2	898
	Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
	Сигма-гипероны	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1/2	$5,8 \cdot 10^{-20}$
Барiony	Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1 -1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
	Сигма-гипероны	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1 1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
	Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
	Кси-гипероны	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1 1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
	Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1 1	3/2	$8,2 \cdot 10^{-11}$

Лептоны разделяются на три дуплета (семейства): электрон e^- и электронное нейтрино ν_e ; мюон μ^- и мюонное нейтрино ν_μ ; таон τ^- и тау-нейтрино ν_τ .

Электрон является материальным носителем наименьшей массы в природе, равной $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и наименьшего отрицательного электрического заряда $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Мюоны имеют отрицательный заряд, равный заряду электрона. По своим свойствам они похожи на электроны, но в 207 раз тяжелее. Мюоны «живут» лишь две миллионных доли секунды, распадаясь на электрон и два нейтрино. Они широко распространены в природе, на их долю приходится значительная часть фонового космического излучения, регистрирующегося на поверхности Земли.

Масса сверхтяжелого тау-лептона в 3500 больше массы электрона. Он открыт на электрон-позитронном коллайдере SLAC (Стэнфорд, США). Тау-лептон тоже имеет отрицательный заряд, равный заряду электрона.

Соответствующие этим частицам три типа нейтрино – электронное, мюонное и тау-нейтрино – представляют собой легкие (возможно, безмассовые) электрически нейтральные частицы.

Нейтрино являются самыми распространёнными частицами во Вселенной. Они подвержены действию только слабых сил. Взаимодействие нейтрино с веществом ничтожно, потому эта частица легко проходит сквозь планету «не заметив» её. Ежесекундно каждый квадратный сантиметр земной поверхности пронзают 300000 нейтрино, летящих из космического пространства.

У всех лептонов имеются соответствующие античастицы: позитрон e^+ и электронное антинейтрино $\tilde{\nu}_e$; плюс-мюон μ^+ и мюонное антинейтрино $\tilde{\nu}_\mu$; плюс-таон τ^+ и таонное антинейтрино $\tilde{\nu}_\tau$.

Таким образом, всего существует 12 лептонов (6 частиц и 6 античастиц).

Нейтральные лептоны участвуют только в слабом взаимодействии, заряженные – в слабом и электромагнитном.

Все лептоны имеют спин, равный $1/2$, т.е. являются фермионами.

В настоящее время нет ни теоретических, ни экспериментальных данных, которые свидетельствовали бы о наличии какой-либо внутренней структуры у лептонов. Во всех возможных сейчас экспериментах, включая столкновения в ускорителях частиц с энергиями в десятки и сотни гигаэлектронвольт, лептоны всегда вступают в ядерные реакции как целые, неделимые объекты.

Всё это позволяет считать шестёрку лептонов (e^- и ν_e , μ^- и ν_μ , τ^- и ν_τ), а также их античастицы (e^+ и $\tilde{\nu}_e$, μ^+ и $\tilde{\nu}_\mu$, τ^+ и $\tilde{\nu}_\tau$) *истинно элементарными бесструктурными частицами.*

Самая многочисленная группа элементарных частиц – адроны (от греч. *hadros* – большой, сильный).

Адроны – это частицы, участвующие во всех фундаментальных взаимодействиях – гравитационном, электромагнитном, сильном и слабом.

В зависимости от значения спина адроны делятся на две подгруппы: *мезоны* с нулевым спином (бозоны) и *барионы* со спином 1/2 (фермионы). Только у омега-минус-гиперона спин равен 3/2.

Барионы, в свою очередь делятся на нуклоны и гипероны. У каждой из частиц есть соответствующая ей античастица, только эта-нуль-мезон полностью совпадает со своей античастицей, т.е. эта частица является абсолютно нейтральной.

Наиболее легкие из мезонов – положительно и отрицательно заряженные, а также нейтральные π -мезоны, имеют массы порядка 250 электронных масс (см. табл. 2). Они являются квантами ядерного поля, подобно тому, как фотоны являются квантами электромагнитного поля.

Самыми легкими из барионов являются нуклоны – протоны и нейтроны. Масса протона в 1836 раз превышает массу электрона и составляет $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Положительный заряд протона равен модулю заряда электрона. Нейтрон – электрически нейтральная частица, масса которой немного превышает массу протона. Из протонов и нейтронов построены все атомные ядра, *сильное взаимодействие* обуславливает связь этих частиц между собой. В сильном взаимодействии протон и нейтрон имеют одинаковые свойства и рассматриваются как два квантовых состояния одной частицы – *нуклона*.

Самый тяжёлый барион, открытый в 1964 г., – омега-минус-гиперон. Его масса составляет 3273 электронных масс.

Гипероны получили название *странных частиц*, поскольку оказалось, что прямого отношения к образованию вещества эти частицы не имеют. Предполагается, что странные частицы существовали на самой ранней стадии эволюции Вселенной. В дальнейшем нестабильные гипероны в процессе самопроизвольного распада превратились в протоны и нейтроны.

Адронов сотни, хотя стабильных частиц среди них очень мало. Обилие открытых и вновь открываемых адронов навело учёных на мысль, что все они построены из каких-то других более фундаментальных частиц. В 1964 г. американским физиком **Мюрреем Гелл-Манном** была выдвинута гипотеза, что *все адроны состоят из небольшого числа фундаментальных (бесструктурных) частиц*, названных **кварками**.

Кварки имеют необычный дробный электрический заряд, кратный $-1/3$ и $+2/3$. Они существуют только внутри адронов и не наблюдаются в свободном состоянии. Все кварки обладают спином, равным $1/2$. В настоящее время известны 6 типов кварков, названия которых происходят от английских слов: *u* (*up* – вверх), *d* (*down* – вниз), *c* (*charm* – очарование), *s* (*strange* – странный), *t* (*truth* – истина) и *b* (*beauty* – красота).

Адроны строятся из кварков следующим образом: мезоны состоят из пары «кварк – антикварк», барионы – из трёх кварков (антибарионы – из трёх антикварков). Например, пион π^+ имеет кварковую структуру $u\bar{d}$, пион π^- – $\bar{u}d$, каон K^+ – $d\bar{s}$, протон – uud , нейтрон – udd , Σ^+ -гиперон – uus и т.д.

Кварковая модель строения адронов подтвердилась в результате экспериментов, проведенных в конце 60-х – начале 70-х гг. XX в.

Кварки стали рассматриваться как новые истинно элементарные частицы для адронной формы материи.

Кварки участвуют в сильном взаимодействии. Сильное взаимодействие между кварками достигается за счёт обмена глюонами (от англ. *glue* – клей) – безмассовыми электрически нейтральными частицами со спином, равным 1.

Существуют теоретические и экспериментальные доводы в пользу того, что силы, действующие между кварками, не ослабевают с расстоянием, т.е. для отделения кварков друг от друга требуется бесконечно большая энергия или, иначе говоря, возникновение кварков в свободном состоянии невозможно. Возможно, что кварки выступают как последняя ступень дробления материи.

Бесструктурными элементарными частицами являются также **калибровочные бозоны** – частицы, посредством обмена которыми осуществляются взаимодействия.

К ним относятся:

- восемь **глюонов** – частиц, переносящих *сильное взаимодействие*;
- три **промежуточных векторных бозона** W^+ , W^- и Z^0 , переносящих *слабое взаимодействие*;
- фотон – калибровочный бозон *электромагнитного взаимодействия*;
- **гравитон** – гипотетическая частица, переносящая *гравитационное взаимодействие*.

Существование гравитонов пока не доказано экспериментально в связи с малой интенсивностью гравитационного взаимодействия.

Адроны и лептоны образуют вещество. Калибровочные бозоны – кванты разных видов излучения.

Малые размеры и массы элементарных частиц обуславливают квантовую специфику их поведения.

Важным свойством всех элементарных частиц является *способность их к взаимным превращениям*. Элементарные частицы способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться). Это относится также и к стабильным частицам только с той разницей, что превращения их происходят не самопроизвольно, а при взаимодействии с другими частицами.

На рис. 1. показан известный случай образования двух нейтральных частиц (K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона) в результате взаимодействия π^- -мезона с покоящимся протоном $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$, а затем распад каждой из образовавшихся частиц на две с зарядами разных знаков. Очевидно, что продолжение линии полета нейтральной частицы (пунктирные линии на рисунке) должно проходить между следами продуктов их распада.

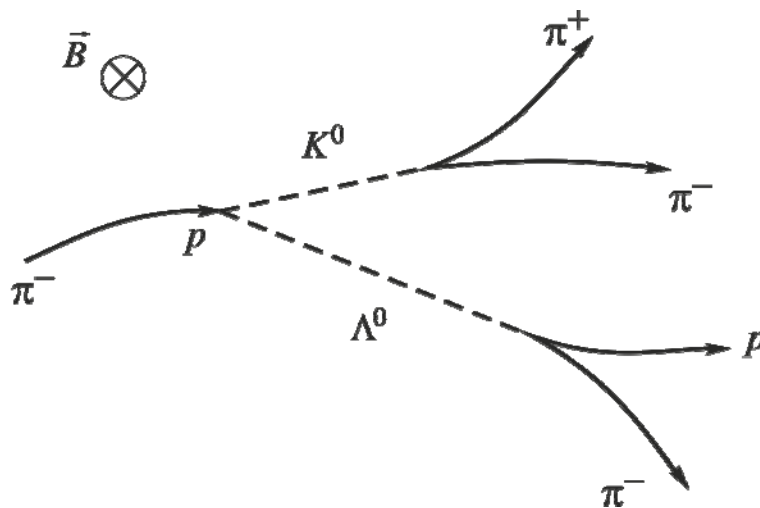


Рис. 1. Иллюстрация процессов взаимодействия и распада частиц

В 1933 г. французский физик **Фредерик Жолио Кюри** (1900–1958 гг.) экспериментально подтвердил предсказание Дирака, что *при столкновении частицы с античастицей они исчезают (аннигилируют, от лат. nihil – ничто), превращаясь в два (редко три) фотона*. Примером может служить аннигиляция электрона и позитрона, сопровождающаяся рождением двух фотонов большой энергии:

$${}^0_{-1}e + {}^0_1\tilde{e} \rightarrow \gamma + \gamma.$$

В том же 1933 г. Фредерик и Ирэн Жолио Кюри обнаружили обратный процесс – **рождение электронно-позитронных пар при прохождении гамма-кванта большой энергии вблизи атомного ядра**:

$$\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_1\tilde{e}.$$

Процессы распада и рождения новых частиц происходят в соответствии с законами сохранения заряда, массы, импульса, энергии, спина и др.

Например, **закон сохранения заряда** требует, чтобы *заряд распадающейся частицы равнялся суммарному заряду продуктов распада*.

Закон сохранения импульса утверждает, что *вектор импульса распадающейся частицы равен векторной сумме импульсов продуктов распада*.

Например, при распаде одной частицы на две (рис. 2) математическое выражение закона сохранения импульса имеет вид:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2,$$

или, в проекциях на оси координат:

$$\begin{cases} ox: & p = p_1 \cdot \cos \varphi_1 + p_2 \cdot \cos \varphi_2; \\ oy: & 0 = p_1 \cdot \sin \varphi_1 + p_2 \cdot \sin \varphi_2, \end{cases}$$

где p – величина импульса распадающейся частицы; p_1 и p_2 – величины импульсов продуктов распада; φ_1 и φ_2 – углы их разлета (с учетом правила отсчета углов, т.е. $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 < 0$).

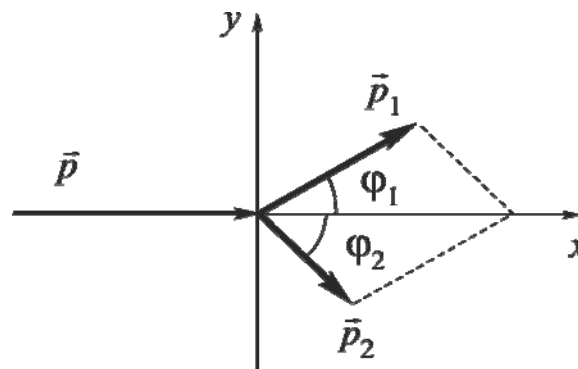


Рис. 2. Иллюстрация к закону сохранения импульса

Выражение закона сохранения энергии для такого распада записывают в виде:

$$E = E_1 + E_2,$$

где E – полная энергия распадающейся частицы. Согласно теории относительности полная энергия частицы может быть выражена через энергию покоя $E_0 = m_0 c^2$ и импульс частицы:

$$E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} \quad \text{или} \quad E = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2},$$

где c – скорость света в вакууме. Аналогично для продуктов распада:

$$E_1 = \sqrt{(m_{10} c^2)^2 + (p_1 c)^2} \quad \text{или} \quad E_1 = \sqrt{E_{10}^2 + (p_1 c)^2},$$

$$E_2 = \sqrt{(m_{20} c^2)^2 + (p_2 c)^2} \quad \text{или} \quad E_2 = \sqrt{E_{20}^2 + (p_2 c)^2}.$$

Используя эти и другие законы сохранения при исследовании траекторий частиц и продуктов их распада, можно рассчитать характеристики частиц (среднее время жизни, массу, заряд и др.).

Если трековый прибор, т.е. *устройство, которое тем или иным способом фиксирует траекторию движения частицы*, поместить в магнитное поле, то по кривизне траектории (трека) частицы можно определить знак её заряда. Известно, что искривление траектории заряженной частицы в магнитном поле обусловлено действием на неё силы Лоренца, направление которой зависит от знака заряда частицы. Нейтральная частица в магнитном поле движется прямолинейно.

Действующие в мире элементарных частиц законы сохранения не допускают возможности возникновения одиночных частиц. Во всех экспериментах с античастицами их возникновение наблюдается только в парах с частицами.

1.4. Нуклонный уровень

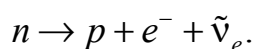
1.4.1. Атомное ядро. Ядерная энергия

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов (нуклонов). Протонно-нейтронная модель ядра была предложена в 1932 г. российским физиком **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904–1994 гг.) и немецким физиком **Вернером Гейзенбергом**.

Протон p имеет положительный заряд $+e$, равный модулю заряда электрона. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона.

Электрический заряд нейтрона n равен нулю, а масса нейтрона практически одинакова с массой протона.

В свободном состоянии нейтрон нестабилен (радиоактивен) – он самопроизвольно распадается, превращаясь в протон и испуская электрон e^- и электронное антинейтрино $\tilde{\nu}_e$



Период полураспада (т.е. время, за которое распадается половина первоначального количества нейтронов) равен примерно 12 мин.

Масса антинейтрино равна нулю. Поскольку масса нейтрона больше массы протона на $2,5m_e$, следовательно, масса нейтрона превышает суммарную массу частиц, фигурирующих в правой части данного уравнения, на $1,5m_e$, т.е. на 0,77 МэВ. Эта энергия выделяется при распаде нейтрона в виде кинетической энергии образующихся частиц.

Ядро простейшего атома – атома водорода – состоит из одной элементарной частицы, называемой протоном.

Характеристики атомного ядра:

1) *Зарядовое число*. Оно равно числу протонов в ядре и определяет его заряд, равный $+Z_e$. Зарядовое число равно порядковому номеру химического элемента в периодической таблице элементов Д.И. Менделеева.

2) *Массовое число* A . Оно равно общему числу нуклонов (т.е. протонов и нейтронов) в ядре. Число нейтронов в ядре $N = A - Z$. Для обозначения ядер применяется символ A_ZX , где X – химический символ данного элемента.

Общее название атомных ядер, отличающихся числами A и Z , – **нуклиды**. *Нуклиды с различными массовыми и одинаковыми зарядовыми числами называются изотопами*. Изотопы являются ядрами одного и того же химического элемента.

Большинство химических элементов имеет несколько стабильных изотопов. Например, у кислорода имеется три стабильных изотопа: ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$; у олова – десять. Водород имеет три изотопа: ${}^1_1\text{H}$ – обычный водород, или протий ($Z = 1, N = 0$); ${}^2_1\text{H}$ – тяжелый водород, или дейтерий ($Z = 1, N = 1$); ${}^3_1\text{H}$ – тритий ($Z = 1, N = 2$). Протий и дейтерий стабильны, тритий радиоактивен.

Ядра с одинаковым массовым числом A называются *изобарами* (${}^{40}_{18}\text{Ar}$ и ${}^{40}_{20}\text{Ca}$).

Наконец, существуют радиоактивные ядра с одинаковыми Z и A , различающиеся периодом полураспада. Они называются *изомерами*. Например, существует два изомера ядра ${}^{80}_{35}\text{Br}$; у одного из них период полураспада равен 18 мин, у другого – 4,4 ч.

Известно около 1500 ядер, различающихся либо Z , либо A , либо тем и другим. Примерно 1/5 часть всех этих ядер устойчивы, остальные – радиоактивны. Многие ядра были получены искусственным путем с помощью ядерных реакций.

В природе встречаются элементы с атомным номером Z от 1 до 92, исключая технеций ($\text{Tc}, Z = 43$) и прометий ($\text{Pm}, Z = 61$). Плутоний ($\text{Pu}, Z = 94$) после получения его искусственным путем был обнаружен в ничтожных количествах в природном минерале – смоляной обмазке. Остальные трансурановые (т.е. заурановые) элементы (с Z от 93 до 107) были получены искусственным путем посредством различных ядерных реакций.

Размер ядра

В первом приближении ядро можно считать шаром, радиус которого довольно точно определяется формулой

$$r = 1,3 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \text{ см} = 1,3 A^{1/3} \text{ ферми.}$$

(ферми – название применяемой в ядерной физике единицы длины, равной 10^{-15} м).

Из этой формулы следует, что объем ядра пропорционален числу нуклонов в нем. Таким образом, плотность вещества во всех ядрах примерно одинакова.

Масса и энергия связи ядра

Масса ядра $m_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом. Энергия покоя частицы связана с ее массой соотношением $E_0 = mc^2$. Следовательно, энергия покоящегося ядра меньше суммарной энергии невзаимодействующих покоящихся нуклонов на величину

$$E_{\text{св}} = c^2 \{ [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \}.$$

Эта величина и есть энергия связи нуклонов в ядре. Она равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом.

В формуле для вычисления энергии связи массу протона m_p можно заменить массой атома водорода m_{H} , а массу ядра $m_{\text{я}}$ – массой атома $m_{\text{а}}$. Действительно, если пренебречь сравнительно ничтожной энергией связи электронов с ядрами, указанная замена будет означать добавление к уменьшаемому и вычитаемому выражению, стоящему в фигурных скобках, одинаковой величины, равной Zm_e . Тогда

$$E_{\text{св}} = c^2 \{ [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n] - m_{\text{а}} \}.$$

Этой формулой пользоваться удобнее, так как в таблицах обычно даются не массы ядер, а массы атомов.

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, т.е. $E_{\text{св}}/A$, называется удельной энергией связи нуклонов в ядре.

Величина

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}}$$

называется дефектом массы ядра. Дефект массы связан с энергией связи соотношением

$$\Delta m = E_{\text{св}}/c^2.$$

Вычислим энергию связи нуклонов в ядре ${}^4_2\text{He}$, в состав которого входят 2 протона ($Z = 2$) и 2 нейтрона ($N = 2$).

Масса атома ${}^4_2\text{He}$ равна 4,00260 а.е.м., чему соответствует 3728,0 МэВ.

Масса атома водорода ${}^1_1\text{H}$ равна 1,000815 а.е.м. (938,7 МэВ). Масса нейтрона равна 939,57 МэВ. Тогда $E_{\text{св}} = (2 \cdot 938,7 + 2 \cdot 939,5) - 3728 = 24,8$ МэВ.

В расчете на 1 нуклон энергия связи ядра гелия составляет 7,1 МэВ. Для сравнения укажем, что энергия связи валентных электронов в атомах имеет величину, в 10^6 раз меньшую (порядка 10 эВ). Для других ядер удельная энергия связи, т.е. энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон $E_{\text{св}}/A$, имеет примерно такую же величину, как у гелия.

На рис. 3 изображен график, показывающий зависимость удельной энергии связи $E_{\text{св}}/A$ от массового числа A . Из рисунка видно, что сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами порядка 50–60 (т.е. для элементов от Cr до Zn).

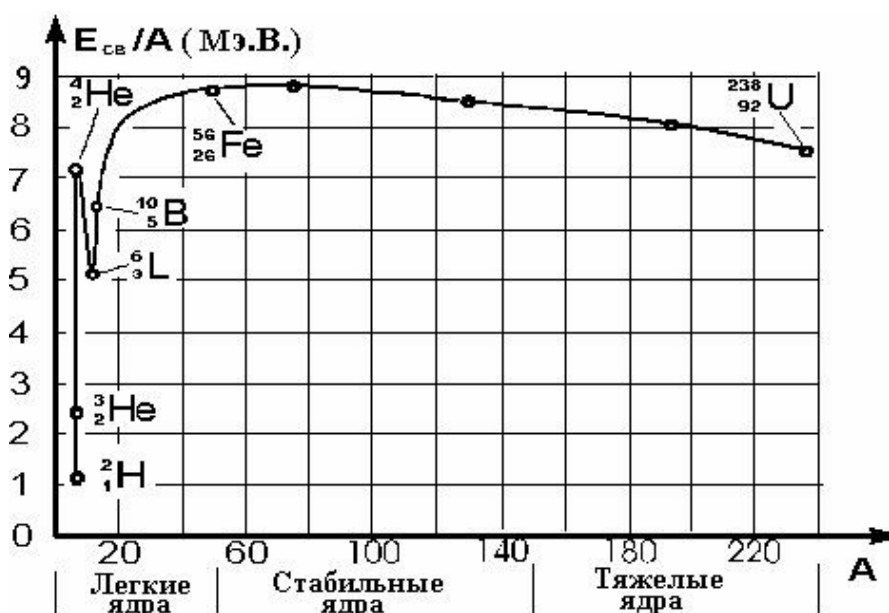


Рис. 3

Энергия связи для этих ядер достигает 8,7 МэВ/нуклон. С ростом A удельная энергия связи постепенно уменьшается; для самого тяжелого природного элемента – урана – она составляет 7,5 МэВ/нуклон.

Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможным два процесса:

- 1) деление тяжелых ядер на несколько более легких ядер;
- 2) слияние (синтез) легких ядер в одно ядро.

Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Так, например, деление одного ядра с массовым числом $A = 240$ (удельная энергия связи 7,5 МэВ) на два ядра с массовыми числами $A = 120$ (удельная энергия связи 8,5 МэВ) привело бы к высвобождению

дению энергии 240 МэВ. Слияние двух ядер тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$ в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ привело бы к выделению энергии, равной 24 МэВ. Для сравнения укажем, что при соединении одного атома кислорода с двумя атомами углерода (сгорание угля до CO_2) выделяется энергия порядка 5 МэВ.

Ядра со значениями массового числа A от 50 до 60 являются энергетически более выгодными. В связи с этим возникает вопрос: почему ядра с иными значениями A являются стабильными? Ответ заключается в следующем. Для того чтобы разделиться на несколько частей, тяжелое ядро должно пройти через ряд промежуточных состояний, энергия которых превышает энергию основного состояния ядра. Следовательно, для процесса деления ядер требуется дополнительная энергия (энергия активации), которая затем возвращается обратно, приплюсовываясь к энергии, выделяющейся при делении за счет изменения энергии связи. В обычных условиях ядру неоткуда взять энергию активации, вследствие чего тяжелые ядра не претерпевают спонтанного деления. Энергия активации может быть сообщена тяжелому ядру захваченным или дополнительным нейтроном.

Процесс деления ядер урана или плутония под действием захватываемых ядрами нейтронов лежит в основе действия ядерных реакторов и обычной атомной бомбы.

Что касается легких ядер, то для слияния их в одно ядро они должны подойти друг к другу на весьма близкое расстояние (10^{-15} м). Такому сближению ядер препятствует кулоновское отталкивание между ними. Для того чтобы преодолеть это отталкивание, ядра должны двигаться с огромными скоростями, соответствующими температурам порядка нескольких сотен миллионов Кельвин.

По этой причине процесс синтеза легких ядер называется *термоядерной реакцией*.

Термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и звезд. В земных условиях пока были осуществлены неуправляемые термоядерные реакции при взрывах водородных бомб. Ученые ряда стран настойчиво работают над изысканием способов осуществления управляемого термоядерного синтеза.

Модели атомного ядра

Попытки построения теории ядра наталкиваются на две серьезные трудности: недостаточность знаний о силах, действующих между нуклонами; чрезвычайную громоздкость квантовой задачи многих тел (ядро с массовым числом A представляет собой систему из A тел). Эти трудности вынуждают идти по пути создания ядерных моделей, позволяющих описывать с помощью сравнительно простых математических средств определенную совокупность свойств ядра. Ни одна из подобных моделей не может дать исчерпывающего описания ядра. Поэтому приходится

пользоваться несколькими моделями, каждая из которых описывает свою совокупность свойств ядра и свой круг явлений. В каждой модели содержатся произвольные параметры, значения которых подбираются так, чтобы получить согласие с экспериментом.

Капельная модель ядра предложена Я.И. Френкелем в 1939 г. и развита затем Н. Бором и другими учеными. Френкель обратил внимание на сходство атомного ядра с капелькой жидкости, заключающееся в том, что в обоих случаях силы, действующие между составными частями – молекулами в жидкости и нуклонами в ядре – являются короткодействующими. Кроме того, практически одинаковая плотность вещества в разных ядрах свидетельствует о крайне малой сжимаемости ядерного вещества. Столь же малой сжимаемостью обладают и жидкости. Указанное сходство дало основание уподобить ядро заряженной капельке жидкости.

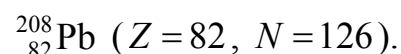
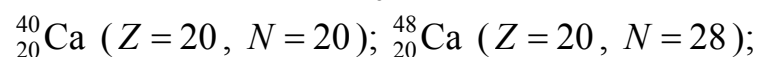
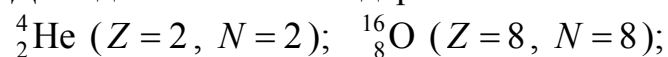
Капельная модель позволила вывести полуэмпирическую формулу для энергии связи частиц в ядре. Кроме того, эта модель помогла объяснить многие явления, в частности, процесс деления тяжелых ядер.

Оболочная модель ядра была развита Марией Гёпперт-Майер и другими учеными. В этой модели нуклоны считаются движущимися независимо друг от друга в усредненном нейтрально-симметричном поле. В соответствии с этим имеются дискретные энергетические уровни, заполняемые нуклонами с учетом принципа Паули. Эти уровни группируются в оболочки, в каждой из которых может находиться определенное число нуклонов. Полностью заполненная оболочка образует особо устойчивое образование.

В соответствии с опытом, особо устойчивыми оказываются ядра, у которых число протонов либо число нейтронов (либо оба этих числа) равно: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Эти числа получили название *магических*.

Ядра, у которых число протонов Z или число нейтронов N является магическим (т.е. особо устойчивые ядра), также называются магическими. Ядра, у которых магическими являются и Z , и N , называются дважды магическими.

Дважды магических ядер известно всего пять:



Эти ядра особенно устойчивы. В частности, особая устойчивость ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ проявляется в том, что это единственная составная частица, испускаемая тяжелыми ядрами при радиоактивном распаде (она называется α -частицей).

1.4.2. Ядерные силы

Огромная энергия связи нуклонов в ядре указывает на то, что между нуклонами имеется очень интенсивное взаимодействие. Это взаимодействие носит характер притяжения. Оно удерживает нуклоны на расстояниях 10^{-15} м друг от друга, несмотря на сильное кулоновское отталкивание между протонами. Ядерное взаимодействие между нуклонами получило название *сильного взаимодействия*. Его можно описать с помощью поля ядерных сил.

Отличительные особенности ядерных сил:

1. Ядерные силы являются короткодействующими. Их радиус действия имеет порядок 10^{-15} м. На расстояниях, существенно меньших 10^{-15} м, притяжение нуклонов сменяется отталкиванием.

2. Сильное взаимодействие не зависит от зарядов нуклонов. Ядерные силы, действующие между двумя протонами, протоном и нейтроном и двумя нейтронами, имеют одинаковую величину. Это свойство называется *зарядовой независимостью ядерных сил*.

3. Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Так, например, нейтрон и протон удерживаются вместе, образуя ядро тяжелого водорода – дейтрон (или дейтон) только в том случае, если их спины параллельны друг другу.

4. Ядерные силы не являются центральными. Их нельзя представлять направленными вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов. Нецентральность ядерных сил вытекает, в частности, из того факта, что они зависят от ориентации спинов нуклонов.

5. Ядерные силы обладают свойством насыщения (это означает, что каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов). Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре при увеличении числа нуклонов не растет, а остается примерно постоянной. Кроме того, на насыщение ядерных сил указывает также пропорциональность объема ядра числу образующих его нуклонов.

По современным представлениям, сильное взаимодействие обусловлено тем, что нуклоны виртуально обмениваются *π-мезонами*. Для того чтобы уяснить сущность этого процесса, рассмотрим прежде, как выглядит электромагнитное взаимодействие с точки зрения квантовой электродинамики.

Взаимодействие между заряженными частицами осуществляется через электромагнитное поле. Мы знаем, что это поле может быть представлено как совокупность фотонов. Согласно представлениям квантовой электродинамики процесс взаимодействия между двумя заряженными частицами, например, электронами, заключается в обмене фотонами. Каждая частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Действие поля на другую частицу проявляется в результате поглощения ею

одного из фотонов, испущенных первой частицей. Такое описание взаимодействия нельзя понимать буквально.

Фотоны, посредством которых осуществляется взаимодействие, являются не обычными реальными фотонами, а виртуальными. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования. В этом смысле виртуальные частицы можно назвать воображаемыми.

Чтобы лучше понять смысл термина «виртуальный», рассмотрим покоящийся электрон. Процесс создания им в окружающем пространстве поля можно представить уравнением

$$e^- \rightleftharpoons e^- + h\nu.$$

Суммарная энергия фотона и электрона больше, чем энергия покоящегося электрона. Следовательно, превышение, описываемое этим уравнением, сопровождается нарушением закона сохранения энергии. Однако для виртуального фотона это нарушение является кажущимся. Согласно квантовой механике энергия состояния, существующего в течение времени Δt , оказывается определенной лишь с точностью ΔE , удовлетворяющей соотношению неопределенности

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

Из этого соотношения вытекает, что энергия системы может претерпевать отклонения ΔE , длительность которых Δt не должна превышать значения, определяемого условием: $e^- \rightleftharpoons e^- + h\nu$.

Следовательно, если испущенный электроном виртуальный фотон будет поглощен этим же или другим электроном до истечения времени $\Delta t = \frac{h}{\varepsilon}$ (где $\varepsilon = h\nu$), то нарушение закона сохранения энергии не может быть обнаружено.

При сообщении электрону дополнительной энергии (это происходит например, при соударении его с другим электроном) вместо виртуального может быть испущен реальный фотон, время существования которого неограниченно.

За определенное условием ($e^- \rightleftharpoons e^- + h\nu$) время $\Delta t = \frac{h}{\varepsilon}$ виртуальный фотон может передать взаимодействие между точками, разделенными расстоянием $l = c\Delta t = \frac{ch}{\varepsilon}$.

Энергия фотона $\varepsilon = h\nu$ может быть сколь угодно мала (частота ν может изменяться от 0 до ∞). Поэтому радиус действия электромагнитных сил является неограниченным. Если бы частицы, которыми обмениваются

электроны, имели отличную массу от нуля массу m , то радиус действия соответствующих сил был бы ограничен величиной

$$r = c\Delta t_{\max} = \frac{ch}{\epsilon_{\min}} = \frac{h}{mc} = \lambda_0,$$

где λ_0 – комптоновская длина волны данной частицы. Мы предположили, что частица – переносчик взаимодействия – движется со скоростью c .

В 1934 г. И.Е. Тамм высказал предположение, что взаимодействие между нуклонами также передается посредством каких-то виртуальных частиц. В то время кроме нуклонов были известны лишь фотон, электрон, позитрон и нейтрино. Самая тяжелая из этих частиц – электрон – обладает комптоновской длиной волны $\lambda_0 = 3,86 \cdot 10^{-11}$ см, на два порядка превышающей радиус действия ядерных сил. Кроме того, величина сил, которые могли быть обусловлены виртуальными электронами, как показали расчеты, оказалась чрезвычайно малой. Таким образом, первая попытка объяснения ядерных сил с помощью обмена виртуальными частицами оказалась неудачной.

В 1935 г. Юкава высказал смелую гипотезу о том, что в природе существуют пока не обнаруженные частицы с малой массой, в 200–300 раз большей массы электрона, и что эти-то частицы и выполняют роль переносчиков ядерного взаимодействия подобно тому, как фотоны являются переносчиками электромагнитного взаимодействия. Юкава назвал эти гипотетические частицы тяжелыми фотонами. В связи с тем, что по величине массы эти частицы занимают промежуточное положение между электронами и нуклонами, они впоследствии были названы *мезонами* (от греч. mesos – средний).

В 1936 г. Андерсон и Неддермейер обнаружили в космических лучах частицы с массой, равной $207m_e$. Вначале полагали, что эти частицы, получившие название μ -мезонов, или мюонов, и есть переносчики взаимодействия, предсказанные Юкавой. Однако впоследствии выяснилось, что мюоны очень слабо взаимодействуют с нуклонами, так что не могут быть ответственными за ядерные взаимодействия. Только в 1947 г. Пауэлл и Оккиалини открыли в космическом излучении еще один тип мезонов – так называемые π -мезоны, или пионы, которые оказались носителями ядерных сил, что было предсказано за 12 лет до того Юкавой.

Существуют положительный (π^+), отрицательный (π^-) и нейтральный (π^0) мезоны. Заряд π^+ и π^- -мезонов равен элементарному заряду e . Масса заряженных мезонов одинакова и равна $273m_e$ (140 МэВ), масса π^0 -мезона равна $264m_e$ (135 МэВ). Спин как заряженных, так и нейтрального π -мезона равен нулю ($s = 0$). Все три частицы нестабильны. Время жизни π^+ и π^- -мезонов составляет $2,60 \cdot 10^{-8}$ с, π^0 -мезона – $0,8 \cdot 10^{-16}$ с.

Подавляющая часть заряженных π -мезонов распадается по схеме

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu},$$

где μ^+ и μ^- – положительный и отрицательный мюоны; ν – нейтрино; $\tilde{\nu}$ – антинейтрино.

В среднем 2,5 распада из миллиона протекают по другим схемам (например, $\pi \rightarrow e + \nu$, $\pi \rightarrow \pi^0 + e + \nu$ и т.п., причем в случае π^+ образуется e^+ , т.е. позитрон, а в случае π^- возникает e^- , т.е. электрон).

В среднем 98,8 % π^0 -мезонов распадаются на два γ -кванта; $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$.

Остальные 1,2 % распадов осуществляются по схемам:

$$\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma, \quad \pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma.$$

Частицы, называемые μ -мезонами, или мюонами, принадлежат к классу лептонов, а не мезонов. Поэтому в дальнейшем мы будем называть их мюонами. Мюоны имеют положительный (μ^+) или отрицательный (μ^-) заряд, равный элементарному заряду e (нейтрального мюона не существует). Масса мюона равна $207m_e$ (106 МэВ), спин – половине ($s = 1/2$).

Мюоны, как и π -мезоны, нестабильны, они распадаются по схеме:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \tilde{\nu}, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu + \tilde{\nu}.$$

Время жизни обоих мюонов одинаково и равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с.

Обратимся к рассмотрению обменного взаимодействия между нуклонами. В результате виртуальных процессов

$$p \rightleftharpoons n + \pi^+, \quad n \rightleftharpoons p + \pi^+, \quad p \rightleftharpoons p + \pi^0, \quad n \rightleftharpoons n + \pi^0$$

нуклон оказывается окруженным облаком виртуальных π -мезонов, образующих поле ядерных сил. Поглощение этих мезонов другими нуклонами приводит к сильному взаимодействию между нуклонами, которое осуществляется по одной из следующих схем (рис. 4).

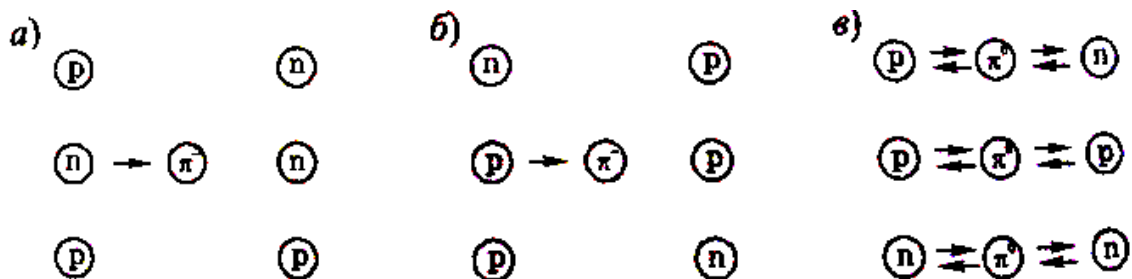
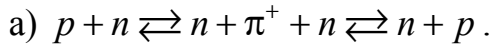
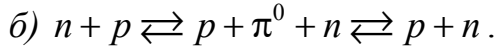


Рис. 4

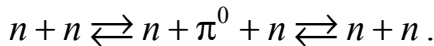
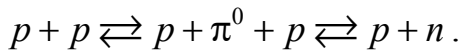
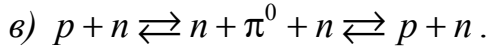


Протон испускает виртуальный π^+ -мезон, превращаясь в нейтрон. Мезон поглощается нейтроном, который вследствие этого превращается в протон. Затем такой же процесс протекает в обратном направлении.

Каждый из взаимодействующих нуклонов часть времени проводит в заряженном состоянии, а часть – в нейтральном (рис. 4а).



Нейтрон и протон обмениваются π^0 -мезонами (рис. 4б).



Нуклоны обмениваются π^0 -мезонами (рис. 4в).

Первый из трех описанных выше процессов находит экспериментальное подтверждение в рассеянии нейтронов на протонах. При прохождении пучка нейтронов через водород в этом пучке появляются протоны, многие из которых имеют ту же энергию и направление движения, что и падающие нейтроны. Соответствующее число практически появляющихся нейтронов обнаруживается в мишени.

Совершенно невероятно, чтобы такое большое число нейтронов полностью передавало свой импульс ранее покоившимся протонам в результате лобовых ударов. Поэтому приходится признать, что часть нейтронов, пролетая вблизи протонов, захватывает один из виртуальных π^+ -мезонов. В результате протон превращается в нейтрон (рис. 5).



Рис. 5

Если нуклону сообщить энергию, эквивалентную массе π -мезона, то виртуальный π -мезон может стать реальным. Необходимая энергия может быть сообщена при столкновении достаточно ускоренных нуклонов (или ядер) либо при поглощении нуклонами γ -кванта. При очень больших энергиях соударяющихся частиц может возникнуть несколько реальных π -мезонов.

Радиоактивность

С устойчивостью ядра связано понятие **радиоактивности**.

Под радиоактивностью понимают способность некоторых ядер самопроизвольно распадаться, превращаясь в ядра других элементов.

Естественная радиоактивность была открыта в 1896 г. французским ученым Беккерелем.

Радиоактивный распад сопровождается радиоактивным излучением. Оно имеет сложный состав: α -излучение – поток ядер гелия; β -излучение – поток электронов; γ -излучение – поток электромагнитных волн с малой длиной волны.

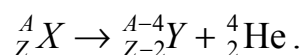
В процессе распада число ядер радиоактивного вещества уменьшается. **Активность нуклида** характеризуется числом ядер, распадающихся в единицу времени. С течением времени t число нераспавшихся ядер N уменьшается по экспоненциальному закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где λ – постоянная радиоактивного распада данного элемента; N_0 – первоначальное количество ядер.

Периодом полураспада радиоактивного изотопа называется величина, равная среднему времени распада половины из первоначально имевшихся ядер.

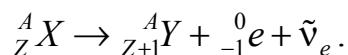
Альфа-распад сопровождается испусканием α -частиц (ядер гелия ${}^4_2\text{He}$). Распад протекает по следующей схеме:



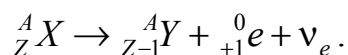
Буквой X обозначен химический символ распадающегося (материнского) ядра, буквой Y – химический символ образующегося (дочернего) ядра.

Бета-распад сопровождается испусканием β -частиц (электронов). Существуют три разновидности β -распада. В одном случае ядро, претерпевающее превращение, испускает электрон, в другом – позитрон. В третьем случае, называемом электронным захватом (e -захватом), ядро поглощает один из электронов K -оболочки, значительно реже L - или M -оболочки (соответственно говорят о K -захвате или M -захвате).

Первый вид распада (β -распад или электронный распад) протекает по схеме

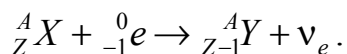


Второй вид распада (β^+ -распад или позитронный распад) протекает по схеме



Третий вид β -распада (электронный захват) заключается в том, что ядро поглощает один из K -электронов (реже один из L - или M -электронов) своего атома, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$. Возникшее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Переходя затем в более низкие

энергетические состояния, оно испускает γ -фотоны. Схема процесса выглядит следующим образом:



Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникают рентгеновские лучи. Электронный захват легко обнаруживается по сопровождающему его рентгеновскому излучению. Именно этим путем и был открыт K -захват американским физиком Альваресом в 1937 г.

Явление радиоактивности в природе далеко не так редко и исключительно, как это обычно принято считать. Больше половины элементов таблицы Менделеева имеют естественные радиоактивные изотопы. Они встречаются всюду – в воде, в воздухе, в почве, в тканях растений и животных, в продуктах питания и в составе человеческого организма. Энергия радиоактивного распада урана и тория является одним из основных источников внутренней энергии Земли. Многие природные процессы: горообразование, движение материков, извержения вулканов и землетрясения обусловлены в конечном счёте радиоактивностью земных пород.

Атомные ядра при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом претерпевают превращения, которые называются **ядерными реакциями**. Наибольшее практическое значение имеют ядерные реакции с участием нейтронов. Нейтроны не испытывают электрического отталкивания и могут легко проникать в ядра, вызывая ядерные реакции. Например, тяжёлые ядра под действием нейтронов делятся на более лёгкие и испускают **вторичные нейтроны**. Такое превращение сопровождается выделением энергии. Вторичные нейтроны могут вызывать деление других тяжёлых ядер. Это обуславливает возможность **цепной ядерной** реакции. В зависимости от энергии нейтроны подразделяют на быстрые и медленные. Медленные нейтроны эффективны для возбуждения ядерных реакций, так как они относительно долго находятся вблизи ядра. И вероятность их захвата ядром с последующей реакцией распада велика.

Цепная реакция может быть **неуправляемой**, если поток нейтронов не регулируется (например, взрыв атомной бомбы), и **управляемой**, если поток нейтронов регулируется специальными поглотителями (в атомном реакторе). Управляемая цепная реакция используется как высокоэффективный источник ядерной энергии в промышленных масштабах. Радиоактивные материалы, обеспечивающие протекание управляемой реакции, называются ядерным топливом (например, уран, плутоний).

Другой тип ядерной реакции, которая может служить источником энергии, – это **реакция синтеза** атомных ядер. В результате синтеза из лёгких ядер образуются более тяжёлые. *Реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых.* В связи с этим активно исследуются различные возможности осуществления **управ-**

ляемых реакций ядерного синтеза. Слияние ядер происходит под действием сил ядерного притяжения. Поэтому ядра должны сблизиться до расстояний, меньших 10^{-15} м. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Для его преодоления ядра должны обладать кинетической энергией, превышающей потенциальную энергию их кулоновского отталкивания. Необходимую энергию обеспечивает очень высокая температура реакционной среды – выше 10^8 К. Поэтому реакции ядерного синтеза называют **термоядерными реакциями.**

Рабочим веществом для термоядерных реакций является **высокотемпературная плазма** – *сильно разогретый и сильно ионизированный газ.*

Природные термоядерные реакции протекают в звёздах. Солнце является гигантским термоядерным реактором.

1.5. Атомный уровень

1.5.1. Структура атома

Большую роль в установлении структуры атома сыграло открытие и изучение радиоактивности. Кроме того, на рубеже XIX–XX вв. были открыты такие явления, как фотоэффект, катодные лучи, рентгеновские лучи. Эти открытия свидетельствовали о сложной структуре атома.

Первую модель атома предложил английский физик Дж. Томсон в 1898 году. Согласно модели Томсона атом представляет собой положительно заряженный шарик радиусом порядка 10^{-10} м, в который вкраплены отдельные колеблющиеся электроны.

Экспериментальная проверка модели Томсона была осуществлена в 1911 г. английским физиком Э. Резерфордом. Резерфорд использовал для этой цели поток быстрых положительно заряженных α -частиц, испускаемых радиоактивным веществом (например, полонием) и имеющих заряд $+2e$ и массу, равную $6,64 \cdot 10^{-27}$ кг. Пропуская пучок α -частиц через тонкую золотую фольгу, Резерфорд обнаружил, что некоторая часть частиц отклоняется на довольно значительный угол от первоначального направления, а часть даже отражается от фольги.

Этот результат был совершенно непонятен в рамках модели Томсона, так как положительный заряд атома, равномерно распределенный по всему его объему, не мог оказать столь значительного воздействия на массивные и быстрые α -частицы.

Обобщая результаты опытов, Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель строения атома, в которой атом представлен в виде миниатюрной Солнечной системы. Согласно этой модели, весь положительный заряд и почти вся масса атома (99,4 %) сосредоточены в атомном ядре. Размер ядра (10^{-15} м) ничтожно мал по сравнению с размером атома

(10^{-10} м). Вокруг ядра по замкнутым эллиптическим орбитам, которые в первом приближении можно считать круговыми, движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Заряд ядра равен суммарному заряду электронов. Поэтому в нормальном состоянии атом электронейтрален.

Электроны на своих орбитах удерживаются силами электростатического притяжения к ядру. Каждый из электронов обладает определенным запасом энергии: чем дальше электрон находится от ядра, тем больше его энергия.

Число электронов в атоме равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева.

Однако предложенная Резерфордом модель строения атома не объяснила спектральных закономерностей и даже оказалась в противоречии с законами классической механики и электродинамики.

В самом деле, движение электрона по орбите, как и всякое криволинейное движение, является движением с ускорением. Согласно законам классической электродинамики криволинейное движение должно сопровождаться излучением света соответствующей частоты. Следовательно, при движении электрона вокруг ядра атом должен непрерывно излучать энергию.

Но уменьшение энергии приводит к уменьшению радиуса орбиты электрона – электрон должен двигаться по спирали, приближаясь к ядру. А так как скорость движения электрона остается неизменной, то должна увеличиться и круговая частота его вращения, непрерывно должна расти частота излучения, т.е. спектр излучения должен быть сплошным. Непрерывно приближаясь к ядру, электрон через малое время должен упасть на ядро, т.е. в модели Резерфорда атом является неустойчивой системой.

В действительности же атомы весьма устойчивы и имеют линейчатые, а не сплошные спектры излучения.

1.5.2. Спектр атома водорода. Серийные формулы

Изучать внутреннее состояние атома непосредственно невозможно из-за малости его размеров. Структура атома проявляется только косвенно в явлениях, связанных с его внутренним строением. К числу этих явлений относится *излучение*.

При изучении излучения элементов ученым удалось установить общие закономерности в характере спектров и найти ряд эмпирических законов, которым они подчиняются. Было установлено, что спектральные линии всех элементов можно разбить на ряд серий. Структуры соответствующих серий, относящихся к различным химическим элементам, схожи между собой. В пределах одной серии расположение спектральных линий имеет определенный порядок. Наиболее простым атомом является атом водорода.

В 1885 г. швейцарскому физику И. Бальмеру удалось найти формулу, описывающую распределение спектральных линий видимого спектра атома водорода, получивших название «серии Бальмера»:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где λ – длина волны, $\frac{1}{\lambda}$ – волновое число; n – для различных линий серии принимает значения последовательного ряда целых чисел, начиная с трех ($n = 3, 4, 5, \dots$); $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Формула Бальмера определяет длину волны, соответствующую последовательным линиям серии Бальмера, как функцию целого числа.

Исследования излучения в невидимой части спектра показали, что существуют серии, расположенные в инфракрасной области, – серии Пашена, Брэккета, Пфунда; в ультрафиолетовой области – серия Лаймана.

Формулы, определяющие расположение спектральных линий в каждой из этих серий, аналогичны формуле для серии Бальмера. Обобщенную формулу Бальмера для всех линий спектра атома водорода записывают в виде

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где m и n принимают вполне определенные значения для каждой серии и каждой спектральной линии (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Значение m	Наименование серии	Значение n
1	Лаймана	2, 3, 4,
2	Бальмера	3, 4, 5,
3	Пашена	4, 5, 6,
4	Брэккета	5, 6, 7,

Учитывая, что

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \text{ или } \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c},$$

формулу можно переписать в виде

$$\nu = R' \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $R' = R \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$. Величину R' также называют постоянной Ридберга.

При увеличении n длина волны уменьшается, а частота линий увеличивается и достигает предельного значения R'/m^2 при $n \rightarrow \infty$; R'/m^2 является границей серии.

1.5.3. Комбинационный принцип Ритца

Аналогичные спектральные линии имеются не только у атома водорода, а, например, и у щелочных металлов. Расположение спектральных линий у них определяется формулой, аналогичной формуле Бальмера. Частота, соответствующая какой-либо спектральной линии этой серии, является разностью двух величин, одна из которых зависит от номера m серии и постоянна для всех линий данной серии, а другая определяется номером n линии в этой серии. Такая закономерность объясняет, что частота некоторой спектральной линии часто оказывается равной сумме частот, соответствующих двум другим линиям спектра.

Эта закономерность была установлена экспериментально Ритцем и названа комбинационным принципом, который является основой всей современной спектроскопии.

Комбинационный принцип Ритца: Для каждого атома возможно найти последовательность чисел, называемых спектральными термами, таких, что частоты всех спектральных линий этого атома будут выражаться в виде двух каких-либо спектральных термов:

$$\nu = T_1(m) - T_2(n).$$

Справедливость этого принципа подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Обоснование этого принципа связано со строением атома, с процессами, происходящими внутри атома при излучении волн с частотой, соответствующей какой-либо спектральной линии. И только теория Бора, выдвинутая им в 1913 г., выявила значение спектральных законов и показала, что эти законы отражают квантовый характер внутриатомной структуры.

1.5.4. Модель атома водорода по Бору

Бор ввел идеи квантовой теории в ядерную модель Резерфорда и разработал теорию атома водорода, полностью подтвержденную экспериментально.

В основе боровской теории атома лежит два основных положения (постулата):

1. Электроны могут двигаться в атоме только по определенным орбитам, находясь на которых, они, несмотря на наличие у них ускорения, не излучают.

Эти орбиты соответствуют стационарным состояниям электронов в атоме и определяются условием

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar,$$

где r_n – радиус n -й орбиты; v_n – скорость электрона на этой орбите; m_e – масса электрона; $m_e v_n r_n$ – момент импульса электрона на этой орбите; n – целое число ($n \neq 0$); главное квантовое число $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – универсальная постоянная, получившая название постоянной Планка; $\hbar = h / 2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

2. Атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.

Энергия кванта равна разности энергий стационарных состояний электрона до (E_2) и после (E_1) перехода:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Рассмотрим простейший атом – атом водорода. Он состоит из ядра, в состав которого входит один протон, и одного электрона, вращающегося вокруг ядра по круговой орбите. На электрон со стороны ядра действует кулоновская сила притяжения, сообщая ему центростремительное ускорение, поэтому

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{ee}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n},$$

где e – заряд электрона и протона, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Поскольку должен выполняться первый постулат Бора, воспользуемся выражением $m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar$. Определим скорость v_n , возведем в квадрат подставим в последнюю формулу. Из полученного выражения найдем

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2} = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{m_e e^2},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$.

Как следует из полученного выражения, радиусы орбит электрона в атоме водорода пропорциональны n^2 . Подставляя в эту формулу значения констант и принимая $n = 1$, получаем значение первого боровского радиуса, который является единицей длины в атомной физике

$$r_B = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

1.6. Молекулярный уровень

В подавляющем большинстве случаев атомы не существуют поодиночке, а объединяются в группы – *молекулы*.

Молекула – это наименьшая структурная единица вещества, обладающая его главными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных между собой химическими связями.

Различают молекулы:

- 1) одноатомные (например, молекулы инертных газов: He, Ne, Ar, Kr);
- 2) двухатомные (молекулы, состоящие из парных атомов: H₂, N₂, O₂, F₂, Cl₂);
- 3) макромолекулы – молекулы, состоящие из тысяч и более одинаковых или близких по строению групп атомов (белки, искусственные полимеры, некоторые витамины, целлюлоза и т. п.).

Молекулы простых веществ состоят из одинаковых атомов (H₂, N₂ и др.). Молекулы сложных веществ состоят из разных атомов (H₂O, NaCl и др.).

Связь между атомами в молекуле называется внутримолекулярной.

Различают следующие виды внутримолекулярной связи:

Ионная связь – химическая связь, образованная за счет электростатического притяжения разноименно заряженных ионов. В бинарных соединениях (соединениях двух элементов) она образуется в случае, когда размеры связываемых атомов сильно отличаются друг от друга (одни атомы большие, другие маленькие). Одни из них легко отдают электроны, другие принимают (обычно это атомы элементов, образующих типичные металлы, и атомы элементов, образующих типичные неметаллы).

Ковалентная связь – химическая связь, возникающая за счет образования общей пары электронов. Ковалентная связь образуется между маленькими атомами с одинаковыми или близкими радиусами. Необходимое условие образования такой связи – наличие неспаренных электронов у обоих связываемых атомов (обменный механизм) или неподеленной пары у одного атома и свободной орбитали у другого (донорно-акцепторный механизм).

Из молекул строится вещество.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение элементарных частиц.
2. Опишите общие свойства элементарных частиц.
3. Чем отличаются фермионы от бозонов?
4. Сформулируйте принцип зарядового сопряжения. Как была обнаружена первая античастица – позитрон?

5. Охарактеризуйте такие процессы взаимопревращения частиц, как аннигиляция и рождение пары.
6. Опишите каждый из видов фундаментальных физических взаимодействий.
7. Какие частицы называются лептонами? Перечислите их дуплетами.
8. Какие частицы называются адронами? Чем отличаются мезоны от барионов?
9. В чем состоит кварковая гипотеза М. Геллмана и Д. Цвейга? Приведите важнейшие характеристики основных типов кварков.
10. Как из кварков строятся мезоны? барионы?
11. Из каких частиц состоит атомное ядро?
12. Перечислите характеристики атомного ядра.
13. Чем отличаются ядра атомов разных изотопов одного химического элемента?
14. Каковы особенности ядерных сил?
15. Что такое энергия связи ядра?
16. Какое физическое явление называют радиоактивностью?
17. Какой радиоактивный распад называют α -распадом?
18. Какой радиоактивный распад называют β -распадом? Как объясняется возникновение электронного антинейтрино при β -распаде?
19. Дайте определение периода полураспада.
20. Запишите закон радиоактивного распада.
21. В чем состоит планетарная модель атома?
22. Сформулируйте постулаты Бора и правило квантования орбит.
23. Запишите обобщенную формулу Бальмера.
24. Как объясняется происхождение линейчатых спектров теорией Бора?

2. ФИЗИКА И ХИМИЯ МАКРОМИРА

2.1. Строение макросистем

Вещество находится в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом.

Учение о строении и свойствах вещества, основанное на представлениях об атомах и молекулах, называется *молекулярно-кинетической теорией*.

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

– вещество (тело) состоит из большого числа микрочастиц – атомов и молекул;

– атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении; интенсивность их движения зависит от температуры вещества;

– между атомами и молекулами действуют силы взаимного притяжения и взаимного отталкивания (на расстояниях порядка 10^{-9} м преобладают силы притяжения, на расстояниях порядка 10^{-10} м – силы отталкивания).

Существование молекул и атомов доказано экспериментально. Молекулы досконально изучены и даже сфотографированы с помощью электронных микроскопов. Непрерывным хаотическим движением молекул объясняется способность газов неограниченно расширяться и занимать весь представленный им объем. Упругость газов, твердых и жидких тел, способность жидкостей смачивать некоторые твердые тела, процессы окрашивания, склеивания, сохранения формы твердыми телами и многое другое говорят о существовании сил притяжения и отталкивания между молекулами.

Распространения запахов, смешивание разнородных жидкостей, процесс растворения твердых тел в жидкостях, сварка металлов как путем расплавления, так и путем давления, объясняются явлением диффузии, которое подтверждает правильность основных положений молекулярно-кинетической теории.

Диффузия – это процесс взаимного проникновения молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого. Диффузия достаточно легко наблюдается в жидкостях (самопроизвольное перемещение раствора медного купороса с водой) и газах (распространение паров эфира). Намного сложнее обнаружить диффузию в твердых телах. В одном из опытов гладко отшлифованные пластинки свинца и золота клали одну на другую и ставили на них груз. При обычной комнатной температуре (около 20°C) за 5 лет золото и свинец срослись, взаимно проникнув друг в друга на расстояние 1 см. Получился слой из однородного сплава золота со

свинцом, хотя, конечно, ни о каком плавлении этих металлов при 20°C не могло быть и речи.

В результате диффузии плотность газа во всем объеме выравнивается. Процесс диффузии ускоряется с повышением температуры, что может быть объяснено тем, что при этом увеличивается скорость беспорядочного движения молекул. Явление диффузии играет большую роль в природе: оно способствует поддержанию однородности состава атмосферного воздуха вблизи Земли. Диффузия растворов различных солей в почве способствует нормальному питанию растений.

К числу опытных доказательств движения молекул в веществах относится явление, открытое в 1827 г. английским ботаником Робертом Броуном. Он наблюдал в микроскоп споры плауна в воде и заметил, что твердые частицы, взвешенные в жидкости, находятся в непрерывном хаотическом движении. Хаотическое движение броуновских частиц объясняется движением молекул, в данном случае жидкости, которые сталкиваются с микроскопическими частицами и приводят их в движение. Наиболее подробно броуновское движение было изучено французским ученым Перреном, который, выполнив ряд экспериментов, показал хаотичность движения броуновских частиц и зависимость их скорости от температуры. Теорию броуновского движения разработал немецкий физик Альберт Эйнштейн. Законы движения броуновских частиц имеют статистический, вероятностный характер. Известен только один способ уменьшения интенсивности броуновского движения: уменьшение температуры. Существование броуновского движения убедительно подтверждает движение молекул.

2.2. Взаимодействие молекул и агрегатные состояния вещества

Межмолекулярное взаимодействие имеет электрическую природу, хотя молекула в целом электрически нейтральна, так как суммы положительных и отрицательных зарядов в ней равны друг другу. При такой компенсации электрических зарядов электрическое поле за пределами молекулы быстро убывает с расстоянием. Молекулы взаимодействуют друг с другом. Между ними действуют силы притяжения и силы отталкивания, которые быстро убывают при увеличении расстояния между молекулами. Силы отталкивания действуют только на очень малых расстояниях. Практически поведение вещества и его агрегатное состояние определяются тем, что является доминирующим: силы притяжения или хаотическое тепловое движение молекул.

В твердых телах, где концентрация молекул n (число молекул в единице объема) относительно велика, доминируют силы взаимодействия, и твердое тело сохраняет свои размеры и форму.

Жидкости, где концентрация молекул меньше, а следовательно, меньше силы взаимодействия, сохраняют свой объем, но принимают форму сосуда, в котором они находятся.

В газах, где концентрация молекул еще меньше, силы взаимодействия малы, поэтому газ занимает весь предоставленный ему объем.

Сила молекулярного взаимодействия зависит от формы и структуры молекул. Поэтому нет единого закона для её расчета. Однако если предположить, что молекулы имеют форму шара, то общий характер зависимости этих сил от расстояния между молекулами будет следующим: на расстояниях, меньших размера молекулы, силы отталкивания преобладают над силами притяжения; на расстояниях, больших размера молекулы, силы притяжения преобладают над силами отталкивания. Установлено, что силы отталкивания молекул обратно пропорциональны расстоянию между ними:

$$F_{\text{отталкив}} = \frac{a}{r^n},$$

где a и n – положительные постоянные, причем $n \approx 14-12$, а силы притяжения

$$F_{\text{пр}} = \frac{b}{r^m},$$

где b и m – положительные постоянные, причем $m \approx 7-5$.

Поэтому на малых расстояниях силы отталкивания возрастают быстрее сил притяжения.

На рис. 6 показаны теоретически найденные кривые, характеризующие изменение сил притяжения и сил отталкивания в зависимости от расстояния r между молекулами, а также график изменения результирующей силы взаимодействия. Из графика видно, что на некотором расстоянии r_0 (оно различно для молекул разных веществ) силы притяжения равны силам отталкивания.

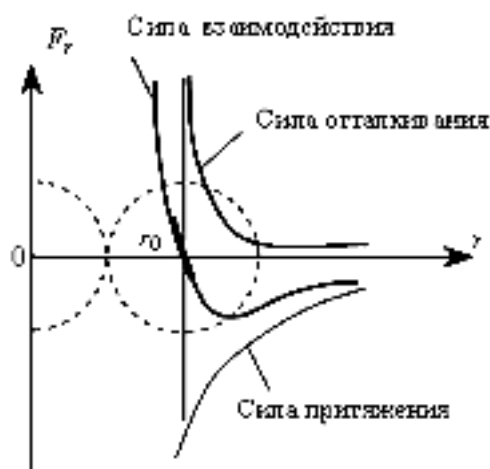


Рис. 6

Изучая поведение большой совокупности молекул, удобно пользоваться не силой взаимодействия молекул, а потенциальной энергией взаимодействия молекул $U_{(r)}$.

На рис. 7 приведен график зависимости потенциальной энергии U взаимодействия двух молекул от расстояния r между ними.

Пусть в точке $r=0$ находится одна молекула, а вторая молекула приближается к ней из бесконечности.

Напомним, что $\Delta U = -A_{вз} = -F_{вз}\Delta r$, откуда $F_{вз} = -\frac{\Delta U}{\Delta r}$ ($F_{вз} = -\frac{dU}{dr}$).

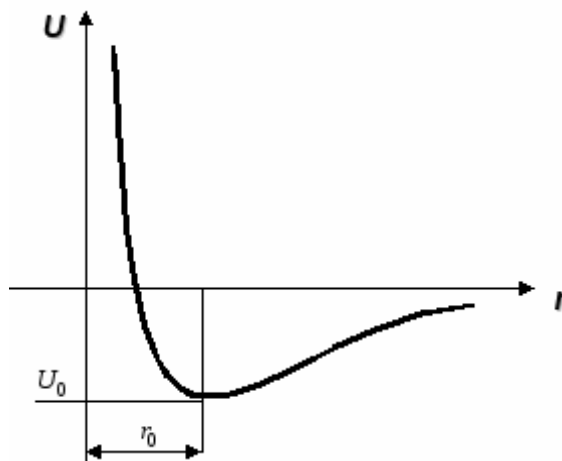


Рис. 7

При $r > r_0$ $F_{отталк} < F_{пр}$; $\frac{\Delta U}{\Delta r} > 0$.

При $r = r_0$ $F_{отталк} = F_{пр}$; потенциальная энергия минимальна, суммарная сила, действующая на молекулы, равна нулю.

При $r < r_0$ $F_{отталк} > F_{пр}$; $\Delta U/\Delta R < 0$.

Наибольшее сближение молекул достигается при расстоянии $r = d$ (эффективный диаметр молекулы), при котором вся кинетическая энергия молекул W_k полностью израсходована на совершение работы против сил отталкивания.

Приближаясь к первой молекуле, вторая молекула под действием силы притяжения движется со все возрастающей скоростью. В результате кинетическая энергия W_k также растет.

Однако полная энергия системы $W_{полн} = W_k + U$ остается неизменной (система двух молекул замкнутая).

При прохождении точки с координатой r_0 силы притяжения сменяются силами отталкивания, вследствие чего молекула начинает быстро терять скорость (в области отталкивания кривая $U_{(r)}$ идет очень круто). В момент, когда потенциальная энергия $U_{(r)}$ становится равной полной энергии

системы, скорость молекул обращается в ноль. В этот момент имеет место наибольшее сближение молекул друг с другом. Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы d .

Таким образом, эффективный диаметр d молекул зависит от их энергии, а следовательно, и от температуры. С повышением температуры эффективный диаметр d молекул уменьшается.

Эффективный диаметр молекулы определяет линейные размеры той области, в которую другая молекула проникнуть не может. Это позволило рассматривать молекулы как два упругих шарика диаметром d , так как d – минимальное расстояние между их центрами.

Взаимодействие молекул рассматривается по законам абсолютно упругого удара. При хаотическом тепловом движении молекул средняя кинетическая энергия имеет порядок kT , где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, а T – абсолютная температура. Агрегатное состояние вещества существенно зависит от соотношения между U_{\min} и kT .

При низких температурах, когда кинетическая энергия молекул мала ($kT \ll |U_{\min}|$), молекулы притянутся друг к другу вплотную и установятся в определенном порядке – вещество находится в твердом агрегатном состоянии.

При высоких температурах, т.е. при большой кинетической энергии молекул ($kT \ll |U_{\min}|$), интенсивное тепловое движение молекул мешает им соединиться в агрегаты из нескольких частиц, оставляя их на некотором расстоянии $r < r_0$ друг от друга. Вещество при этом находится в газообразном состоянии.

Если взять промежуточные значения температур ($kT \ll |U_{\min}|$), то оказывается, что молекулы непрерывно перемещаются в пространстве, обмениваясь местами. Однако они не будут увеличивать взаимного расстояния на величину, заметно превышающую d . Вещество при этом находится в жидком агрегатном состоянии.

Следовательно, в зависимости от температуры любое вещество может находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Среднее расстояние между молекулами газа в десятки раз превышает размеры его молекул. Только 0,04 % объема, занятого газом, приходится на долю самих молекул, а остальную часть пространства составляет свободный от молекул объем.

Взаимного притяжения молекул газа практически нет, и их движение происходит по инерции. Молекула газа движется равномерно и прямолинейно до тех пор, пока не столкнется с другой молекулой, а изменив направление и величину скорости, снова будет двигаться равномерно и прямолинейно до очередного столкновения. Если молекулы газа состоят из

нескольких атомов, то при столкновении они приобретают еще и вращательное движение. Таким образом, тепловое движение молекул газов является поступательным и вращательным.

В жидкостях силы сцепления молекул некоторое время удерживают их в равновесии, где они колеблются, а затем перескакивают в новое положение равновесия и т.д. Таким образом, тепловое движение в жидкости в основном является колебательным и поступательным.

В твердых телах молекулы расположены плотнее, чем в жидкостях, получаемых после плавления этих тел. Тепловое движение молекул в твердых телах в основном является колебательным, хотя возможны переходы молекул из одного положения в другое, что подтверждается диффузией.

2.3. Размеры и масса молекул

Специфика микромира приводит к необходимости введения специальных единиц молекулярной физики. Так как массы молекул очень малы ($\approx 10^{-27}$ кг), удобно использовать в расчетах не абсолютные значения масс, а относительные. По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с $1/12$ массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс).

Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M_r называют отношение массы молекулы (атома) m_0 данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода m_{0C} .

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}.$$

Относительная атомная масса всех химических элементов точно измерена и приведена в таблице Менделеева.

Складывая относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы вещества, можно вычислить относительную молекулярную массу вещества.

В международной системе единиц (СИ) количество вещества выражается в молях.

Моль – это количество вещества, в котором содержится столько структурных элементов (молекул, атомов), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C . Значит, в моле любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул. Это число атомов обозначают N_A и называют постоянной Авогадро.

Масса атома углерода ^{12}C равна $m_{0\text{C}} = 1,995 \cdot 10^{-26}$ кг, тогда

$$N_A = \frac{0,012}{m_{0\text{C}}} = 0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \frac{1}{1,995 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Количество вещества ν равно отношению числа молекул N в данном теле к постоянной Авогадро N_A , т.е. к числу молекул в 1 моле вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Наряду с относительной молекулярной массой в физике и химии широко используют понятие молярной массы.

Молярной массой вещества называют массу вещества, взятого в количестве одного моля, т.е.

$$M = m_0 N_A = \frac{1}{12} m_{0\text{C}} \cdot M_r \frac{0,012}{m_{0\text{C}}} = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

С учетом вышесказанного, количество вещества ν равно отношению массы вещества к его молярной массе:

$$\nu = \frac{m}{M}.$$

Число молекул любого количества вещества массой m и молярной массой M

$$N = \frac{m}{M} N_A.$$

Приближенная оценка размеров и массы молекул (рис 8).

Объем капли 0,5 %-го раствора олеиновой кислоты равен 2 мм^3 .

Объем пятна

$$V = 0,005\% \cdot 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 = 10^{-11} \text{ м}^3.$$

Площадь пятна

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14}{4} (0,2)^2 = 3,14 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2.$$

Толщина слоя или диаметр молекулы

$$d = \frac{V}{S} = \frac{10^{-11} \text{ м}^3}{3,14 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

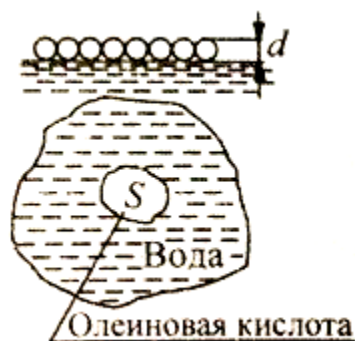


Рис. 8

Объем одной молекулы

$$V_0 = d^3 = 2,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Масса одной молекулы

$$m = \rho V_0 = 0,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 2,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3 = 2,4 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

2.4. Развитие представлений о составе, свойствах и превращениях веществ

Наука, изучающая свойства и превращения веществ, сопровождающиеся изменением их состава и строения, называется *химией*.

Процесс формирования химического знания о веществе можно условно представить в виде концептуальных уровней.

Первый концептуальный уровень – учение о составе вещества (1660-е годы).

На этом этапе учёные исследовали *зависимость свойств веществ от их химического состава*.

Химический состав вещества определяется входящими в него *химическими элементами*.

В 1661 году английский химик и физик Роберт Бойль (1627–1691) предложил первое научное определение химического элемента.

Химический элемент (по Бойлю) – это простое тело, предел химического разложения вещества. Химический элемент переходит без изменения из состава одного сложного тела в состав другого.

Основываясь на результатах своих экспериментов, Роберт Бойль сделал важный вывод:

качества и свойства вещества зависят от того, из каких химических элементов оно состоит.

Учёные в это время ещё не знали ни одного химического элемента. Фосфор (P) был открыт только в 1669 году, кобальт (Co) – в 1735, никель (Ni) – в 1751, водород (H₂) – в 1766 и т.д.

В первой половине XVIII века учение о химических элементах основывалось на теории *флогистона*, предложенной немецким врачом и химиком Георгом Шталем (1660–1734).

Шталь объяснял горючесть тел наличием в них невесомой горючей материи – *флогистона* – и рассматривал процесс горения как процесс разложения.

Теория флогистона объясняла причины изменения внешнего вида и свойства тел, но не могла объяснить изменение их тел после горения.

В 1748 году Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765) впервые сформулировал закон сохранения массы вещества и исключил из числа химических элементов флогистон.

Закон сохранения массы вещества: *масса веществ, вступающих в химическую реакцию, равна массе веществ, образующихся в результате реакции.*

Процесс превращения химии в науку завершил своими открытиями французский химик Антуан Лавуазье (1743–1791). Он понял важность точного измерения количеств веществ, участвующих в химических процессах, и опроверг теорию флогистона, предложив кислородную теорию горения. В 1789 году Лавуазье экспериментально подтвердил закон сохранения массы вещества и доказал, что *в химических реакциях сохраняется не только общая масса веществ, но и масса каждого из элементов, входящих в состав взаимодействующих веществ.*

Лавуазье первым предпринял попытку систематизации открытых к тому времени 33 химических элементов.

В период с середины XVII до второй половины XIX века учение о составе вещества представляло собой всю химию. Оно существует и сегодня, представляя собой часть химии.

В современной научной картине мира под *химическим элементом* понимают совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра (изотопов).

Второй концептуальный уровень – структурная химия (1800-е годы)

Структурная химия занимается исследованием структуры, то есть способа взаимодействия элементов вещества. К этому времени был открыт органический синтез (на основе простейших углеводов были синтезированы анилиновые красители, затем получены новые вещества – лекарственные препараты, взрывчатые вещества) и химики считали, что из нескольких простейших элементов они могут складывать все остальные. Стало очевидно, что свойства веществ, их качественное разнообразие обуславливаются не только составом, но и структурой молекул. Совершенствование методов и средств измерения позволило установить целый ряд новых количественных закономерностей – стехиометрических законов.

В 1803 году английский физик и химик Джон Дальтон открыл закон кратных отношений: *если два химических элемента образуют друг с другом более одного соединения, то массы одного элемента, приходящиеся на одну и ту же массу другого, относятся как целые числа, обычно небольшие.*

В 1811 году итальянский физик и химик Амедео Авогадро ввёл термин «молекула» и выдвинул гипотезу молекулярного строения веществ. Согласно Авогадро, *молекула – это наименьшая частица вещества, состоящая из одинаковых или различных атомов, соединённых между собой химическими связями.*

Химическая связь атомов обусловлена взаимодействием внешних (валентных) электронов. Силы, удерживающие атомы в молекулах, являются проявлением электромагнитного взаимодействия.

Основными видами химической связи атомов в молекулах являются:

1) *ионная связь* – она осуществляется электростатическим взаимодействием атомов при переходе электрона одного атома к другому, в результате чего образуются положительный и отрицательный ионы. Ионная связь между атомами существует, например, в молекулах NaCl, KBr.

2) *ковалентная* – это связь атомов посредством общих электронных пар. В результате образования общих электронных пар происходит перекрывание орбиталей.

В этом случае выделить положительные и отрицательные ионы невозможно. Пару образуют электроны с противоположно направленными спинами. Ковалентная связь между атомами существует, например, в молекулах H_2 , C_2 .

Представления об атомно-молекулярном строении вещества окончательно утвердились в 60-х годах XIX века.

В 1861 году выдающийся российский химик А.М. Бутлеров (1828–1896) создал и обосновал теорию химического строения вещества, согласно которой свойства веществ определяются порядком связей атомов в молекулах и их взаимным влиянием. Он отмечал, что образование новых молекул из атомов происходит *не только за счет валентности, но и энергии (напряжения), с которой они связываются друг с другом.* Именно поэтому новые идеи А.М. Бутлерова нашли не только широкое применение в практике химического синтеза, но и получили свое обоснование в квантовой механике.

Немного позднее – в 1869 году – другой выдающийся русский химик – Д.И. Менделеев (1834–1907) открыл *периодический закон химических элементов* – один из фундаментальных законов естествознания. Современная формулировка этого закона такова: *свойства элементов находятся в периодической зависимости от заряда их атомных ядер.* Заряд ядра равен порядковому номеру элемента в периодической системе Менделеева.

Менделееву Д.И. в момент создания периодической системы было известно 62 химических элемента, однако он предсказал существование неизвестных элементов, оставив для них пустые клетки в своей таблице. Впоследствии эти элементы были открыты химиками, и свойства их оказались такими, какие предсказывал Д.И. Менделеев. Благодаря этому его периодическая система получила широкое признание в научном мире. В настоящее время число известных химических элементов составляет 118.

В 1801 году французский ученый Жозеф Пруст (1754-1826) сформулировал в закон постоянства состава вещества:

любое химическое соединение должно обладать вполне определенным, неизменным составом.

Впоследствии этот закон был обоснован выдающимся английским ученым химиком Джоном Дальтоном (1766–1844) с позиций атомарно-молекулярного учения. Дальтон полагал, что *поскольку всякое индивидуальное вещество – простое или сложное – состоит из молекул, а молекулы – из атомов, то свойства вещества зависят от молекул.*

Например: молекула кислорода O_2 образована из двух атомов и характеризуется всеми свойствами, которые присущи этому веществу.

Молекулы сложных веществ, или химических соединений, образованы из разных атомов и поэтому обладают свойствами, отличными от свойств составных частей. Например: вода H_2O представляет собой жидкость, а образована она из двух газов – водорода и кислорода. Важно подчеркнуть, что каким бы способом она или другое химическое соединение ни были получены, они всегда будут иметь тот же самый состав. Долгое время закон постоянства состава считался абсолютной истиной, не допускающей никаких исключений, хотя уже французский химик Клод Бертолле указывал на существование соединений переменного состава в форме растворов и сплавов. Впоследствии были найдены более убедительные доказательства существования химических соединений переменного состава в школе известного русского химика Н.С. Курнакова (1860-1940). В честь К. Бертолле он назвал их *бертоллидами*. Например, к ним относятся соединения таких двух металлов, как марганец и медь, магний и серебро и др.

Состав *бертоллидов* зависит от способа их получения.

Анализ химических соединений показал, что природа соединения, т.е. характер связи атомов в его молекуле, зависит от их химических связей, *определяемых обменным взаимодействием валентных электронов.*

В связи с этим изменилось и само классическое понятие молекулы, хотя основное его содержание сохранилось: *молекулой по-прежнему называют наименьшую частицу вещества, которая определяет его свойства и может существовать самостоятельно.*

Однако к молекулам теперь относят также разнообразные другие квантово-механические системы (ионные, атомные монокристаллы, полимеры и другие макромолекулы).

С возникновением структурной химии у химической науки появились неизвестные ранее возможности целенаправленного качественного влияния на преобразование вещества. Структурная химия неорганических соединений ищет пути получения кристаллов для производства высокопрочных материалов с заданными свойствами, обладающих термостойкостью, сопротивлением агрессивной среде и другими качествами, предъявляемыми сегодняшним уровнем развития науки и техники. Решение этих вопросов наталкивается на различные препятствия. Выращивание, например, некоторых кристаллов требует исключения условий

гравитации. Поэтому такие кристаллы выращивают в космосе, на орбитальных станциях.

Третий концептуальный уровень – учение о химических процессах (1950-е годы).

Интенсивное развитие автомобилестроения, авиации, энергетики, приборостроения в первой половине XX века выдвинуло новые требования к производству материалов. Необходимо было получать высокооктановое моторное топливо, специальные синтетические каучуки, пластмассы, высокостойкие изоляторы, жаропрочные органические и неорганические полимеры, полупроводники. Для получения этих материалов способ решения основной проблемы химии, основанный на учении о составе и структурных теориях, был явно недостаточен. Он не учитывал резкие изменения свойств вещества в результате влияния температуры, давления, растворителей и многих других факторов, воздействующих на направление и скорость химических процессов.

Под влиянием новых требований производства возник *третий* способ решения проблемы генезиса свойств, учитывающий всю сложность организации *химических процессов* в реакторах и обеспечивающий их экономически приемлемую производительность.

Учение о механизмах химических реакций и закономерностях их осуществления во времени называется *физической химией* или *химической кинетикой*.

К структурно-кинетическим факторам, влияющим на скорость химической реакции, относятся:

1. *Строение исходных реагентов* (природа реагирующих веществ). Большую роль играет характер химических связей и строение молекул реагентов. Реакции протекают в направлении разрушения менее прочных связей и образования веществ с более прочными связями. Так, для разрыва связей в молекулах H_2 и N_2 требуются высокие энергии; такие молекулы мало реакционноспособны. Для разрыва связей в сильнополярных молекулах (HCl , H_2O) требуется меньше энергии, и скорость реакции значительно выше. Реакции между ионами в растворах электролитов протекают практически мгновенно. Например, фтор с водородом реагирует со взрывом при комнатной температуре, бром с водородом взаимодействует медленно и при нагревании. Оксид кальция вступает в реакцию с водой энергично, с выделением тепла; оксид меди – не реагирует.

2. *Концентрация реагирующих веществ*. Чтобы между частицами (молекулами, ионами) исходных веществ произошло химическое взаимодействие, они должны сблизиться друг с другом настолько, чтобы атомы одного из них испытывали бы действие электрических полей, создаваемых атомами другого. Только при этом условии станут возможны те переходы электронов и перегруппировки атомов, в результате которых образуются

молекулы новых веществ – продуктов реакции. Поэтому скорость реакции пропорциональна числу соударений, которые претерпевают молекулы реагирующих веществ. Число соударений, в свою очередь, тем больше, чем выше концентрация каждого из исходных веществ.

Закон зависимости скорости реакции от концентраций реагирующих веществ (закон действующих масс):

при постоянной температуре скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ.

$$v = k[A] \cdot [B],$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый константой скорости данной реакции; $[A]$ и $[B]$ – концентрации веществ A и B .

Величина константы скорости зависит от природы реагирующих веществ, температуры и от присутствия катализаторов, но не зависит от концентраций веществ.

Этот закон был открыт в 1867 г. опытным путем норвежскими учеными К. Гульдбергом и П. Вааге.

3. *Температура.* Химические реакции, протекающие в гомогенных системах (смеси газов, жидкие растворы), осуществляется за счет соударения частиц. Однако не всякое столкновение частиц реагентов ведет к образованию продуктов реакции. Только частицы, обладающие повышенной энергией, – активные частицы – способны осуществить акт химической реакции. Избыточная энергия, которой должны обладать частицы, для того чтобы их столкновения могли привести к образованию нового вещества, называется *энергией активации*. Энергию активации выражают в кДж/моль.

С повышением температуры увеличивается кинетическая энергия частиц и число активных частиц возрастает. Химические реакции при высоких температурах протекают быстрее, чем при низких температурах. Эмпирическое правило, позволяющее в первом приближении оценить влияние температуры на скорость химической реакции в небольшом температурном интервале (обычно от 0°C до 100°C) – правило Вант-Гоффа:

при повышении температуры на каждые 10°C скорость химической реакции возрастает в два-четыре раза.

При увеличении температуры от t_1 до t_2 изменение скорости реакции можно рассчитать по формуле

$$\frac{v_{t_1}}{v_{t_2}} = g^{t_2 - t_1 / 10},$$

где v_{t_1} и v_{t_2} – скорости реакции при температурах t_1 и t_2 соответственно; g – температурный коэффициент данной реакции (если он равен 2, напри-

мер, то скорость реакции будет увеличиваться в 2 раза при повышении температуры на 10 градусов).

4. *Поверхность соприкосновения реагирующих веществ.* Для гетерогенных систем (когда вещества находятся в разных агрегатных состояниях), чем больше поверхность соприкосновения, тем быстрее протекает реакция. Поверхность твердых веществ может быть увеличена путем их измельчения, а для растворимых веществ – путем их растворения.

5. *Катализ.* Катализ – ускорение химической реакции в присутствии веществ (катализаторов), которые взаимодействуют с реагентами, но в реакции не расходуются и не входят в состав конечных продуктов. Термин «катализ» впервые предложил шведский химик и минералог И.Я. Берцелиус (1799–1848 гг.). Благодаря катализу скорость некоторых реакций повышается в десятки миллиардов раз даже при невысоких температурах и активизируется образование только определённых продуктов из ряда возможных.

Катализ – основа химико-технологических процессов производства, например, серной кислоты, некоторых полимеров, аммиака. В последние десятилетия не менее 20 % всей промышленной химической продукции производят каталитическим способом.

К довольно эффективным катализаторам относятся ионообменные смолы, металлоорганические соединения, мембранные катализаторы, а также многие элементы периодической системы Менделеева (в первую очередь редкоземельные металлы и металлы платиновой группы). Одним из видов каталитических реакций является *автокатализ*. В автокаталитической реакции, продукт реакции одновременно является её катализатором: каждая новая молекула продукта ускоряет синтез таких же молекул.

Вещества, замедляющие химическую реакцию, называются *ингибиторами*.

Став наукой не только и не столько о веществах как законченных предметах, но наукой о процессах и механизмах изменения вещества, химия обеспечила многотоннажное производство синтетических материалов, заменяющих дерево и металл в строительных работах, пищевое сырьё в производстве олифы, лаков, моющих средств и смазочных материалов. Производство искусственных волокон, каучуков, этилового спирта и многих растворителей стало базироваться на нефтяном сырье, а производство азотных удобрений – на основе азота воздуха. Появилась технология нефтехимических производств с ее поточными системами, обеспечивающими непрерывные высокопроизводительные процессы.

2.5. Химическое равновесие. Принцип Ле Шателье

Все химические реакции можно разбить на две группы: необратимые и обратимые реакции.

Необратимые реакции протекают до конца – до полного израсходования одного из реагирующих веществ. Например, взаимодействие алюминия с соляной кислотой ($\text{Al} + 2\text{HCl} = \text{AlCl}_3 + \text{H}_2$) идет необратимо. Обратный процесс взаимодействия хлорида алюминия и водорода с получением алюминия и соляной кислоты невозможен.

Обратимые реакции протекают не до конца: при обратимой реакции ни одно из реагирующих веществ не расходуется полностью.

Это различие связано с тем, что необратимая реакция может протекать только в одном направлении. Обратимая реакция может протекать как в прямом, так и в обратном направлении. В уравнениях обратимых реакций вместо знака равенства ставят стрелки, символизирующие протекание реакций как в прямом, так и в обратном направлениях. Например, $\text{H}_2 + \text{I}_2 \leftrightarrow 2\text{HI}$.

Согласно закону действующих масс скорость прямой реакции выражается уравнением: $v_1 = k_1[\text{H}_2] \cdot [\text{I}_2]$, а скорость обратной реакции – уравнением $v_2 = k_2[\text{HI}]^2$.

В начальный момент времени скорость синтеза HI максимальна, поскольку максимальна концентрация H_2 и I_2 , а скорость разложения HI равна нулю, так как в системе отсутствует HI. По мере расходования водорода и йода скорость прямой реакции постепенно уменьшается, а скорость обратной, напротив, возрастает в соответствии с накоплением в реакционном объеме HI. Рано или поздно наступит такой момент, когда эти скорости станут одинаковыми: $v_1 = v_2$.

Состояние системы, когда скорости прямой и обратной реакций становятся одинаковыми, называется *химическим равновесием*.

Но состояние химического равновесия не означает прекращения химических реакций. В состоянии химического равновесия взаимодействие исходных веществ и разложение продуктов реакции продолжают с одинаковыми скоростями. Поэтому такое равновесие называется *динамическим*.

Например, в приведенной реакции HI постоянно образуется и расходуется. Если добавить в такую равновесную смесь радиоактивный йод-131, то он быстро распределяется между молекулами I_2 и HI. Это говорит о постоянном переходе атомов йода из исходного вещества в продукт реакции и обратно.

Состояние химического равновесия можно изменить. Иными словами – можно сдвинуть равновесие в сторону образования продуктов или в

сторону образования исходных веществ. Например, если добавлять в равновесную систему извне «лишний» водород, то возрастет величина молярной концентрации $[H_2]$ в кинетическом уравнении прямой реакции. Следовательно, увеличится скорость прямой реакции $v_{пр}$, а скорость обратной реакции $v_{обр}$ останется неизменной. В итоге израсходуется какая-то часть добавленного водорода, а равновесие сместится *вправо*, т.е. в сторону образования продукта реакции. Такой же эффект даст и введение в систему дополнительных порций I_2 .

Напротив, добавление HI приведет к сдвигу равновесия *влево*. Это подтверждает кинетическое уравнение обратной реакции ($v_{обр}$): она получит преимущество, поскольку возрастет величина $[HI]^2$.

Таким образом, при попытке воздействовать на равновесную систему она «сопротивляется» такому воздействию. Действительно, добавление в равновесную систему H_2 или I_2 приводит к увеличению их расходования в прямой реакции. В итоге H_2 или I_2 в системе окажется меньше, чем было добавлено, зато возрастет количество HI . Наоборот, добавление HI приводит к более быстрому его расходованию в обратной реакции. Такая способность равновесных систем «сопротивляться» внешним воздействиям носит общий характер и известна под названием **принципа Ле Шателье**:

если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-нибудь из условий, определяющих положение равновесия, то равновесие смещается в том направлении, при котором эффект произведенного воздействия уменьшается.

Повышение температуры смещает химическое равновесие в сторону эндотермической реакции, понижение температуры – в сторону экзотермической реакции.

При повышении концентрации одного из исходных веществ равновесие сдвигается в направлении образования продуктов реакции. При повышении концентрации одного из продуктов реакции равновесие сдвигается в направлении образования исходных веществ.

Во всех реакциях с участием газообразных веществ, сопровождающихся изменением объема за счет изменения количества вещества при переходе от исходных веществ к продуктам реакции, на положение равновесия влияет давление в системе. Влияние давления на положение равновесия подчиняется следующим правилам: при повышении давления равновесие сдвигается в направлении образования веществ (исходных или продуктов) с меньшим объемом; при понижении давления равновесие сдвигается в направлении образования веществ с большим объемом.

Катализаторы не влияют на положение равновесия.

2.6. Энергетика химических систем. Тепловые эффекты реакций

При протекании химической реакции изменяется внутренняя энергия участвующих в ней веществ, что сопровождается *выделением и поглощением* теплоты и производством как механической (связанной с изменением объема), так и немеханической работы (связанной с изменением масс веществ, участвующих в процессе).

Участвующая в реакции теплота называется теплотой химической реакции. Эта теплота считается *положительной* при выделении из системы (*экзотермическая реакция*) и *отрицательной* при поглощении системой (*эндотермическая реакция*).

Насыщаемость молекул, т.е. способность присоединять атомы, определяет их постоянный состав для данного вещества и связана с *валентностью* – свойством атомов (или группы атомов) соединяться с некоторым числом других атомов.

Четвертый концептуальный уровень – эволюционная химия (1960–1970 гг.).

Эволюционная химия – наука, которая исследует проблемы самопроизвольного синтеза новых химических соединений (без участия человека). Такие соединения являются более сложными и высокоорганизованными продуктами по сравнению с исходными веществами. В основе эволюционной химии лежат процессы биокатализа, ферментологии. *Ферменты* – это белковые молекулы, синтезируемые живыми клетками. В каждой клетке имеются сотни различных ферментов. С их помощью осуществляются многочисленные химические реакции, которые благодаря каталитическому действию ферментов могут идти с большой скоростью при температурах, подходящих для данного организма, т.е. в пределах примерно от 5 до 40 градусов. Ферменты – это биологические катализаторы.

Эволюционная химия ориентирована главным образом на исследование молекулярного уровня живого. Такие исследования позволили раскрыть механизм многих процессов в живых организмах, синтезировать не существующие в природе вещества с необычными свойствами, установить сложную структуру молекулы ДНК, расшифровать молекулярный генный механизм наследственности и многое другое.

Молекулярный уровень исследования позволяет создавать не только сверхпрочные сверхпроводящие и другие материалы с новыми свойствами, но и производить операции с фрагментами ДНК, изменяя её генетический код. Сегодня уже говорят о конструировании устройств из отдельных молекул, создании молекулярного компьютера, обладающего чрезвычайно большими возможностями.

В эволюционной химии существенное место отводится проблеме «самоорганизации» систем. Теория самоорганизации «отражает законы та-

кого существования динамических систем, которое сопровождается их восхождением на все более высокие уровни сложности в системной упорядоченности, или материальной организации».

Наука же считает, что только шесть элементов – углерод, водород, кислород, азот, фосфор и сера – составляют основу живых систем, из-за чего они получили название органогенов. Весовая доля этих элементов в живом организме составляет 97,4 %.

Кроме того, в состав биологически важных компонентов живых систем входят еще 12 элементов: натрий, калий, кальций, магний, железо, цинк, кремний, алюминий, хлор, медь, кобальт, бор. Их удельный вес – 1,6 %.

Остальные 20 химических элементов, из которых построены узкоспецифические биосистемы, имеют удельный вес около 1 %.

Особая роль отведена природой углероду (органоген №1). Этот элемент способен организовать связи с элементами, противостоящими друг другу, и удерживать их внутри себя. Атомы углерода образуют почти все типы химических связей. На основе шести органогенов и еще около 20 других элементов природа создала около 8 млн различных химических соединений, обнаруженных к настоящему времени. 96 % из них приходится на органические соединения.

Концепции эволюционной химии, в том числе о химической эволюции на Земле, о самоорганизации и самосовершенствовании химических процессов, о переходе от химической эволюции к биогенезу, являются убедительным аргументом, подтверждающим научное понимание происхождения жизни во Вселенной.

Химическая эволюция на Земле создала все предпосылки для появления живого из неживой природы. Жизнь во всем ее многообразии возникла на Земле самопроизвольно из неживой материи, она сохранилась и функционирует уже миллиарды лет.

2. 7. Строение и некоторые свойства твердых тел, жидкостей и газов

2.7.1. Свойства твердых тел

Твердыми называются тела, которые обладают постоянством формы и объема. Различают кристаллические и аморфные твердые тела. *Аморфными* называют тела, физические свойства которых одинаковы по всем направлениям. Примерами аморфных тел могут служить куски затвердевшей смолы, янтарь, изделия из стекла. Аморфные тела являются изотропными телами.

Изотропность (одинаковость) физических свойств аморфных тел объясняется беспорядочностью расположения составляющих их атомов и

молекул. Аморфные тела представляют собой переохлажденные жидкости и не обладают четко выраженными свойствами кристаллов.

Кристаллы имеют внешне правильную геометрическую форму и периодически повторяющееся на протяжении всего кристалла расположение составляющих его частиц – кристаллическую решетку. В этом смысле говорят о дальнем порядке в кристаллах. Кристаллы ограничены упорядоченно расположенными друг относительно друга плоскими гранями, которые сходятся в ребрах и вершинах.

Крупные одиночные кристаллы, имеющие форму правильных многогранников, называются *монокристаллами*. Их форма определяется химическим составом кристалла. *Поликристаллы* имеют мелкокристаллическую структуру – состоят из большого числа сросшихся мелких, хаотически расположенных кристаллов (кристаллические зерна, кристаллиты).

Каждая частица в кристаллической решетке испытывает силы молекулярного взаимодействия. Равновесное расположение всех частиц твердого тела в узлах кристаллической решетки соответствует минимуму свободной энергии кристалла и наиболее устойчивому его состоянию. При этом частицы в узлах решетки располагаются на некоторых равновесных расстояниях друг от друга, называемых *периодами кристаллической решетки*.

Основные типы кристаллических твердых тел, различающиеся характером взаимодействия между частицами и видом частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки:

- ионные кристаллы;
- валентные (атомные) кристаллы;
- молекулярные кристаллы;
- металлы (Na, Cu, Al и др.).

В узлах кристаллической решетки находятся положительные ионы, образовавшиеся после отщепления от атомов внешних (валентных) электронов, образующих электронный газ коллективизированных свободных частиц. Особая металлическая связь является специфическим видом химической связи и возникает между ионами кристаллической решетки и электронным газом. Электроны «стягивают» положительные ионы (главным образом, электростатическими силами) и уравнивают отталкивание между ионами.

При расстояниях между ионами, равных периоду кристаллической решетки, образуется устойчивое состояние металлического кристалла.

Ангармонический характер тепловых колебаний частиц в узлах кристаллической решетки проявляется в том, что зависимость потенциальной энергии взаимодействия частиц от их смещения из положений равновесия не является параболической, а сила, действующая на частицу, не является квазиупругой. Это имеет основное значение для понимания некоторых тепловых и электрических свойств твердых тел.

Характерной особенностью монокристаллов является их *анизотропия* (анизотропия кристаллов) – зависимость физических свойств твердых тел (тепловых, упругих, электрических, оптических) от направлений в кристалле.

Упругие свойства твердых тел

Внешнее механическое воздействие на тело вызывает смещение атомов из равновесных положений и приводит к изменению формы и объема тела, т.е. к его деформации. Самые простые виды деформации – растяжение и сжатие. Растяжение испытывают тросы подъемных кранов, буксирные тросы, струны музыкальных инструментов. Сжатию подвергаются стены и фундаменты зданий. Деформацию сжатия и растяжения можно характеризовать *абсолютным удлинением* Δl , равным разности длин образца до растяжения l_0 и после l :

$$\Delta l = l - l_0.$$

Абсолютное удлинение Δl при растяжении положительно, при сжатии – отрицательно.

Отношение абсолютного удлинения Δl к длине образца l_0 называется *относительным удлинением*:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0.$$

При деформации тела возникают силы упругости. Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости к площади поперечного сечения тела, называется *механическим напряжением*:

$$\sigma = F / S.$$

Единица механического напряжения СИ – паскаль (Па), $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

При малых деформациях напряжение прямо пропорционально относительному удлинению (закон Гука):

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга).

Модуль упругости одинаков для образцов любой формы и размеров, изготовленных из одного материала:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl_0}{\Delta l S} = \text{const},$$

откуда следует, что $F = \frac{ES}{l_0} \Delta l$, где $k = \frac{ES}{l_0}$ – жесткость тела.

Зависимость механического напряжения от относительного удлинения является одной из важнейших характеристик механических свойств твердых тел. Графическое изображение этой зависимости называется диаграммой растяжения (рис. 9).

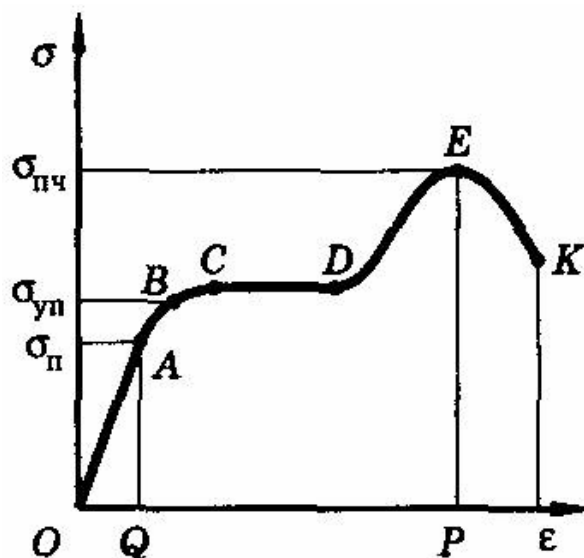


Рис. 9

Закон Гука выполняется при небольших деформациях. Максимальное напряжение σ_n , при котором еще выполняется закон Гука, называется *пределом пропорциональности* (точка *A*).

За пределом пропорциональности напряжение перестает быть пропорциональным относительному удлинению, до некоторого напряжения после снятия нагрузки размеры тела восстанавливаются полностью. Такая деформация называется *упругой*. Максимальное напряжение $\sigma_{уп}$, при котором деформация еще остается упругой, называется *пределом упругости* (точка *B*). Большинство металлов испытывает упругую деформацию до значений $\epsilon < 0,1\%$.

При напряжениях, превышающих предел упругости $\sigma_{уп}$, образец после снятия нагрузки не восстанавливает свою форму или первоначальные размеры. Такие деформации называются *остаточными* или *пластическими*.

В области пластической деформации (участок *CD*) деформация происходит почти без увеличения напряжения. Это явление называется *текучестью материала*.

Материалы, у которых область текучести (участок *CD*) значительна, могут без разрушения выдерживать большие деформации. Если же область текучести материала почти отсутствует, он без разрушения может выдерживать лишь небольшие деформации. Такие материалы называются *хрупкими*. Примерами хрупких материалов могут служить стекло, кирпич, бетон, чугун.

За пределом текучести кривая напряжений поднимается и достигает максимума в точке *E*. Напряжение, соответствующее точке *E*, называется *пределом прочности* $\sigma_{пч}$. После точки *E* кривая идет вниз и дальнейшая деформация вплоть до разрыва (точка *K*) происходит при все меньшем напряжении.

Тепловое расширение твердых тел

При повышении температуры твердого тела происходит его тепловое расширение, которое может быть линейным и объемным. Оба вида теплового расширения характеризуются средними коэффициентами линейного α и объемного β расширений в некотором интервале температур.

Если l_0 – длина тела при температуре 0°C (273 К), то его удлинение Δl при нагревании до температуры $t^\circ\text{C}$

$$\Delta l = \alpha l_0 t,$$

откуда $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 t}$, тогда $l = l_0(l + \alpha t)$.

Коэффициент линейного расширения характеризует относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l_0}$ тела при нагревании его на один градус. Для большинства твердых тел $\alpha \approx (10^{-6} \div 10^{-5}) \text{K}^{-1}$ и незначительно зависит от температуры.

При нагревании тела от 0° до $t^\circ\text{C}$ его объем изменяется от V_0 до V по закону:

$$V = V_0(1 + \beta t),$$

откуда коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 t}.$$

Коэффициент объемного расширения определяет относительное изменение объема $\Delta V / V_0$ при нагревании тела на один градус.

Связь коэффициентов α и β : $\beta = 3\alpha$.

Плотность (ρ) твердых тел при их тепловом расширении изменяется по закону:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta t},$$

где ρ и ρ_0 – соответственно плотность тела при t° и 0°C .

У твердых тел и жидкостей тепловое расширение связано с несимметричностью (ангармонизмом) тепловых колебаний атомов, благодаря чему межатомные расстояния с ростом температуры увеличиваются.

Тепловое расширение тел учитывается при конструировании всех установок, приборов и машин, работающих в переменных температурных условиях.

Теплопроводность

Теплопроводность – один из видов переноса теплоты от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры.

При теплопроводности перенос энергии осуществляется в результате непосредственной передачи энергии от частиц (молекул, атомов, элементов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией.

Для определения количества теплоты, перенесенной при теплопроводности, вводится понятие теплового потока.

Тепловым потоком называют количество теплоты, проходящее через площадку в 1 м^2 за единицу времени.

Если через площадку S за время τ проходит количество теплоты Q , то тепловой поток тепла j

$$j = \frac{Q}{S\tau}.$$

Поток тепла, как показывает опыт, имеет место только тогда, когда температура среды меняется от точки к точке. Теплота при этом всегда переходит от точек с большей температурой к точкам с меньшей температурой. Простейшим является случай распространения тепла внутри однородной пластинки толщиной l и площадью S , удовлетворяющей условию $l \ll \sqrt{S}$, т.е. толщина её много меньше ширины и высоты.

Если на одной стороне пластинки (рис. 10) поддерживается постоянная температура t_1 , а на другой – постоянная температура t_2 , причем $t_2 > t_1$, то опыт показывает, что тепловой поток прямо пропорционален разности температур $t_2 - t_1$ и обратно пропорционален толщине пластинки l .

Математически это можно представить в виде:

$$j = \lambda \frac{t_2 - t_1}{l} \text{ (закон Фурье),}$$

где λ – положительная постоянная величина, называемая *коэффициентом теплопроводности* и зависящая только от материала пластины и его агрегатного состояния.

Этот закон справедлив не только для твердых тел, но и для жидкостей и газов. Однако для жидкостей и газов при использовании этого закона нужно быть весьма осторожными. Для них он применим, если в процессе теплопередачи не происходит перемещения вещества, т.е. конвекции.

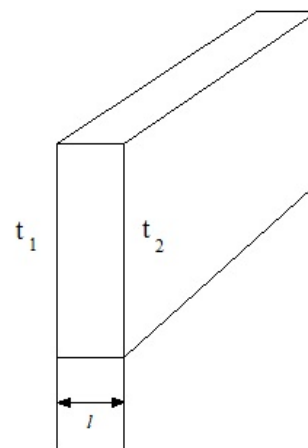


Рис. 10

2.7.2. Свойства жидкостей

Тепловое расширение жидкости

Жидкое состояние, занимая промежуточное положение между газами и кристаллами, сочетает в себе некоторые черты обоих этих состояний.

В частности, для жидкостей, как и для кристаллических тел, характерно наличие определенного объема, и вместе с тем жидкость, подобно газу, принимает форму того сосуда, в котором она находится.

Для кристаллического состояния характерно упорядоченное расположение частиц (атомов или молекул), в газах, в этом смысле, царит полный хаос. Согласно рентгенографическим исследованиям, в отношении характера расположения частиц жидкости также занимают промежуточное положение. В расположении частиц жидкости наблюдается так называемый *ближний порядок*. Это означает, что по отношению к любой частице расположение ближайших к ней соседей является упорядоченным. Однако по мере удаления от данной частицы расположение по отношению к ней других частиц становится все менее упорядоченным, и довольно быстро порядок в расположении частиц полностью исчезнет.

В кристаллах имеет место *дальний порядок*: упорядоченное положение частиц по отношению к любой частице наблюдается в пределах значительного объема.

Наличие в жидкостях ближнего порядка служит причиной того, что структуру жидкостей называют квазикристаллической (кристаллоподобной). Из-за отсутствия дальнего порядка жидкости, за немногим исключением, не обнаруживают анизотропии, характерной для кристаллов с их правильным расположением частиц.

Существуют твердые тела, которые во многих отношениях оказываются ближе к жидкостям, чем к кристаллам. Такие тела, называемые *аморфными*, не обнаруживают анизотропии. В расположении их частиц имеется, как и у жидкостей, только ближний порядок. Переход от аморфного твердого тела к жидкости при нагревании осуществляется непрерывно, в то время как переход от кристалла к жидкости совершается скачком. Все это дает основание рассматривать аморфные твердые тела как переохлажденные жидкости, частицы которых вследствие сильно возросшей вязкости имеют ограниченную подвижность.

Типичным примером аморфного твердого тела служит стекло. К числу аморфных тел относятся также смолы, битумы и т.п.

Френкель Я.И. разработал теорию, согласно которой молекула жидкости в течение некоторого времени колеблется около своих положений равновесия, как бы находясь в узле кристаллической решетки. Время оседлой жизни молекулы жидкости очень мало ($\approx 10^{-10} \div 10^{-8}$ с), после чего молекула жидкости переходит в новое положение равновесия (новый узел). В простейших случаях пробег молекулы жидкости совпадает с

постоянной решетки – расстоянием между двумя соседними узлами решетки. Молекула, находящаяся в узле решетки, совершает тепловые колебания с амплитудой, меньшей, чем постоянная решетки.

Поверхностное натяжение

Рассмотрим свободную поверхность жидкости, отделяющую ее от газообразной среды. В поверхностном слое появляется нескомпенсированность молекулярных сил. Действительно, любая молекула внутри тела, вдали от поверхности, окружена со всех сторон такими же молекулами, действие которых взаимно компенсируется.

Молекула в поверхностном слое имеет одинаковых соседей лишь с одной стороны. В частности, в случае свободной поверхности имеются соседи лишь со стороны жидкости, тогда как со стороны газа они практически отсутствуют (из-за его большой разреженности). В результате молекулы, находящиеся в поверхностном слое, испытывают силу притяжения со стороны молекул, находящихся внутри жидкости. Толщина поверхностного слоя, в котором проявляется нескомпенсированность молекулярных сил, равна примерно диаметру молекул ($\approx 10^{-9}$ м – по оценкам самой общей картины взаимодействия молекул в жидкости).

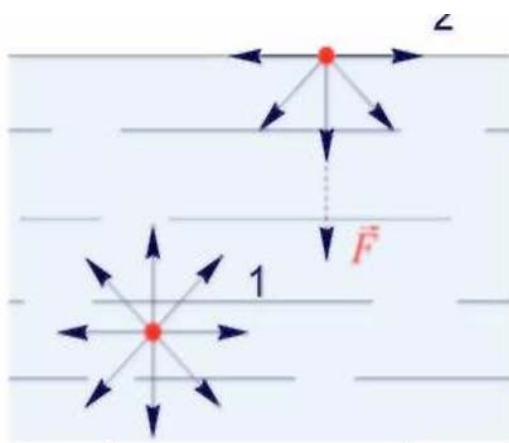


Рис. 11

Для перемещения молекулы на поверхность жидкости требуется затратить работу. При этом размещение молекулы в поверхностном слое увеличивает поверхность жидкости на конечную величину. Наоборот, увеличение поверхности на величину ΔS однозначно связано с определенным числом молекул, размещаемых в поверхностном слое.

Работа A , затрачиваемая в таком квазистатическом процессе при постоянной температуре, пропорциональна ΔS и записывается в виде:

$$A = \sigma \Delta S.$$

Коэффициент пропорциональности σ представляет собой основную характеристику поверхности раздела, зависящую от природы сред и их теплового состояния. Называют его *коэффициентом поверхностного натяжения* или просто *поверхностным натяжением*.

Говоря о величине σ , необходимо всегда указывать, к каким средам она относится. Просто о поверхностном натяжении жидкости говорят лишь для поверхности раздела ее воздухом или парами. В таком случае σ всегда уменьшается при нагревании.

По своему физическому смыслу σ является работой, которую надо затратить, чтобы изотермически и квазистатически увеличить поверхность жидкости на единицу при сохранении ее объема. Работа, как известно, служит мерой изменения энергии. Очевидно, что эта энергия должна быть потенциальной, так как она связана с размещением молекул в поверхностном слое при постоянной температуре. При размещении молекул в поверхностном слое затрачивается работа. Поэтому потенциальная энергия таких молекул больше потенциальной энергии взаимодействия молекул внутри жидкости. Эту избыточную потенциальную энергию молекул в поверхностном слое называют *энергией поверхностного натяжения* или просто *поверхностной энергией* $U_{\text{пов}}$, изменение которой $\Delta U_{\text{пов}}$ по определению равно работе A при изотермическом изменении поверхности раздела на величину ΔS , т.е. $U_{\text{пов}} = A = \sigma \Delta S$.

Из механики известно, что силы действуют так, чтобы привести систему в состояние с наименьшей потенциальной энергией. И силы поверхностного натяжения действуют так, чтобы энергия поверхностного натяжения принимала наименьшее возможное значение. Поэтому поверхность раздела сред стремится уменьшиться. Например, капля жидкости в свободном состоянии принимает шарообразную форму, так как только поверхность сферы при данном объеме имеет наименьшее значение. В земных условиях действует сила тяжести, которая старается сдвинуть каплю. Потенциальная энергия силы тяжести пропорциональна объему жидкости, а энергия поверхностного натяжения – ее поверхности. Поэтому относительное влияние силы тяжести по сравнению с влиянием поверхностного натяжения тем больше, чем больше объем тела. Для маленьких капель преобладает влияние поверхностного натяжения, и они принимают шарообразную форму.

Формула $A = \sigma \Delta S$, определяющая σ , в точности соответствует формуле $A = -p \Delta V$ для работы при квазистатическом изменении объема ΔV . Можно сказать, что σ играет для поверхности такую же роль, что и давление для объема. Размерность σ , как следует из определения, совпадает с размерностью энергии, отнесенной к единице площади поверхности ($\text{Дж}/\text{м}^2$), а также с размерностью силы, отнесенной к единице длины ($\text{Н}/\text{м}$). Это соотношение имеет не только размерный, но и глубокий физический смысл.

Оказывается, что **поверхностное натяжение σ** *представляет собой силу, действующую на единицу длины контура, ограничивающего участок поверхности раздела, и направленную касательно к поверхности по внутренней нормали к контуру.*

Смачивание. Краевой угол

При рассмотрении явлений на границе раздела различных сред следует иметь в виду, что поверхностная энергия жидкости или твердого тела зависит не только от свойств данной жидкости или твердого тела, но и от свойств того вещества, с которым они граничат. Только если одно вещество газообразное, химически не реагирует с другим веществом и мало в нем растворяется, можно говорить просто о поверхностной энергии (или коэффициенте поверхностного натяжения) второго жидкого или твердого тела. Если граничат друг с другом сразу три вещества: твердое, жидкое и газообразное (рис. 12), то вся система принимает конфигурацию, соответствующую минимуму суммарной энергии (поверхностной, в поле сил тяжести и т.п.).

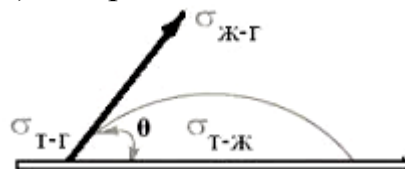


Рис.12

Пусть притяжение между молекулами твердого тела больше, чем между молекулами жидкости. Тогда коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_{тг}$ на границе раздела твердой поверхности и газа будет больше коэффициента $\sigma_{жг}$ на границе раздела жидкости и газа и коэффициента $\sigma_{тж}$ на границе раздела твердого тела и жидкости. При этом может оказаться энергетически более выгодным, чтобы жидкость растекалась по поверхности твердого тела.

Конечно, при растекании жидкости увеличивается поверхностная энергия на границе жидкости с газом. Однако это увеличение перекрывается более значительным уменьшением поверхностной энергии на границе раздела твердого тела и жидкости. В этом случае говорят, что жидкость полностью *смачивает* твердое тело. В свободном состоянии она будет обволакивать его со всех сторон, а само тело при этом будет как бы плавать в жидкости. Если же при растекании жидкости по поверхности кристалла не наблюдается уменьшения суммарной энергии поверхностного натяжения на границах раздела жидкой, твердой и газообразной сред, то тогда жидкость сама по себе без внешних воздействий не будет растекаться по твердой поверхности. В этом случае говорят, что жидкость *не смачивает* поверхность твердого тела.

Степень взаимодействия между молекулами твердого тела и жидкости, а следовательно, и степень смачиваемости твердой поверхности жидкостью принято характеризовать так называемым *краевым углом*.

Каждый, вероятно, не раз наблюдал, что поверхность у края в сосуде искривляется, отклоняется от плоской формы, наблюдаемой в средней части. Например, в хорошо промытом стакане вода около его стенки немного поднимается и образует вогнутую поверхность, или, как говорят, имеет вогнутый мениск. А ртуть в таком стакане образует выпуклый мениск, ее края вблизи стенки слегка опущены. Плоскость, касательная к

поверхности жидкости у ее края, образует с поверхностью стенки некоторый угол θ , называемый *краевым*. Можно показать, что этот угол зависит только от свойств соприкасающихся сред (точнее говоря, от поверхностных натяжений на границах раздела этих сред). Действительно, у стенки сосуда на краю жидкости соприкасаются три среды, молекулярное взаимодействие на границах которых может быть охарактеризовано соответствующими коэффициентами натяжения границ раздела. К линии соприкосновения трех сред приложены три силы поверхностных натяжений. Эти силы нормальны к линиям соприкосновения сред и направлены по касательной к поверхности соприкосновения соответствующих сред. Выше было показано, что эти силы, отнесенные к единичной длине линии соприкосновения, равны соответственно коэффициентам поверхностного натяжения на границе раздела двух сред: $\sigma_{тж}$, $\sigma_{тг}$ или $\sigma_{жг}$.

Поверхность жидкости устанавливается под таким углом θ к стенке сосуда, что равнодействующая сил поверхностных натяжений вдоль стенки равна нулю (результатирующая сил поверхностного натяжения, перпендикулярная стенке, уравновешивается при этом реакцией стенки):

$$\sigma_{тж} - \sigma_{тг} + \sigma_{жг} \cos \theta = 0.$$

$$\text{Отсюда } \cos \theta = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{тж}}{\sigma_{жг}}.$$

Из полученной формулы видно, что если $\sigma_{тг} > \sigma_{тж}$, т.е. поверхностное натяжение на границе раздела твердого тела с газом больше поверхностного натяжения на границе раздела твердой стенки с жидкостью, то $\cos \theta > 0$, краевой угол θ острый и мениск вогнутый. Это случай смачивания твердой поверхности жидкостью. При этом полному смачиванию соответствует угол $\theta = 0$. В случае обратного неравенства $\sigma_{тг} < \sigma_{тж}$, $\cos \theta < 0$ и угол θ тупой. Край жидкости при этом опущен, и мениск ее выпуклый. Это случай несмачивания твердой стенки жидкостью. Капли таких жидкостей, находясь на гладкой горизонтальной поверхности, как бы отжимаются от нее, стремясь уменьшить площадь контакта.

Влияние кривизны поверхности на сжатие жидкости

Рассмотрим поверхность жидкости, опирающуюся на некоторый плоский контур (рис. 13а).

Если поверхность жидкости не плоская, то стремление ее к сокращению приведет к возникновению давления, дополнительного к тому, которое испытывает жидкость с плоской поверхностью. В случае выпуклой поверх-

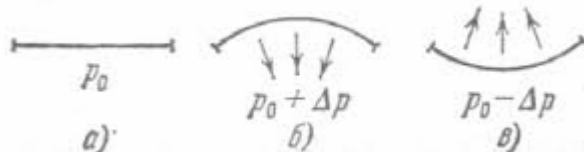


Рис. 13

ности это дополнительное давление положительно (рис. 13б), в случае вогнутой поверхности – отрицательно (рис. 13в). В последнем случае поверхностный слой, стремясь сократиться, растягивает жидкость.

Величина добавочного давления, очевидно, должна возрастать с увеличением коэффициента поверхностного натяжения σ и кривизны поверхности.

Вычислим добавочное давление для сферической поверхности жидкости. Для этого рассечем мысленно сферическую каплю жидкости диаметральной плоскостью на два полушария (рис. 14).

Из-за поверхностного натяжения оба полушария притягиваются друг к другу с силой

$$F = l\sigma = 2\pi R\sigma.$$

Эта сила прижимает друг к другу оба полушария по поверхности $S = \pi R^2$ и, следовательно, обуславливает дополнительное давление

$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{2\pi R\sigma}{\pi R^2} = \frac{2\sigma}{R}. \quad (1)$$

Кривизна сферической поверхности всюду одинакова и определяется радиусом сферы R . Очевидно, что чем меньше R , тем больше кривизна сферической поверхности. Кривизну произвольной поверхности принято характеризовать так называемой *средней кривизной*, которая может оказаться различной для разных точек поверхности.

Средняя кривизна определяется через кривизну нормальных сечений. *Нормальным сечением* поверхности в некоторой точке называется линия пересечения этой поверхности с плоскостью, проходящей через нормаль к поверхности в рассматриваемой точке. Если поверхность жидкости не является сферической, то величина добавочного давления определяется по формуле Лапласа

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – радиусы двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости, проведенных через нормальный единичный вектор \vec{n} , восстановленный к этой поверхности в рассматриваемой точке. Для случая $R_1 = R_2$ формула (2) совпадает с формулой (1).

Дополнительное давление Δp есть величина алгебраическая. В случае выпуклой поверхности Δp имеет положительное, а в случае вогнутой – отрицательное значение. Если $\Delta p < 0$, то поверхностный слой, стремясь сократиться, будет не сжимать, а растягивать жидкость.

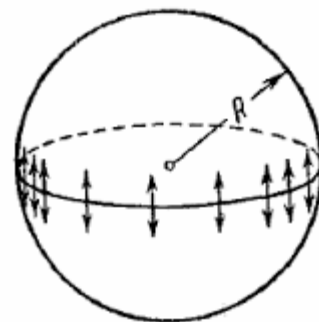


Рис. 14

Аналогично, радиус кривизны нормального сечения поверхности является величиной алгебраической. Если центр кривизны нормального сечения лежит над поверхностью жидкости, радиус кривизны считается отрицательным; если центр кривизны находится под данной поверхностью жидкости, соответствующий радиус кривизны считается положительным. Если поверхность жидкости представляет собой плоскость, то $R_1 = \infty$ и $R_2 = \infty$. В этом случае согласно формуле (2) $\Delta p = 0$.

Капиллярные явления

В зависимости от свойств жидкости, твердого тела и газа, с которыми граничит жидкость, краевой угол θ , как было показано выше, может принимать различные значения. Величина краевого угла θ характеризует степень искривления поверхности жидкости вблизи твердого тела.

Если $\theta = 0$, то имеет место полное смачивание и жидкость неограниченно растекается по поверхности твердого тела.

Если $\theta = \pi$, то имеет место полное несмачивание – поверхность, по которой граничит жидкость и твердое тело, стягивается в точку.

Частичному смачиванию соответствует угол $0 < \theta < \pi/2$ (рис. 15а), частичному несмачиванию – угол $\pi/2 < \theta < \pi$ (рис. 15б).

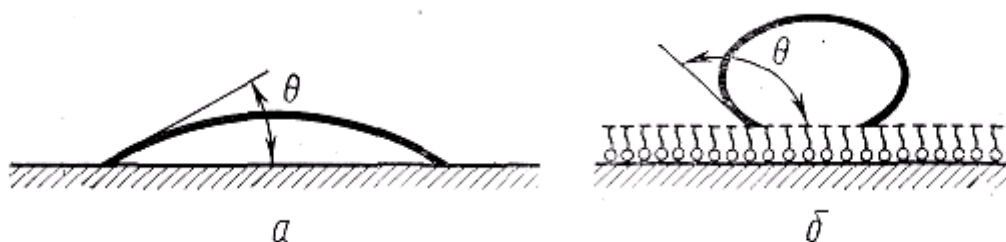


Рис. 15

В узкой трубке с достаточно малым радиусом поперечного сечения вся поверхность жидкости может оказаться искривленной. Такая трубка называется *капиллярной*, а поверхность жидкости в капиллярной трубке будет представлять собой *мениск* (от «*meniskos*» – выпуклость).

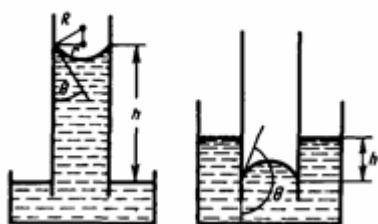


Рис. 16

Опустим капиллярную трубку радиусом r в жидкость с плоской поверхностью. Если жидкость смачивает поверхность трубки (частичное смачивание), то уровень жидкости в капиллярной трубке будет выше уровня плоской поверхности жидкости на величину h (рис. 16).

В этом случае краевой угол смачивания $0 < \theta < \pi/2$, а форма мениска окажется вогнутой. Под искривленной поверхностью в капилляре на

уровне мениска давление жидкости p будет меньше атмосферного давления на величину добавочного давления Δp , т.е.

$$p = p_0 + \Delta p,$$

где Δp определяется по формуле

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (\Delta p < 0). \quad (3)$$

Величину h найдем из условия, что давление в капиллярной трубке на уровне горизонтальной плоской поверхности жидкости складывается из давления p под мениском и гидростатического давления ρgh . Это давление должно равняться атмосферному давлению p_0 , т.е.

$$p + \rho gh = p_0 \Rightarrow p_0 + \rho gh = p_0 \Rightarrow \Delta p = -\rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости.

Предположим, что мениск представляет собой часть поверхности шара и радиус кривизны мениска равен R . Тогда $R = -\frac{r}{\cos \theta}$ (появление знака минус в последнем равенстве обусловлено тем, что центр кривизны мениска лежит над поверхностью жидкости, т.е. должно выполняться условие $R < 0$, где $\cos \theta > 0$). Тогда из формулы Лапласа (2) получим

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} = \pm \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (4)$$

где r – радиус капиллярной трубки.

Подставляя найденную величину Δp в равенство (4), окончательно получим

$$-\frac{2\sigma \cos \theta}{r} = -\rho gh \Rightarrow h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r\rho g}. \quad (5)$$

При полном смачивании $\cos \theta = 1$, следовательно, формула (5) в этом случае приобретает вид

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}. \quad (6)$$

Анализируя полученный результат, можно сделать вывод, что формула (5) справедлива и в случае смачивания, и в случае, если жидкость не смачивает поверхность. При этом величину h надо считать алгебраической. Если имеет место смачивание, то в формуле (5) $\cos \theta > 0$ и $h > 0$, если жидкость не смачивает трубку, то $\cos \theta < 0$ и $h < 0$.

Изменение высоты уровня жидкости в узких трубках, опущенных одним концом в жидкость, получило название *капиллярности*. В более

общем смысле под капиллярностью понимают все явления, обусловленные силами поверхностного натяжения.

Капиллярные явления играют большую роль в природе и технике. Множество мельчайших капилляров имеется в растениях. В деревьях по капиллярам влага из почвы поднимается вверх и через листья испаряется в атмосферу. В почве имеются капилляры, которые тем уже, чем плотнее почва. Вода по ним поднимается до поверхности и быстро испаряется, а земля становится сухой. Ранняя весенняя вспашка земли разрушает капилляры, т.е. сохраняет подпочвенную влагу и увеличивает урожай. В технике капиллярные явления используют, например, в процессах сушки капиллярно-пористых тел, как один из способов подвода смазки к деталям машин (фитильный способ подачи масла) и т.п. Большое значение капиллярные явления имеют в строительном деле. Например, чтобы кирпичная стена не сырела от влаги, поднимающейся из почвы по порам, между фундаментом дома и стеной делают гидроизоляцию, покрывая фундамент горячим (жидким) битумом или обкладывая водонепроницаемым рулонным материалом (толь или рубероид).

Тепловое расширение жидкости

С ростом температуры жидкости возрастает кинетическая энергия теплового движения молекул. С термодинамической точки зрения это означает, что увеличивается потенциальная энергия взаимодействия. Изменение объема жидкости в процессе ее нагревания называется *тепловым расширением*. Для жидкостей тепловое расширение связано с несимметричностью (ангармонизмом) тепловых колебаний атомов, благодаря чему межатомные расстояния с ростом температуры увеличиваются.

Объемное расширение жидкости характеризуется *температурным коэффициентом объемного расширения* β в данном интервале температур.

Объем жидкости V при температуре t определяется по формуле

$$V = V_0(1 + \beta\Delta t), \quad (7)$$

где V_0 – начальный объем жидкости, $\Delta t = t_2 - t_1$ – изменение температуры.

Для большинства жидкостей $\beta > 0$, но существуют исключения, например вода при нагревании от 0 до 4°C сжимается.

При нагревании жидкости изменяется плотность вещества $\rho = m/V$, или

преобразуя формулу (7), получим:

$$\rho = \frac{m}{V_0(1 + \beta t)} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t},$$

где ρ_0 – плотность при 0°C.

2.7.3. Свойства газов

Газом называют агрегатное состояние вещества, в котором все его частицы (атомы, молекулы) *слабо взаимодействуют между собой* и, двигаясь, заполняют весь предоставляемый ему объем.

Газообразное состояние вещества является самым распространенным состоянием вещества Вселенной. Солнце, звезды, облака межзвездного вещества, туманности, атмосферы планет состоят из газов, или нейтральных, или ионизованных (плазмы). Газы широко распространены в природе: они образуют атмосферу Земли, в значительных количествах содержатся в твердых земных породах, растворены в воде океанов, морей и рек. Встречающиеся в природных условиях газы представляют собой, как правило, смеси химически индивидуальных газов.

Механические свойства газов во многом сходны со свойствами жидкости. Как и жидкости, газы чрезвычайно подвижны и совершенно не обладают упругостью по отношению к изменению формы; по отношению же к изменению объема газы упруги: силы давления газа – это силы его упругости. Чем сильнее сжат газ, тем с большей силой он давит на соприкасающиеся с ним тела. Силы давления покоящегося газа, как и жидкости, всегда перпендикулярны к поверхности соприкасающихся с ним тел. Как и в жидкостях, давление газа в данной точке не зависит от ориентации участка поверхности, на который оно действует. Для газов справедлив также закон Паскаля: *давление, создаваемое поверхностными силами, передается без изменения в каждую точку газа.*

С точки зрения молекулярно-кинетической теории давление газов является результатом многочисленных ударов молекул газа о стенки сосуда, усредненных по времени и по стенкам сосуда.

Однако в механических свойствах газов и жидкостей имеются и существенные различия. Плотность газов в обычных условиях примерно в тысячу раз меньше плотности жидкостей. Например, масса кубического метра воздуха равна всего 1,3 кг, а масса кубического метра воды равна одной тонне.

Очень важным отличием газов от жидкостей является отсутствие у них определенного собственного объема. Водой можно заполнить сосуд до половины, но газ всегда целиком заполняет весь сосуд, в котором он находится. Нет никакого предела для увеличения объема данной массы газа, если на него не действует сила тяжести или если его расширение не ограничивается стенками сосуда. Поэтому газы никогда не образуют свободной поверхности.

Газы сжимаемы в тысячи раз более, чем жидкости. Плотность жидкости меняется ничтожно даже при очень большом давлении. Напротив, сильно сжать газ и тем самым сильно увеличить его плотность можно уже сравнительно малым давлением. В отличие от твердых тел и жидкостей, объем газов существенно зависит от давления и температуры.

Характерными свойствами большинства газов являются прозрачность, бесцветность и легкость. Это затрудняло их изучение, поэтому физика и химия газов развивались медленно. Только к середине 19 в. были установлены основные закономерности, которым подчиняются газы. К ним относятся законы Бойля – Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Авогадро.

Наиболее полно изучены были физические свойства достаточно разреженных газов, средние расстояния между молекулами которых значительно больше радиуса действия межмолекулярных сил. Такой газ, молекулы которого рассматриваются как невзаимодействующие материальные точки, называется *идеальным*. Практически все газы ведут себя как идеальные при не слишком высоких давлениях и не слишком низких температурах.

Уравнение состояния идеального газа было получено в 1834 Б. Клапейроном и обобщено Д. И. Менделеевым для любой массы газа

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

где p – давление; V – объем; T – абсолютная температура; m – масса; M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

Внутренняя энергия идеального газа (среднее значение полной энергии всех его частиц) зависит только от температуры газа. Внутренняя энергия одноатомного газа, имеющего 3 поступательные степени свободы и состоящего из N атомов, равна

$$U = \frac{3}{2}NkT,$$

где T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана.

При повышении плотности газа его свойства перестают быть идеальными, процессы столкновения начинают играть все большую роль и размерами молекул и их взаимодействиями пренебречь уже нельзя. Такой газ называют *реальным*. Поведение реальных газов, в зависимости от их температуры, давления, физической природы, в большей или меньшей степени отличается от законов идеальных газов. Одним из основных уравнений, описывающих свойства реального газа, является уравнение Ван-дер-Ваальса, при выводе которого были учтены две поправки: на силы притяжения между молекулами и на их размер:

$$\left(p + \left(\frac{m}{M} \right)^2 \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{m}{M}b \right) = \frac{m}{M}RT,$$

где V – объем всего газа; m – масса газа; M – молярная масса; a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса, зависящие от химической природы газа.

В этом уравнении $\left(\frac{m}{M}\right)^2 \frac{a}{V^2} = p_i$ – давление, обусловленное силами

взаимодействия молекул реального газа; $\frac{m}{M}b = V_i$ – собственный объем молекул.

Любое вещество можно перевести в газообразное состояние, изменяя давление и температуру. Поэтому возможную область существования газообразного состояния графически изображают на p, T -диаграмме.

T_c – критическая температура, ниже которой область газообразного состояния вещества ограничена кривыми сублимации (возгонки) и парообразования (кипения), т.е. при любом давлении ниже критического p_k существует температура T , определяемая кривой сублимации или парообразования, выше которой вещество становится газообразным. При температурах ниже T_c можно сконденсировать газ – перевести его в другое агрегатное состояние (твердое или жидкое). При этом фазовое превращение газа в жидкость или твердое тело происходит скачкообразно: незначительное изменение давления приводит к изменению ряда свойств вещества (например, плотности, теплоемкости и др.). Процессы конденсации газов, особенно сжижение газов, имеют важное техническое значение.

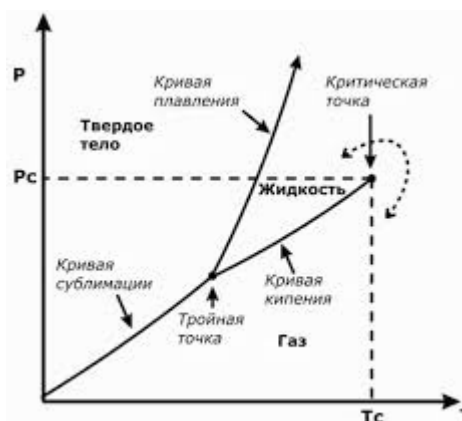


Рис. 17

Область газового состояния вещества очень обширна, и свойства газов при изменении температуры и давления могут меняться в широких пределах. Так, в нормальных условиях (при 0°C и атмосферном давлении 10^5 Па) плотность газа примерно в 1000 раз меньше плотности того же вещества в твердом или жидком состоянии. С другой стороны, при высоких давлениях вещество, которое при сверхкритических температурах можно считать газом, обладает огромной плотностью (например, в центре некоторых звезд $\sim 10^9$ г/см³).

Внутреннее строение молекул газа слабо влияет на давление, температуру, плотность и связь между ними, но существенным образом влияет на его электрические и магнитные свойства. Калорические свойства газов, такие, как теплоемкость, энтропия и т.д., также зависят от внутреннего строения молекул.

Электрические свойства газов определяются возможностью ионизации молекул или атомов, т.е. появлением в газе электрически заряженных частиц (ионов и электронов). При отсутствии заряженных частиц газы являются хорошими диэлектриками. С ростом концентрации зарядов

электропроводность газов увеличивается. При температурах выше нескольких тысяч Кельвинов газ частично ионизируется и превращается в плазму.

По магнитным свойствам газы делятся на диамагнетики (инертные газы, CO_2 , H_2O) и парамагнетики (O_2). Молекулы диамагнитных газов не имеют постоянного магнитного момента и приобретают его лишь под действием магнитного поля. Те газы, молекулы которых обладают постоянным магнитным моментом, ведут себя как парамагнетики.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества.
2. Опишите характер движения и взаимодействие молекул в газах, жидкостях и твердых телах.
3. Оцените размеры и массу молекул.
4. Что изучает химия? Опишите основные этапы эволюции (концептуальные уровни) химического знания.
5. Что называют химическим равновесием? В чем состоит принцип Ле-Шателье?
6. Опишите механические свойства твердых тел. Сформулируйте закон Гука.
7. Охарактеризуйте тепловые свойства твердых тел.
8. Опишите свойства жидкостей.
9. Что такое поверхностное натяжение?
10. Чем объясняются явления смачивания и несмачивания?
11. В чем заключаются капиллярные явления?
12. Охарактеризуйте тепловые свойства жидкостей.
13. Опишите основные свойства газов.

3. СТРУКТУРА МЕГАМИРА

3.1. Общая характеристика Вселенной

Вселенная – самая крупная материальная система. Она представляет собой упорядоченную систему галактик, межгалактического вещества и излучения.

Для гигантских масштабов Вселенной применяют специальные единицы измерений:

1. *Астрономическая единица* – радиус орбиты Земли ($1 \text{ а.е.} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$).
2. *Световой год* – расстояние, которое проходит свет за один год ($1 \text{ св.г.} = 63240 \text{ а.е.} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м}$).
3. *Парсек* – *расстояние, с которого радиус земной орбиты (перпендикулярный лучу зрения) виден под углом в одну угловую секунду* ($1 \text{ пк} = 206265 \text{ а.е.} = 3,26 \text{ св.г.} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ м}$).

Число галактик в наблюдаемой части Вселенной – 10^{11} . Средняя плотность вещества Вселенной – 10^{-29} кг/м^3 . Вселенная имеет ячеистую структуру.

3.2. Космологические теории эволюции Вселенной

1. Теория стационарного состояния Вселенной

Согласно первой модели Вселенной, предложенной в 1917 году А. Эйнштейном, Вселенная не претерпевает эволюции. В ней могут изменяться отдельные объекты, но в целом Вселенная неизменна, безгранична и имеет форму сферы с равномерно распределенными в ней галактиками. Эта модель, базирующаяся на теории относительности, характеризовала стационарное состояние Вселенной и, как показали астрофизические наблюдения, оказалась неверной.

2. Теория нестационарного состояния Вселенной

Её предложил в 1922 году профессор Петроградского университета А.А. Фридман. В результате анализа космологических уравнений Эйнштейна он пришёл к выводу о том, что Вселенная не может находиться в стационарном состоянии – она должна расширяться либо сужаться. Это определяется величиной средней плотности материи во Вселенной относительно ее критического значения $\rho_{\text{кр}} \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3$. Если средняя плотность материи во Вселенной $\rho < \rho_{\text{кр}}$, то Вселенная бесконечна, незамкнута и расширяется. При $\rho > \rho_{\text{кр}}$ галактики будут сбегаться, что соответствует сжимающейся (закрытой) Вселенной. В настоящее время средняя плотность

вещества Вселенной оценивается равной 10^{-29} кг/м³, что означает, что наша Вселенная открытая и будет расширяться бесконечно. Таким образом, Вселенная представляется *не только безграничной, но и пространственно бесконечной*.

Теоретический вывод Фридмана о расширении Вселенной был подтверждён в 1929 году американским астрономом Э. Хабблом. Проведенные им измерения скоростей галактик свидетельствовали о том, что все далекие галактики удаляются от нашей Галактики, причем *скорость удаления галактики v возрастает прямопропорционально расстоянию l до неё, то есть $v = Hl$* (закон Хаббла), где H – постоянная Хаббла.

По современным данным, её величина $H = 75$ км/(с·Мпк). Таким образом, скорость разбегания галактик увеличивается примерно на 75 км/с на каждый один миллион парсек. При данной скорости экстраполяция к прошлому приводит к выводу, что возраст Вселенной составляет около 15 млрд лет.

Постоянная Хаббла постоянна в том смысле, что не зависит от l , с течением же времени её значение может изменяться.

3. Концепция Большого взрыва.

Исходя из положения о том, что Вселенная в настоящее время находится в состоянии расширения, ученые, оперируя математическими моделями, пришли к заключению, что в далеком прошлом она должна была находиться в сжатом состоянии.

Расчеты, выполненные учеными, показали, что около 13–15 млрд лет назад вещество Вселенной было сконцентрировано в очень малом объеме, (около 10^{-33} см³) и имело сверхвысокую плотность $\rho = 10^{93}$ г/см³ при температуре 10^{27} К. Это первоначальное состояние вещества Вселенной называется сингулярным. Предполагают, что наблюдаемая в настоящее время Вселенная возникла вследствие гигантского взрыва этой исходной космической материи – **Большого Взрыва Вселенной**. Концепция Большого взрыва объясняет многие моменты эволюции Вселенной, но не отвечает на вопрос, из чего же она возникла. Эту задачу решает теория инфляции.

4. Теория инфляции (теория раздувающейся Вселенной)

Эта теория возникла как дополнение и развитие концепции Большого взрыва. Из неё следует, что Вселенная возникла из вакуума. В соответствии с современными научными представлениями в вакууме отсутствуют физические частицы, поля и волны. Однако в нем имеются виртуальные частицы, которые рождаются за счет энергии вакуума и тут же исчезают. Когда вакуум по какой-то причине в некоторой точке возбудился и вышел из состояния равновесия, то виртуальные частицы стали захватывать энергию без отдачи и превращаться в реальные частицы. Этот период зарождения Вселенной и называют фазой раздувания (или инфляции). В фазе инфляции пространство нашей Вселенной увеличивается от миллиардной

доли размера протона до нескольких сантиметров. Такое расширение в 10^{50} раз больше, чем предполагалось в концепции Большого взрыва. К концу фазы раздувания Вселенной образовалось огромное множество реальных частиц вместе со связанной ими энергией.

При разрушении возбужденного вакуума высвободилась гигантская энергия излучения, а некая суперсила сжала частицы в сверхплотную материю. Из-за высокой температуры и огромного давления Вселенная продолжала раздувание, но теперь уже с ускорением. В итоге сверхплотная и сверхгорячая материя взорвалась. В момент Большого взрыва тепловая энергия превратилась в механическую и гравитационную энергии масс. Это означает, что Вселенная возникла в соответствии с законом сохранения энергии.

Таким образом, согласно теории инфляции Вселенная на ранних стадиях своего возникновения имела неустойчивое вакуумоподобное состояние с большой плотностью энергии. Эта энергия, как и исходная материя, возникла из квантового вакуума, то есть из ничего.

5. В середине XX в. формируется концепция горячей Вселенной.

Согласно этой концепции, на ранней стадии развития (вскоре после Большого взрыва) Вселенная была очень горячей ($T \sim 10^{27}$ К) и заполненной частицами. Кинетическая энергия частиц при такой температуре была достаточной, чтобы при их столкновениях рождались самые разнообразные новые частицы. В результате весьма быстро установился равновесный состав родившейся Вселенной: количество частиц каждого сорта определялось исключительно их массой (то есть энергией покоя). Этот вывод не зависит от характера взаимодействия между частицами, поскольку выражает вероятность обнаружить систему в состоянии с энергией, отличающейся от среднего значения на E , зависит только от величины E и температуры T и пропорциональна $e^{-E/kT}$, где e – основание натурального логарифма, k – постоянная Больцмана. Чем больше масса частицы, тем больше ее энергия и соответственно меньше вероятность возникнуть в результате тепловых столкновений.

К моменту времени 10^{-6} с кварки объединяются и образуют барионы (частицы с полуцелым спином) и мезоны (частицы с целым или нулевым спином). Важнейшие из барионов – протоны и нейтроны. Сильное взаимодействие между ними осуществляется не просто элементарными глюонами, а составными частицами-переносчиками – пионами, каждый из которых состоит из кварка и антикварка. Барионы и мезоны, как сильно взаимодействующие частицы, относятся к классу адронов. Поэтому этап эволюции Вселенной продолжительностью от 10^{-43} до 10^{-4} с называют *адронной эрой* в истории Вселенной. За это время температура падает до 10^{12} К, а плотность материи понижается до $\rho = 10^{14}$ кг/м³.

Дальнейшая тенденция в развитии Вселенной обусловлена ее охлаждением и связана с последовательным синтезом все более сложных веществных структур из этих частиц с участием всех видов взаимодействий.

По мере понижения температуры энергия теплового движения перестает быть достаточной для рождения тяжелых частиц. Все они нестабильны, и потому до наших дней не дожили (произошло вымирание («вымораживание») тяжелых частиц).

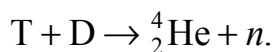
В ту же эпоху произошло нарушение важнейшей симметрии – между частицами и античастицами, в результате которого частиц оказалось на одну миллиардную долю больше, чем античастиц (именно из этой доли состоят сегодняшние звезды, планеты и люди: все остальные частицы и античастицы взаимно *аннигилировали*, превратившись в электромагнитное излучение), а также полной симметрии (*равных количеств*) протонов и нейтронов. Нейтроны как более массивные частицы оказались неустойчивыми и стали распадаться по схеме $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$. Из двух нуклонов – протона и нейтрона – существование протона энергетически более выгодно. В общем случае эта реакция обратима, но при понижении температуры скорость обратной реакции резко падает, в результате чего количество нейтронов уменьшилось до 15–20 % от всех нуклонов. В течение времени то 10^{-4} до 300с преобладали подобные процессы с участием лептонов (электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино). Этот второй этап в эволюции Вселенной называется *лептонной эрой*.

Если бы процессы распада нейтронов происходили и дальше, то через два-три часа (свободный нейтрон распадается в среднем за 15 минут) нейтронов во Вселенной практически не осталось бы. Последствия были бы поистине ужасны. Единственный химический элемент, ядра атомов которого не содержат нейтронов – водород. Вселенная могла бы состоять из одного водорода, и в этом случае в ней не было бы ни звезд, ни планет, ни живых существ.

Спасло ситуацию продолжающееся уменьшение температуры (ниже 10^9 К), когда становятся возможными процессы образования сложных ядер. Эта *эпоха нуклеосинтеза* занимает время внутри лептонной эры от 1 до 300 с после Большого взрыва. В этом интервале времени физические условия во Вселенной таковы, что кванты и другие частицы имеют относительно небольшие энергии и не в состоянии разрушить ядра простейшего сложного элемента – тяжелого изотопа водорода (дейтерия) D, образовавшиеся в результате соединения нейтронов с протонами по схеме $n + p \rightarrow D + \gamma$. Тут же происходят и дальнейшие термоядерные реакции с возникновением ядер сверхтяжелого изотопа водорода (трития) T и изотопов гелия ${}^3_2\text{He}$ и ${}^4_2\text{He}$:



Конечный продукт реакции – ядро гелия с массовым числом 4:



Реакции эти шли и раньше, но возникавшие альфа-частицы (${}^4_2\text{He}$) тут же разрушались из-за слишком высокой температуры. Когда же температура упала настолько, что нейтроны стали «вымерзать», одновременно ядра гелия приобрели способность «держаться» потерявшие свою силу удары окружающих частиц. За короткое время (несколько секунд) все нейтроны были связаны в ядра гелия. В ядре же они могут существовать бесконечно. Именно благодаря этому процессу до наших дней дожило достаточно нейтронов, чтобы обеспечить образование различных химических элементов.

Теоретический анализ привел к выводу, что к моменту времени 100 с образуется по массе 25 % ядер гелия, а 75 % нуклонов остаются в виде протонов (ядер водорода) и нейтронов. Более тяжелые ядра в условиях космического пространства образоваться не могут. Их синтез происходил и происходит до сих пор только в недрах звезд, где имеются необходимые температура и давление.

К моменту, когда возраст Вселенной достиг 10 с, лептонная эра ушла в прошлое, оставив после себя очень горячую плазму плотностью 5 кг/см^3 , преимущественно состоящую из фотонов. Началась новая эра эволюции, когда плотность электромагнитного излучения превышала плотность вещества. Её называют *радиационной эрой*.

В начале этой эры было еще довольно много лептонов, но за счет аннигиляции они быстро исчезали, превращаясь в излучение. Вселенная от состояния, когда плотность массивных частиц была близка к плотности фотонов, перешла к состоянию, в котором плотность фотонов на много порядков превосходила плотность вещественных частиц и практически полностью стала состоять из фотонов и нейтрино. Появились условия, при которых среда стала прозрачной для излучения (радиации). Радиация словно оторвалась от вещества, с которым до того она была связана неразлучно. Излучение, как и вещество, охлаждалось по мере расширения Метагалактики. В начале *эры радиации* его температура была тоже примерно 3000 К, а сейчас (спустя миллиарды лет, прошедшие с начала расширения Вселенной) – всего $\sim 3 \text{ К}$. Это излучение является изотропным с точностью, по крайней мере, до 10^{-4} и называется *реликтовым излучением*. Оно равномерно распределено во Вселенной. Это свидетельствует о том, что молодая Вселенная была однородной, бесструктурной, а структуры – скопления галактик, галактики и звезды – возникли на более поздних этапах её эволюции.

Реликтовое излучение было экспериментально обнаружено в 1965 году американскими астрофизиками А. Пензиасом и Р. Вильсоном (удостоен-

ными за это открытие в 1967 году Нобелевской премии). Длина волны реликтового излучения от нескольких миллиметров до десятков сантиметров, а интенсивность очень мала и соответствует излучению абсолютно чёрного тела с температурой около 3 К.

Открытие реликтового излучения явилось одним из аргументов, подтверждающих концепцию расширяющейся горячей Вселенной. Другими убедительными аргументами, подтверждающими обоснованность космологической модели расширяющейся Вселенной, являются:

- расширение Вселенной в соответствии с законом Хаббла;
- однородность светящейся материи на расстояниях порядка 100 Мпк.

Таким образом, *расширяющаяся Вселенная – однородная, изотропная, нестационарная и горячая.*

В радиационную эру произошло еще одно важное событие – в результате синтеза образовалось первое ядро тяжелее водорода. Примерно через минуту после Большого Взрыва температура снизилась до 10^9 К. Вселенная остыла настолько, что при столкновении протона и нейтрона стали эффективно образовываться ядра дейтерия. При соударении двух ядер дейтерия стали возникать ядра гелия. За короткое время (примерно 3 часа) 20–25 % вещества Вселенной (по массе) превратилось в гелий. Это основной механизм происхождения гелия. В звездах образуется лишь сравнительно небольшое количество гелия. Более детально механизм дозвездного нуклеосинтеза описан выше.

Около 10^6 лет тому назад температура Вселенной понизилась до 3000 К. При такой температуре происходит объединение протонов и электронов в атомы водорода. Плазменное состояние вещества Вселенной сменяется состоянием нейтральных атомов (среди них уже есть атомы дейтерия и гелия) и излучение перестает взаимодействовать с веществом. Разделение вещества и излучения привело к усилению влияния первичных неоднородностей в распределении вещества, что, в свою очередь, привело к образованию галактик и сверхгалактик. Более мелкие неоднородности привели к образованию звезд.

3.2. Виды материи и их вклад в её общую плотность Вселенной

Видимая часть материи представляет собой обычное барионное вещество, состоящее из атомов, молекул и элементарных частиц. По современным представлениям, на видимую материю приходится около 4 % вещества во Вселенной, остальные 96 % составляют темная материя и темная энергия (рис. 18). К объектам видимой материи относятся звезды, планеты и т.д.

Тёмная материя – это скрытая масса, т.е. материя, невидимая в телескоп. Она не излучает и не поглощает электромагнитное или нейтринное излучения. Однако темная материя, как и обычное вещество, способна собираться в сгустки (размерами с галактику или скопление галактик), обладает массой и участвует в гравитационных взаимодействиях так же, как обычное вещество. Скорее всего, она состоит из новых, не открытых еще в земных условиях легких частиц, не взаимодействующих с излучением.

Тёмная материя обнаруживает себя косвенно по гравитационным эффектам, оказываемым на видимые объекты. К ним относятся:

1. *Гравитационное притяжение её больших скоплений.* Оно заставляет быстрее двигаться светящиеся звёзды и быстрее вращаться внешние части галактик. Тёмная материя удерживает по несколько тысяч галактик гравитационно связанными в скоплениях.

2. *Эффект «гравитационной линзы».* Он проявляется в виде искажения изображения видимого объекта. Например, удаленные галактики изображаются несколько раз под разными углами зрения.

Темная энергия, как и темная материя, составляет значительную часть скрытой массы Вселенной. Но в отличие от темной материи, она не собирается в сгустки, а равномерно заполняет всё пространство Вселенной. В галактиках и скоплениях галактик её столько же, сколько вне их. Темная энергия обладает гравитационным отталкиванием, которое и приводит к ускорению расширения Вселенной. В этом случае имеет смысл говорить об антигравитации: обычное гравитационное притяжение замедляло бы разбегание галактик, а в нашей Вселенной, получается, всё наоборот. Такая картина, вообще говоря, не противоречит общей теории относительности, однако для этого темная энергия должна обладать специальным свойством – отрицательным давлением. Это резко отличает её от обычных форм материи. Не будет преувеличением сказать, что *природа темной энергии – это главная загадка фундаментальной физики XXI века.* Эта форма материи доминирует в современную эпоху, её вклад в общую плотность материи составляет 74 %.

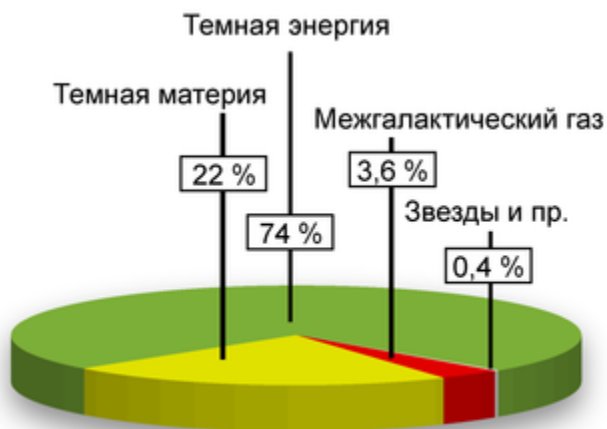


Рис. 18

3.4. Проблемы самоорганизации Вселенной

До начала расширения Вселенная находилась в состоянии чрезвычайно высокой плотности. При таких условиях проявляются не только гравитационные, но и квантовые эффекты, характерные для микромира. В настоящее время теории, которая объединяла бы их, нет. Поэтому вопрос о самоорганизации Вселенной ещё окончательно не решён. Одно из предположений, следующих из концепции самоорганизации, заключается в том, что первоначальный сгусток материи возник из физического вакуума. Физический вакуум – своеобразная форма материи, способная при определённых условиях «рождать» вещественные частицы без нарушения законов сохранения материи и движения.

В расширяющейся Вселенной возникают и развиваются случайные уплотнения вещества. Силы тяготения внутри уплотнения больше, чем вне их. Поэтому, несмотря на всеобщее расширение Вселенной, вещество в уплотнениях притормаживается, и его плотность постепенно нарастает.

Появление таких уплотнений стало началом рождения крупномасштабных структур во Вселенной.

3.5. Антропный принцип

Место человека во Вселенной в науке часто рассматривается на основе *антропного* принципа (от греч. *antropos* – человек), который в так называемой слабой формулировке утверждает, *что мы наблюдаем Вселенную с данными свойствами, потому что Вселенная с другими свойствами не содержала бы наблюдателей.*

В сильной формулировке антропного принципа утверждается, что *существование человека напрямую воздействует на свойства Вселенной.*

По современным представлениям, этот принцип вытекает из *взаимосвязи фундаментальных констант* (таких, как скорость света, гравитационная постоянная, постоянная Планка, масса электрона и др.).

Действительно, свойства окружающего нас мира явились результатом определенной согласованности соответствующих фундаментальных констант, и надо отметить, что интервал возможных значений этих фундаментальных констант, обеспечивающих нам мир, пригодный для жизни, очень мал.

Так, например, ослабление на несколько порядков *константы сильных взаимодействий* привело бы к тому, что на ранних стадиях расширения Вселенной образовывались бы, в основном, только тяжелые элементы, и в мире не было бы источников энергии (водорода и его соединений).

Если бы *гравитационная постоянная* была бы на несколько порядков меньше, то не возникло бы условий (достаточного сжатия протозвезды) для начала ядерных реакций в звездах.

Усиление слабых взаимодействий превратило бы на ранних этапах эволюции Вселенной все вещество в гелий, а значит, отсутствовали бы реакции термоядерного синтеза в звездах.

Усиление электромагнитного взаимодействия на несколько порядков привело бы к заключению электронов внутри атомных ядер и невозможности вследствие этого химических реакций и превращений.

Наконец, если бы первоначальная скорость расширения Вселенной была хотя бы на 0,1 % меньше критической скорости расширения, то Вселенная расширилась бы лишь до трех миллионных долей своего нынешнего радиуса, после чего начала бы сжиматься.

Согласно современным представлениям, развитие Вселенной характеризуется некоторой направленностью. В результате растет и разнообразие, и сложность материальных объектов, и на определенном этапе происходит образование живого вещества. Оно служит основой для появления разумной жизни, человека. С появлением человека Вселенная стала познавать себя и благодаря разуму целенаправленно развиваться. Период от Большого взрыва до целенаправленного развития Вселенной является одним из этапов ее эволюции. Из принципов эволюционной теории следует, что во Вселенной могут быть различные формы жизни и разума, различные внеземные цивилизации. Тем не менее, продолжающиеся эксперименты по прослушиванию Вселенной с целью поиска внеземных цивилизаций пока не дали положительных результатов. Эта ситуация получила название «феномена молчания Вселенной».

Таким образом, современное естествознание, используя антропный принцип, рассматривает человека как уникальный и вместе с тем естественный результат эволюции Вселенной.

3.6. Галактики и структура Вселенной

Вселенная – это весь существующий материальный мир, безграничный во времени и пространстве и бесконечно разнообразный по формам, которые принимает материя в процессе своего развития.

Часть Вселенной, доступная исследованию астрономическими средствами, соответствующими достигнутому уровню развития науки, называется *Метагалактикой*.

Главные составляющие Метагалактики – *галактики* – крупномасштабные звёздные системы, содержащие десятки, сотни миллиардов звёзд. Кроме звёзд и планет галактики содержат разряжённый газ и космическую пыль. Все объекты галактики находятся в гравитационном взаимодействии между собой.

Размеры галактик – от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч световых лет. А расстояние между галактиками достигает миллионов световых лет. Около 90 % массы галактик приходится на долю темной

материи и энергии. Природа этих невидимых компонентов пока не изучена. Существуют свидетельства того, что в центре многих галактик находятся сверхмассивные чёрные дыры. Пространство между галактиками практически не содержит вещества и имеет среднюю плотность меньше одного атома на кубический метр. Предполагают, что в видимой части Вселенной находится около 100 млрд галактик.

Мир галактик показал удивительное разнообразие их форм и физических характеристик. Первую и довольно удачную классификацию галактик по их внешнему виду выполнил еще Хаббл. По классификации, предложенной Хабблом в 1925 году, существуют несколько видов галактик:

- эллиптические;
- линзообразные;
- обычные спиральные;
- пересеченные спиральные;
- неправильные.

Эллиптические галактики – скопления звезд, имеющие сферическую или эллиптическую форму и равномерную яркость, постепенно убывающую от центра к краю (рис. 19). В них содержится незначительное количество газа и пыли, поэтому отсутствуют области, где могли бы зарождаться звезды, и нет молодых звезд.

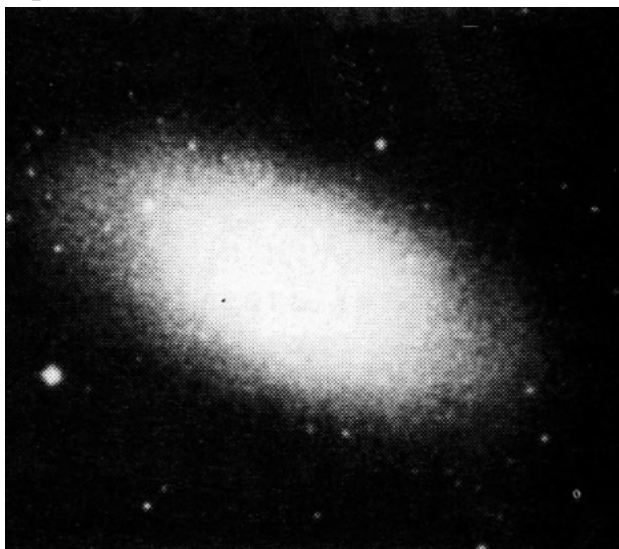


Рис. 19

Рождение звезд в таких галактиках происходит одновременно с образованием самих галактик. Цвет у эллиптических галактик красноватый, так как они состоят преимущественно из старых звезд. Размеры их различны – от самых больших и массивных, состоящих из миллиона миллионов звезд, до самых слабых скоплений, содержащих менее миллиона звезд. Доля эллиптических галактик в общем числе галактик в наблюдаемой части Вселенной – около 25 %.

Наиболее распространенным типом галактик являются *спиральные* (рис. 20). Их строение гораздо более сложное, чем эллиптических. Спиральная галактика имеет хорошо выраженное ядро, а также спиральные ветви (рукава) звездного происхождения, исходящие прямо из ядра, либо из так называемой перемычки (бара), в центре которого расположено ядро. Они имеют голубоватый цвет, так как в них присутствует много молодых гигантских звезд. Эти звезды возбуждают свечение диффузных газовых туманностей, разбросанных вместе с пылевыми облаками вдоль спираль-

ных ветвей. Диск спиральной галактики обычно окружён большим сфероидальным гало (светящееся кольцо вокруг объекта; оптический феномен), состоящим из старых звёзд второго поколения.



Рис. 20

Минимальная масса спиральной галактики – 1 млрд солнечных масс. Все спиральные галактики вращаются со значительными скоростями, поэтому звезды, пыль и газы сосредоточены у них в узком диске. Обилие газовых и пылевых облаков и присутствие ярких голубых гигантов говорит об активных процессах звездообразования, происходящих в спиральных рукавах этих галактик. Доля спиральных галактик в общем числе галактик в наблюдаемой части Вселенной – около 55 %.

Типичным представителем спиральных галактик является наша Галактика (Млечный Путь). В эту сравнительно молодую, по мнению большинства ученых, галактику входит Солнце вместе с планетной системой. Её центральная часть имеет вид выпуклости, от которой отходят два спиральных рукава, образуя плоский звездный диск толщиной около 70 тыс. световых лет. Млечный Путь состоит примерно из 150 млрд звёзд. В то время как сотни миллиардов звезд и туманностей движутся во всех направлениях внутри нашей Галактики, сама она медленно вращается вокруг своей оси, делая полный оборот каждые 180 млн лет. Наша Галактика чрезвычайно велика; от одного её края до другого световой луч путешествует около 100 тыс. земных лет. На расстоянии 23 000 световых лет от центра Галактики (на периферии) вблизи её экваториальной плоскости расположено Солнце. Солнце обращается вокруг центра Галактики со скоростью 190 км/с и совершает один оборот за 220 млн лет (галактический год).

Спутник Млечного Пути туманность Андромеды – одна из самых массивных среди известных спиральных галактик. Её масса равна 400 млрд масс Солнца (не включая темную материю).

Линзообразные галактики – это промежуточный тип между спиральными и эллиптическими (рис. 21). У них есть балдж, гало и диск, но нет спиральных рукавов. Их примерно 20 % среди всех звездных систем. В этих галактиках яркое основное тело – линза – окружено слабым ореолом. Иногда линза имеет вокруг себя кольцо.



Рис. 21

Неправильные (некулярные) – это галактики, которые не обнаруживают ни спиральной, ни эллиптической структуры (рис. 22). Чаще они имеют хаотичную форму («растрепанный» вид) без ярко выраженного ядра и спиральных ветвей. В процентном отношении составляют одну четверть от



Рис. 22

всех галактик. Большинство неправильных галактик в прошлом являлись спиральными или эллиптическими, но были деформированы гравитационными силами. Их масса менее 1 млрд солнечных масс. Самые малые из неправильных галактик не намного больше, чем скопления звезд и газа, встречающиеся в рукавах спиральных галактик.

Скопление галактик – это совокупность относительно близко расположенных галактик, связанных взаимным гравитационным притяжением. Они могут содержать всего несколько галактик или тысячи.

Наша собственная Галактика – Млечный Путь – принадлежит к небольшой ассоциации, известной как Местная группа (рис. 23). Самые большие члены Местной группы: наша Галактика, гигантская спиральная галактика М31 (туманность Андромеды), маленькая спиральная галактика М33 в созвездии Треугольника и некоторые карликовые эллиптические и неправильные галактики, в основном являющиеся спутниками Млечного Пути и М31, в их числе Большое и Малое Магеллановы облака (БМО и ММО) и карликовая эллиптическая галактика в созвездии Стрельца – ближайшая к нам самостоятельная звездная система. Члены Местной группы движутся друг относительно друга, но при этом связаны взаимным тяготением и поэтому длительное время занимают ограниченное пространство размером около 6 млн световых лет и существуют отдельно от других подобных групп галактик. Считается, что все члены Местной группы имеют общее происхождение и эволюционируют совместно уже около 13 млрд лет.

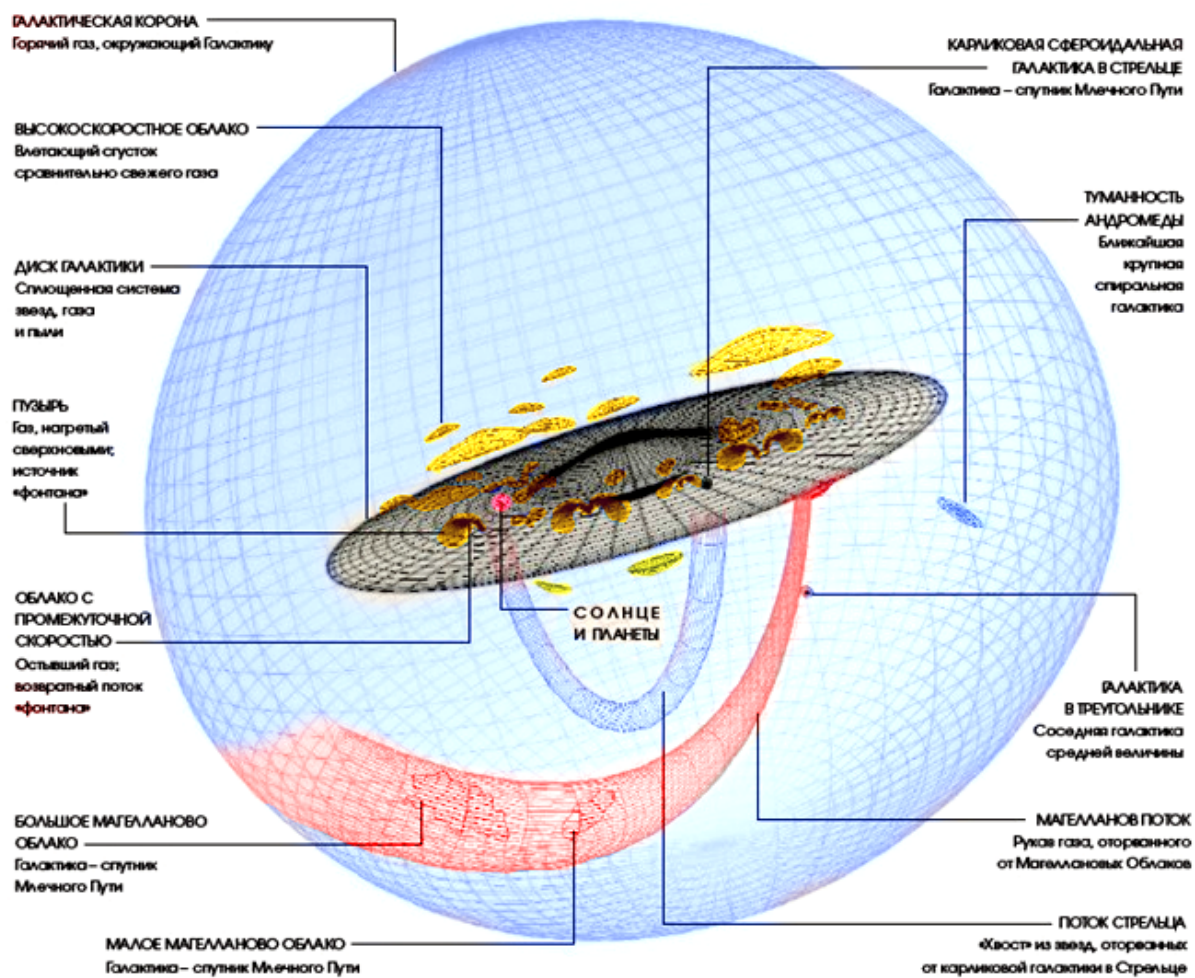


Рис. 23

3.6.1. Эволюция галактик

Образование галактик рассматривают как естественный этап эволюции Вселенной, происходящий под действием гравитационных сил. По-видимому, около 14 млрд лет назад в первичном веществе началось обособление протоскоплений (греч. «*прото*» – первый). В протоскоплениях в ходе разнообразных динамических процессов происходило выделение групп галактик.

Многообразие форм галактик связано с разнообразием начальных условий образования галактик.

Сжатие галактики длится около 3 млрд лет. За это время происходит превращение газового облака в звездную систему. Звезды образуются путем гравитационного сжатия облаков газа. Когда в центре сжатого облака достигаются плотности и температуры, достаточные для эффективного протекания термоядерных реакций, рождается звезда. В недрах массивных звезд происходит термоядерный синтез химических элементов тяжелее гелия. Эти элементы попадают в первичную водородно-гелиевую среду при взрывах звезд или при спокойном истечении вещества со звездами. Элементы тяжелее железа образуются при грандиозных взрывах сверхновых звезд. Таким образом, *звезды первого поколения* обогащают первичный газ химическими элементами, тяжелее гелия. Эти звезды наиболее старые и состоят из водорода, гелия и очень малой примеси тяжелых элементов. В *звездах второго поколения* примесь тяжелых элементов более заметная, так как они образуются из уже обогащенного тяжелыми элементами первичного газа.

3.7. Звезды

Общие характеристики звезд

Основное население галактик – звёзды – самосветящиеся небесные тела, состоящие из раскаленных газов. Ближайшая к нам звезда – Солнце. Расстояние от Земли до Солнца – 8,3 световой минуты. Состав звезд, а также их температуру исследуют посредством спектрального анализа. Спектральный анализ – астрофизический метод изучения химического состава светил путем исследования их спектров.

Изучение спектров звезд показало, что они состоят из атомов тех же химических элементов, что и все тела на Земле. В составе звезд преобладают водород (около 50 % по массе) и гелий (около 40 %). Атомы остальных химических элементов встречаются почти в таком же соотношении, как и на Земле. Вещество звезд представляет собой раскаленный сильно ионизированный газ (плазму).

Внутреннее строение звезд рассчитывается, исходя из следующего: элементарные частицы – электроны, протоны, фотоны и др. – одни и те же

и в звездах, и на Земле. Поэтому при изучении внутреннего строения звезд применяют общие законы физики. Согласно современным представлениям звезды светят вследствие того, что в их недрах происходят термоядерные реакции: водород превращается в гелий, в результате чего и выделяется атомная энергия. Поскольку содержание атомов водорода в звездах велико, за счет таких преобразований большинство звезд может излучать энергию. Вследствие происходящих атомных превращений постепенно меняется их химический состав, что может служить указанием на направление звездной эволюции.

Основными физическими характеристиками звёзд, на которых основывается их классификация, являются: температура, светимость, масса, радиус, спектральный класс (цвет).

Температура звезды определяет её цвет, то есть спектральные характеристики. Известно, что температуру нагретого тела оценивают по зависимости интенсивности излучения от длины волны. Чем выше температура излучающего тела, тем дальше в область коротких волн сдвигается максимум интенсивности излучения. Этот факт сформулирован в законе Вина: длина волны, на которую приходится максимум энергии, излучаемой абсолютно черным телом, обратно пропорциональна его температуре.

Если температура поверхностных слоев звезды (как и любого нагретого тела) 3000–4000 К, то ее цвет красный, при температуре 6000–7000 К – желтый. Очень горячие звезды имеют белый и голубоватый цвета (10000–12000 К). Подавляющее большинство звезд имеют температуру около 3500 К. По направлению к центру звезды температура повышается и в центре достигает миллионов и десятков миллионов градусов. В недрах звезд происходит превращение водорода в гелий, эти реакции поддерживают мощное тепловое и световое излучение звезд в течение огромных промежутков времени. Таким образом, измерение зависимости интенсивности излучения от длины его волны позволяет оценить температуру поверхности звезды.

Наблюдаемые на небе звезды характеризуются различным блеском, интенсивность которого определяется звездной величиной.

Звездная величина – принятая в астрономии единица измерения видимого блеска звезд и других небесных тел. Чем слабее светится звезда, тем больше число, обозначающее ее звездную величину.

Самые яркие назвали звездами первой величины. Самые слабые из видимых невооруженным глазом относят к звездам шестой величины. Звезды первой величины ярче звезд шестой величины в 100 раз. В бинокль видны звезды восьмой-девятой величин, а в телескоп – еще более слабые. Звезд первой величины на всем небе около 20. Звезд второй величины, таких, как главные звезды созвездия Большой Медведицы, – около 70. Всего видимых звезд, то есть звезд шестой величины и ярче, около 6000.

Учитывая, что над горизонтом видна только половина всего неба, одновременно наблюдать можно максимально около 3000 звезд.

Звездная величина не имеет прямого отношения к действительной интенсивности испускаемого звездой излучения. Истинная сила света звезды характеризуется светимостью.

Светимость определяется отношением силы света звезды к силе света Солнца.

Зная расстояние до звезды и ее видимый блеск с Земли, вычисляют, каким был бы блеск звезды, если бы она находилась на расстоянии Солнца. Отношение такого предполагаемого блеска звезды к блеску Солнца характеризует ее светимость. Если светимость звезды равна 5, то это значит, что она в 5 раз ярче Солнца. Если светимость обозначается 0,2, то такая звезда в 5 раз слабее Солнца. Наибольшей известной светимостью, в 400 раз большей светимости Солнца, обладает звезда S из созвездия Золотой Рыбы.

Число звезд большой светимости среди звезд, видимых невооруженным глазом, непропорционально велико, так как такие звезды видны на больших расстояниях. На самом деле звезды большой светимости в окрестностях Солнца встречаются гораздо реже, а звезды с меньшей светимостью – чаще. Из 20 ближайших к нам звезд только 3 видны невооруженным глазом, а из 20 звезд, кажущихся нам яркими, только 3 входят в число ближайших.

Основной метод определения расстояний до звезд состоит в измерении их видимых смещений, вызываемых обращением Земли вокруг Солнца. По смещению, величина которого обратно пропорциональна расстоянию, вычисляют и само расстояние. Годичные смещения звезд составляют обычно доли микронов, реже – несколько микронов. Расстояние до звезд может определяться и другими способами: например, исходя из светимости звезды и ее блеска.

Радиусы звезд меняются в очень широких пределах: есть звезды, по своим размерам не превышающие Землю («белые карлики»); нейтронные звезды имеют радиусы в несколько десятков километров. Существуют огромные «пузыри» – сверхгиганты, внутри которых может поместиться орбита Марса (тысячи радиусов Солнца).

Оценить радиус звезды можно с помощью закона Стефана – Больцмана: энергия Q , излучаемая единицей площади поверхности нагретого тела, пропорциональна четвертой степени температуры T тела

$$Q = \sigma T^4.$$

Полная энергия L , испускаемая звездой (светимость), зависит от величины площади её поверхности, которая, в свою очередь, определяется радиусом звезды R

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4,$$

где σ – постоянная величина.

Из этой формулы можно выразить радиус звезды и подсчитать его величину, зная её светимость и температуру.

Массы звезд изменяются в сравнительно узких пределах. Очень мало звезд, массы которых больше или меньше массы Солнца в 10 раз. Типичные значения масс звезд лежат в диапазоне 0,03–60 масс Солнца. Плотность Солнца $1,4 \text{ г/см}^3$, плотность «пузырей» – в миллионы раз меньше. Плотность «белых карликов» и нейтронных звезд – до 10^{12} г/см^3 .

При возрастании температуры меняется не только длина волны, которой соответствует максимум излучения, но и проявляется влияние внешних оболочек звезды на ее спектр. Классификация звезд по особенностям их спектров излучения называется спектральной. Она содержит семь классов, обозначаемых буквами *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, *M* – от самых горячих звезд к самым холодным. (Мнемонические правила: Один Великий Англичанин Финики Жевал Как Морковь; *O, Be A Fine Girl, Kiss Me.*) Каждый класс разбивается на 10 подклассов (например *B0*, *B1*, *B2* ... *B9*). Солнце – звезда класса *G2* (табл. 4).

Внешние оболочки звезды, как правило, представляют собой сильно ионизированные водород и гелий, плазму с одинаковым числом положительно и отрицательно заряженных частиц. Тяжелые элементы, также в ионизированном состоянии, присутствуют в виде незначительных добавок. Заметим, что возможна ситуация, когда атомы полностью теряют электроны. В этом случае отдельно существуют ядра и электроны, понятие химического элемента исчезает.

Т а б л и ц а 4

Звездные спектры и температура звезды

Класс	Температура, К	Класс	Температура, К
<i>O</i>	50 000	<i>G2</i> (Солнце)	5800
<i>B0</i>	25 000	<i>K0</i>	5100
<i>A0</i>	11 000	<i>M0</i>	3600
<i>F0</i>	7600	<i>R</i> и <i>N</i> (очень холодные)	2000
<i>G0</i>	6000		

Химический состав звезды определяют по ее спектру излучения. Средний химический состав наружных слоев звезды выглядит примерно следующим образом. На 10 000 атомов водорода приходится 1000 атомов углерода, 5 атомов кислорода и менее одного атома других химических элементов. В то же время необходимо отметить, что тяжелые элементы, занимая во Вселенной весьма скромное место, определяют характер эволюции звезд. Кроме того, вопрос возникновения жизни на Земле, существования жизни во Вселенной прямо связан с эволюцией химических элементов, их происхождением.

Класс *A*, например, включает так называемые водородные звезды (со спектрами излучения, характерными для водорода). Типичная звезда этой группы – Сириус.

Класс *F* включает звезды, в спектрах которых особо выделяются спектральные линии кальция и водорода.

К классу *G* относятся звезды, в спектрах которых кроме спектральных линий кальция и водорода видны спектральные линии многих металлов, особенно железа. Солнце принадлежит к этой группе, поэтому звезды такого типа часто называют звездами солнечного типа.

Звезды класса *K* имеют в спектрах интенсивные линии кальция и линии, указывающие на присутствие других металлов.

В класс *M* входят звезды, спектры которых содержат полосы, характерные для окислов металлов, особенно окиси титана. Максимум излучения сдвинут в красную область спектра. Типичный представитель – звезда Бетельгейзе (созвездие Ориона).

Важную роль в поведении звезд играют магнитные поля. В пятнах на Солнце магнитное поле достигает 4000 Э. Это поле, которое можно получить на Земле с помощью относительно сильного электромагнита. Напряженность магнитных полей отдельных звезд достигает 10 000 Э.

В самом начале XX в. датский астроном Э. Герцшпрунг и, несколько позже, американский астрофизик Г. Рессел установили существование зависимости между видом спектра (т.е. температурой) и светимостью звезд. Эта зависимость иллюстрируется графиком, на одной оси которого откладывается спектральный класс, а на другой абсолютная звездная величина. Такой график называется *диаграммой «спектр – светимость»* или *диаграммой Герцшпрунга – Рессела* (рис. 24).

Вместо абсолютной звездной величины можно откладывать светимость (обычно в логарифмической шкале), а вместо спектральных классов – показатели цвета или непосредственно температуру.

Положение каждой звезды в той или иной точке диаграммы определяется ее физической природой и стадией эволюции. Поэтому на диаграмме Герцшпрунга – Рессела как бы запечатлена вся история рассматриваемой системы звезд. В этом огромное значение диаграммы «спектр – светимость», изучение которой является одним из важнейших методов звездной астрономии. Она позволяет выделить различные группы звезд, объединенные общими физическими свойствами, и установить зависимость между некоторыми их физическими характеристиками, а также помогает в решении ряда других проблем (например, в исследовании химического состава и эволюции звезд).

Звезды лежат на этой диаграмме не случайным образом, а образуют явно выраженные последовательности. Большинство звезд находится в пределах сравнительно узкой полосы, идущей от левого верхнего угла диаграммы к правому нижнему. Это так называемая главная последова-

тельность. Вдоль нее расположены звезды, начиная от самых горячих (в верхней части) до наиболее холодных (в нижней).

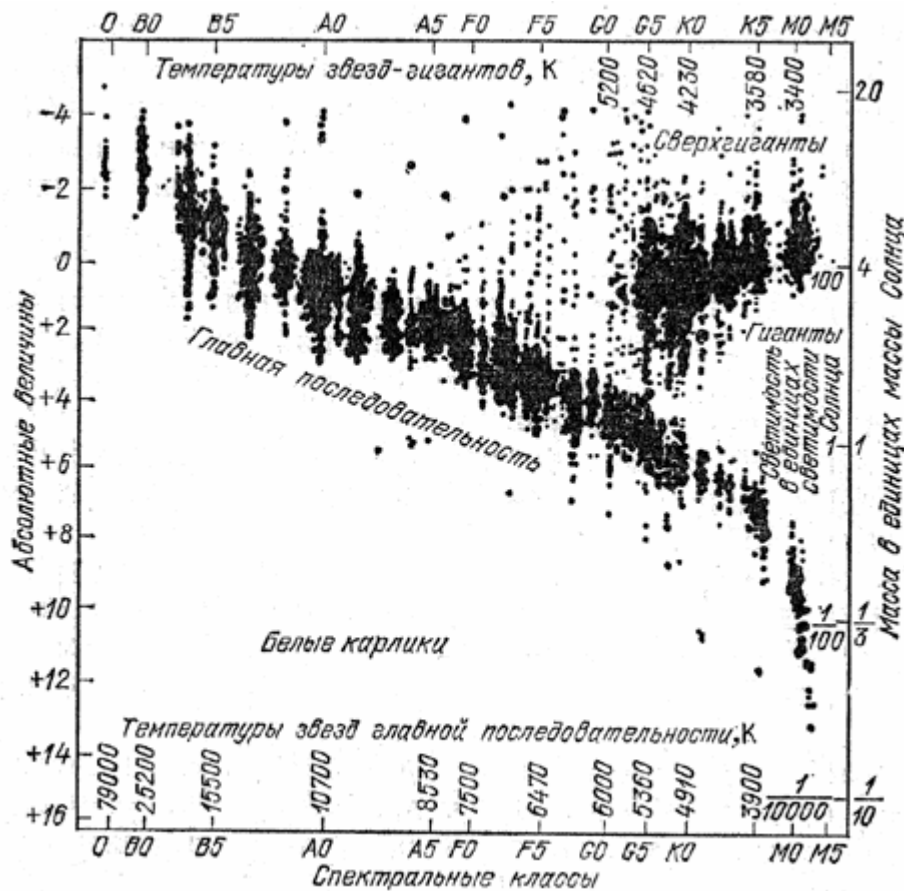


Рис. 24

В верхнем правом углу – довольно беспорядочная группировка звезд. Их спектральные классы – G , K , M . Это яркие звезды с абсолютными звездными величинами от +2 до -6 – «красные гиганты».

В левой нижней части диаграммы – небольшое количество звезд. Их абсолютные величины +10 и больше, а спектральные классы от B до F . То есть это горячие звезды с низкой светимостью. Но низкая светимость при высокой поверхностной температуре может быть только тогда, когда радиус звезды мал. В этой части диаграммы находятся маленькие горячие звезды – «белые карлики».

Существование главной последовательности, на которую попадает, по крайней мере, 95 % всех звезд (в том числе и Солнце), является аргументом в пользу предположения, что большинство звезд подчиняется одним и тем же законам, имеет близкий химический состав и проходит одинаковые этапы в своем развитии.

Эволюция звезд

Как и другие тела в природе, звезды не остаются неизменными, они рождаются, эволюционируют и, наконец, умирают. Рождение звезд обусловлено тем, что на ранних стадиях расширения Вселенной после Большого взрыва в ней возникали неоднородности (слабые разрежения и сжатия вещества). Единственными силами, приводящими к образованию неоднородностей в распределении вещества во Вселенной, являются гравитационные силы.

Вследствие случайного возрастания плотности из рассеянного во Вселенной вещества формируется богатое водородом газопылевое облако. Под влиянием сил гравитационного взаимодействия это облако уплотняется, образуя газовый шар. Известно, что шар имеет наименьшую площадь поверхности при данном объеме. Поэтому образование шара из облака неопределенной формы энергетически выгодно.

За счет гравитационных сил шар сжимается, плотность возрастает. Вещество теряет прозрачность, но остается газом. Внутри шара растет давление, противодействующее гравитационным силам. При адиабатном сжатии (отсутствует обмен энергией с внешней средой) температура шара (это уже протозвезда) увеличивается, часть энергии излучается в пространство.

На диаграмме Герцшпрунга – Рессела эти объекты, имеющие низкую температуру поверхности, располагаются справа от главной последовательности. Они имеют разные размеры и соответственно называются «красными карликами» или «красными гигантами» (красные – потому что спектр их излучения сдвинут в красную сторону, что соответствует относительно низким температурам).

В дальнейшем протозвезда под действием гравитационных сил продолжает сжиматься. Ее размеры уменьшаются, поверхностная температура растет. То есть протозвезда «приходит» на главную последовательность. В этот период температура и плотность недр звезды становятся достаточными для начала термоядерной реакции. Давление и температура внутри звезды возрастают, гравитационные силы и силы внутреннего давления становятся равными, газовый шар перестает сжиматься. Протозвезда становится звездой.

Чтобы пройти эту самую раннюю стадию эволюции, протозвездам необходимо сравнительно немного времени. Все зависит от начальной массы. Если масса протозвезды больше массы Солнца, то для этого нужно всего, лишь несколько миллионов лет, если меньше – несколько сотен миллионов лет.

Оказавшись на главной последовательности и перестав сжиматься, звезда в течение значительного времени излучает, не меняя положения на диаграмме «спектр – светимость» (табл. 5). Ее излучение поддерживают термоядерные реакции в центральных областях, а размер – противодействие гравитационных сил и сил внутреннего давления.

Таким образом, главная последовательность представляет собой такую область на диаграмме «спектр – светимость», где звезда может длительно и устойчиво излучать благодаря термоядерным реакциям.

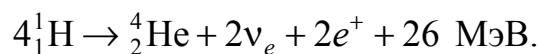
Т а б л и ц а 5

Связь массы и светимости звезды
со временем ее пребывания на главной последовательности

Спектральный класс	Масса (в массах Солнца)	Светимость (в солнечных единицах)	Время пребывания на главной последовательности (млн лет)
<i>B0</i>	17	30 000	8
<i>A0</i>	3,2	100	400
<i>F0</i>	1,5	5	4000
<i>G0</i>	1,02	1,2	11 000
<i>G2</i> (Солнце)	1,00	1,00	13 000
<i>K0</i>	0,74	0,32	28 000

Масса звезды определяет место и время пребывания звезды на главной последовательности. Если масса велика, излучение звезды имеет огромную мощность, и она достаточно быстро расходует запасы водорода. Так, например, звезды главной последовательности с массой, превышающей солнечную в десятки раз (горячие «голубые гиганты» спектрального класса *O*), могут устойчиво излучать, находясь на главной последовательности всего лишь несколько миллионов лет. В то же время звезды с массой, близкой к массе Солнца, находятся на главной последовательности несколько миллиардов лет – в тысячи раз дольше.

Преобразование («выгорание») водорода в гелий в центральных областях звезды (в условиях высоких температур и давлений) происходит в соответствии с уравнением



При такой термоядерной реакции из 4 ядер водорода образуется одно ядро гелия, два нейтрино ν_e , два позитрона e^+ выделяется 26 МэВ энергии. Среднее время реакции при температурах порядка 13 млн К и плотности водорода 100 г/см^3 около 10^{10} лет (в центре Солнца). То есть вероятность слияния данных четырех ядер водорода – величина, обратная этому времени, – ничтожно мала. Однако таких ядер огромное число, и в условиях центра звезды возможна эффективная реакция термоядерного синтеза указанного типа. В земных условиях, в термоядерной бомбе, при разработке устройств управляемого термоядерного синтеза реализуются реакции синтеза других ядер (дейтерия, трития, их комбинаций с литием).

В наружных областях звезды водород не «выгорает» из-за низких значений температуры и давления. Так как количество водорода в центральных областях звезды ограничено, рано или поздно (в зависимости от массы звезды) он практически весь «выгорит». Это приводит к уменьшению массы и радиуса центральной области звезды, и звезда перемещается на диаграмме «спектр – светимость» вправо.

Когда весь водород в центральной области превратится в гелий, внутри звезды образуется гелиевое ядро. Теперь уже водород будет превращаться в гелий не в центре звезды, а в слое, прилегающем к очень горячему гелиевому ядру. Пока внутри гелиевого ядра нет источников энергии, оно будет постоянно сжиматься и при этом еще более разогреваться. Сжатие ядра приводит к более бурному выделению ядерной энергии в тонком слое у границы ядра. У более массивных звезд температура ядра при сжатии становится выше 80 млн К, и в нем начинаются термоядерные реакции превращения гелия в углерод, а потом и в другие более тяжелые химические элементы. Выходящая из ядра и его окрестностей энергия вызывает повышение газового давления, под действием которого внешняя оболочка (фотосфера звезды) расширяется. Энергия, приходящая к фотосфере из недр звезды, распространяется теперь на большую площадь, чем раньше. В связи с этим температура фотосферы понижается. Звезда сходит с главной последовательности, постепенно превращаясь в «красного гиганта» или «сверхгиганта», в зависимости от массы, и становится старой звездой.

Проходя стадию желтого сверхгиганта, звезда может оказаться пульсирующей, то есть физической переменной звездой, и остаться такой в стадии красного гиганта. Раздувшаяся оболочка звезды небольшой массы уже слабо притягивается ядром и, постепенно удаляясь от него, образует планетарную туманность. После окончательного рассеяния оболочки остается лишь горячее ядро звезды – «белый карлик». «Белые карлики» как бы «вызревают» в недрах «красных гигантов». «Белые карлики», в которых весь водород выгорел и ядерные реакции прекратились, представляют собой последний этап эволюции звезды. Постепенно остывая, они излучают все меньше и меньше энергии, светимость падает, гравитационные силы сжимают вещество. «Белые карлики» постепенно переходят в разряд «черных карликов» – холодных звезд огромной плотности и небольшого размера (порядка земного при массе порядка солнечной). Этот процесс длится сотни миллионов лет.

Так прекращает свое существование большинство звезд. Однако финал жизни звезд, массы которых превышают солнечную, может быть иным.

Если масса звезды примерно вдвое превышает массу Солнца, то такие звезды на последних этапах своей эволюции теряют устойчивость. В частности, они могут взорваться как сверхновые, а затем катастрофически сжаться до размеров шаров радиусом в несколько километров, то есть превратиться в нейтронные звезды.

Звезда, масса которой более чем вдвое превышает массу Солнца, потеряв равновесие и начав сжиматься, либо превратится в нейтронную звезду, либо вообще не сможет достигнуть устойчивого состояния. В процессе неограниченного сжатия с огромной скоростью плотность вещества её начнет резко расти. Через весьма короткое время (секунды!) звезда может превратиться в сверхплотную точку, будет раздавлена своей собственной массой (гравитационный коллапс). Подобные объекты описываются законами общей теории относительности. Вблизи них замедляется течение времени, из такого объекта не может выйти никаких излучений и частиц. То есть этот объект для внешнего мира будет замечен только по очень сильному гравитационному полю. Его называют *гравитационной могилой*, или *черной дырой*.

Типы звезд

Мир звезд чрезвычайно разнообразен. Находясь на различных стадиях своего эволюционного развития, звезды подразделяются на нормальные звезды (звезды главной последовательности), звезды карлики и звезды гиганты. Кроме перечисленных, существует еще несколько продуктов эволюции звезд:

Двойные звезды – системы, состоящие из двух звезд, каждая из которых обращается вокруг их общего центра тяжести. Обычно более яркую звезду в паре называют главной, а другую – ее спутником.

Ярчайшая звезда неба Сириус – двойная. Спутник этой звезды – белый карлик – обращается вокруг главной звезды за 50 лет и отстоит от нее в 20 раз дальше, чем Земля от Солнца.

Среди двойных звезд различают так называемые спектрально-двойные звезды – тесные пары звезд, которые нельзя увидеть раздельно при помощи современных оптических средств. Двойственность их обнаруживается по периодическим смещениям линий в спектрах.

Системы, состоящие из трех, четырех или более звезд, называются *кратными звездами*. Кратные звезды встречаются значительно реже, чем двойные.

Переменные звезды – звезды, блеск которых со временем меняется. Параллельно с изменением блеска меняются их цвет и температура, а иногда и размеры.

Причиной переменности может являться периодическое затмение одной звезды другой. Но гораздо чаще происходят действительные изменения размеров и температур звезд: они сжимаются и расширяются – пульсируют. Промежутки между моментами наибольшего сжатия или расширения у одних переменных звезд составляют годы, у других – только часы.

В зависимости от характера изменения блеска и причин, его вызывающих, переменные звезды подразделяются на различные типы.

Затменные переменные звезды – очень тесные двойные звезды, плоскость орбиты которых проходит через луч зрения. При обращении вокруг общего центра тяжести обе звезды попеременно закрывают друг друга, так что общий блеск системы во время затмений ослабевает.

Другой разновидностью переменных звезд являются *цефеиды*. Их так называют по типичной представительнице этого класса звезд звезде δ в созвездии Цефея. Все цефеиды являются звездами-гигантами и сверхгигантами. Изменение блеска у них происходит строго периодически. Открытие зависимости между периодом изменения блеска у цефеид и их светимостью дало возможность определять расстояние до очень далеких звездных систем, если в них имеются цефеиды.

Цефеиды – *пульсирующие звезды*. Пульсирует, расширяясь и сжимаясь, все тело звезды. При сжатии ее происходит нагревание, а при расширении – охлаждение. Изменение размера и температуры поверхности звезды и вызывает колебания ее излучения.

Новые звезды – звезды, излучение которых внезапно увеличивается в тысячи раз, а затем медленно уменьшается. Это некоторые красные карлики.

Изменения, происходящие в звезде за время вспышки, столь велики, что за несколько суток небольшая звезда-карлик превращается в гиганта. Блеск ее увеличивается более чем в 10 тыс. раз. От нее отделяется газовая оболочка, которая, продолжая расширяться, рассеивается в пространстве. В наибольшем своем блеске раздувшаяся оболочка больше нашего Солнца по диаметру в сотни раз. Новая звезда в большом блеске остается недолго, обычно около суток, затем ее блеск начинает ослабевать и звезда вновь сжимается до прежних размеров.

Исследованиями установлено, что в нашей Галактике ежегодно происходит около 100 вспышек новых звезд, но мы замечаем лишь ближайšie из них. Вспышка не означает возникновения или уничтожения звезды. Через некоторый промежуток времени эта же звезда может вспыхнуть вновь. Вспышки являются следствием нарушения устойчивости звезды, вызванного внутренними причинами. Сущность этих причин пока не выяснена. Иногда в нашей и других галактиках наблюдаются вспышки *сверхновых звезд*. При таких вспышках звезды излучают свет в миллионы и в сотни миллионов раз интенсивнее, чем Солнце. Сверхновые звезды – явление крайне редкое. Последней сверхновой звездой, наблюдавшейся в нашей Галактике, была звезда, которую наблюдал Кеплер в 1604 г. Таким образом, даже в таких гигантских звездных системах, как наша, вспышка сверхновой звезды бывает один раз в несколько столетий.

Как уже отмечалось ранее в ряде случаев в результате вспышки сверхновой звезды остаток звездной массы катастрофически сжимается и звезда превращается в быстро вращающуюся нейтронную звезду. *Нейтронные звезды* – предполагаемые звезды, состоящие из нейтронов. Они чрезвычай-

но плотные и очень малы – имеют в поперечнике около 10 км. Различают невидимые космические объекты, которые посылают огромное невидимое пульсирующее радиоизлучение, – *пульсары*. *Пульсары* – точечные источники радиоизлучения, испускающие импульсы с очень коротким периодом. Возможно, пульсары представляют собой нейтронные звезды.

В 1963 году были обнаружены объекты еще одного типа, *квazarы* (англ. *quasar, quasi-stellar radiosource* – квазизвездный источник радиоизлучения). Эти объекты имеют звездообразный вид, являются источниками мощного радиоизлучения и удаляются от нашей Галактики со скоростями до 200 000 км/с. Они находятся на периферии Вселенной, дальше самых удаленных галактик. Мы можем их увидеть, это говорит о том, что их светимости превосходят светимости не просто звезд, а целых галактик. В то же время размеры квазаров в миллионы раз меньше размеров галактик. И если происхождение пульсаров было достаточно быстро понято, то природа квазаров до сегодняшнего дня неясна.

Предполагают, что многие звезды окружены планетами. Вследствие дальности расстояния пока еще не удается непосредственно увидеть планеты около других звезд даже в самые мощные телескопы. Для их обнаружения необходимы тонкие методы исследования, тщательные наблюдения в течение десятков лет и сложные расчеты.

Около некоторых ближайших звезд уже обнаружены невидимые спутники малой массы. Их вычислили по еле заметным движениям звезд под действием притяжения их невидимым спутником. Пока еще с достоверностью не установлено, являются ли эти спутники планетами или же крайне слабо светящимися маленькими звездами. Однако есть все основания предполагать, что наша планетная система не является исключительным явлением в мировом пространстве. На планетах, окружающих другие звезды, также вероятно существование жизни, и Земля не является в этом отношении исключением.

3.8. Солнечная система

3.8.1. Общая характеристика Солнечной системы

Солнечная система представляет собой группу небесных тел, весьма различных по размерам и физическому строению. В неё входят: Солнце, девять больших планет, десятки спутников планет, тысячи малых планет (астероидов), сотни комет, бесчисленное множество метеоритных тел, движущихся как роями, так и в виде отдельных частиц, межпланетная среда. Все эти тела объединены в одну систему благодаря силе притяжения центрального тела – Солнца. Считается, что диаметр Солнечной системы равен приблизительно $6 \cdot 10^{16}$ м. На этом расстоянии планеты удерживаются силой тяготения Солнца.

Солнечная система является упорядоченной системой, имеющей свои закономерности строения. Единый характер Солнечной системы проявляется в том, что все планеты вращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении и почти в одной и той же плоскости. Большинство спутников планет вращается в том же направлении и в большинстве случаев в экваториальной плоскости своей планеты. Солнце, планеты, спутники планет вращаются вокруг своих осей в том же направлении, в котором они совершают движение по своим траекториям. Закономерно и строение Солнечной системы: каждая следующая планета удалена от Солнца примерно в два раза дальше, чем предыдущая. Большие планеты располагаются в порядке удаления от Солнца следующим образом: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. Три последние планеты можно наблюдать с Земли только с помощью телескопа. Остальные видны как яркие светящиеся диски небольших диаметров и известны людям с древних времён.

3.8.2. Концепции происхождения Солнечной системы

Небулярная гипотеза Канта – Лапласа (от лат. *nebula* – туман). Французский философ И. Кант, подобно древнегреческим философам считал, что мир родился из хаоса огромного облака пылевых частиц, беспорядочно двигающихся в разных направлениях. Сталкиваясь друг с другом, притягиваясь, они изменяли направления своих движений, объединялись в более крупные сгустки. Под действием сил притяжения большинство из них устремлялись к центру, где начало расти ядро туманности – будущее Солнце. Из других сгустков, получивших орбитальное движение, сформировались планеты (1755 г.).

Французский ученый-физик П. Лаплас, разделяя взгляды Канта, исходил из предположения о горячей медленно вращающейся туманности, которая по мере охлаждения сжималась. По закону сохранения момента импульса, при этом росла скорость вращения, и центробежные силы отрывали от нее кольца. Материя в этих кольцах сжималась под действием тяготения, формируя компактные тела (1796 г.)

Поскольку формирование колец и планет происходило в условиях вращения туманности и действия центробежных сил, эта гипотеза называется еще и *ротационной* (от лат. *rotatio* – вращение).

Приливная, или планетезимальная гипотеза. В начале XX в. американские астрофизики Т. Чемберлен и Ф. Мультион выдвинули теорию, согласно которой произошла встреча Солнца со звездой, вызвавшей приливной выброс солнечного вещества, распавшегося затем на отдельные «капли» – планетозимали. Остывающие планетозимали и дали начало планетам и их спутникам (1906 г.)

Эту идею развил их коллега американский астрофизик С. Аррениус. Он предположил прямое столкновение Солнца со звездой, в результате которого появилось некое волокно, распавшееся при вращении на части – основа планет (1913 г.).

Еще один американский астрофизик – Дж. Джинс – предположил, что какая-то звезда прошла неподалеку от Солнца и вызвала «приливные выступы», принявшие форму газовых струй, из которых и возникли планеты (1916 г.).

Гипотеза захвата Солнцем межзвездного газа. Ее предположил в 1942 г. шведский астрофизик Х. Альфен. Он считал, что атомы газа ионизировались при падении на Солнце и стали двигаться по орбитам в его магнитном поле, поступая в определенные участки экваториальной плоскости. Из их скоплений образуются небесные тела.

В 1944 г. академик-астрофизик В.Г. Фесенков предположил, что образование планет связано с переходом от одного типа ядерных реакций в глубинах Солнца к другому.

Астроном и математик Дж. Дарвин и математик А. М. Ляпунов (40-е г. XX в.) независимо друг от друга рассчитали фигуры равновесия вращающейся жидкой несжимаемой массы.

Согласно взглядам английского астрофизика О. Струве (40-е гг. XX в.) быстро вращающиеся звезды могут выбрасывать вещество в плоскости своих экваторов. В результате этого образуются газовые кольца и оболочки, а звезда теряет массу и момент количества движения.

Кометная гипотеза происхождения планет Солнечной системы. Эту гипотезу предложил А.А. Маркушевич (1992 г.). Сводится она к следующему. В газопылевой туманности, имеющей вид дискообразного вращающегося облака и состоящей из мелких пылевидных железосиликатных частиц и газов – воды и водорода, при понижении температуры газы намерзали на пылинки, увеличивая их размер. Возникал состав, свойственный составу комет. Частицы сталкивались между собой, большие по объему концентрировались в центре туманности, а меньшие отеснялись на периферию, дав начало планетам. Шло укрепление и разрастание образующихся тел – астероидов, комет, планет. При образовании планет происходила аккреция (стяжение кометной массы), выделялась теплота, которая разогревала центр сгустка до расплавленного состояния и расслаивала водородную оболочку и железосиликатное ядро, которое позже расслоилось на железоникелевое ядро и силикатную оболочку, не позволявшую рассеиваться теплоте в космическом пространстве. Так планеты приобрели почти сферическую форму.

3.8.3. Солнце

Солнце, центральное тело Солнечной системы – типичный жёлтый карлик. Его радиус около 700 тыс. км. Солнце – ближайшая к Земле звезда. Расстояние от Земли до Солнца – 8,3 световой минуты, или 149,6 млн км.

Солнце представляет собой плазменный шар со средней плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, окруженный так называемой короной, которую можно наблюдать. Но вещество распределено по объему Солнца неравномерно: внутри Солнца плотность его чрезвычайно высокая, а снаружи – крайне низкая, в сотни раз меньшая, чем воздух.

Масса Солнца огромна ($\sim 2 \cdot 10^{30}$ кг), нем сосредоточено 99,866 % массы Солнечной системы. Температура поверхности Солнца 5770 К. Солнце вращается вокруг своей оси в том же направлении, что и Земля, и имеет магнитное поле.

Возраст Солнца – 4–5 млрд лет. Ближайшие к Солнцу звезды – α -Центавра и Сириус. Солнечная система обращается вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с. Солнце совершает один оборот вокруг центра Галактики за 250 млн лет. Этот период называют галактическим годом.

Мощность излучения Солнца около $3,86 \cdot 10^{23}$ кВт. Источником энергии, пополняющим потери на излучение и поддерживающим высокую температуру Солнца, являются ядерные реакции превращения водорода в гелий, происходящие в недрах Солнца.

Солнце – не только источник света и тепла: его поверхность излучает потоки невидимых ультрафиолетовых и рентгеновых лучей, а также элементарных частиц, поэтому оказывает заметное влияние не только на такие природные процессы, как погода, земной магнетизм, но и на биосферу, включающую животных и растительный мир Земли, в том числе и человека.

История телескопических исследований Солнца начинается с наблюдений, выполненных Г. Галилеем в 1611 году; были открыты солнечные пятна, определён период вращения Солнца вокруг своей оси. В 1843 году немецкий астроном Г. Швабе обнаружил цикличность солнечной активности. Развитие методов спектрального анализа позволило изучить физические условия на Солнце. В 1814 году Й. Фраунгофер обнаружил тёмные линии поглощения в спектре Солнца – это положило начало изучению химического состава Солнца.

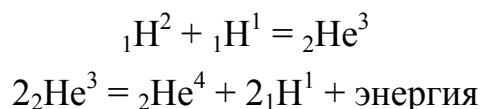
С 1836 года регулярно ведутся наблюдения затмений Солнца, что привело к обнаружению короны и хромосферы Солнца, а также солнечных протуберанцев. В 1913 году было доказано существование магнитного поля Солнца. В начале 40-х годов XX века было открыто радиоизлучение Солнца. Существенным толчком для развития физики Солнца во второй половине XX века послужило развитие магнитной гидродинамики и физики плазмы. После начала космической эры изучение ультрафиолетового

и рентгеновского излучения Солнца ведётся методами внеатмосферной астрономии с помощью ракет, автоматических орбитальных обсерваторий на спутниках Земли, космических лабораторий с людьми на борту.

Исследования показали содержание водорода в Солнце по массе около 70 %, гелия около 27 %, содержание всех остальных элементов около 2,5 %. Более 70 химических элементов, найденных на Солнце, присутствуют в составе планет Солнечной системы, что доказывает единое происхождения Солнца и планет Солнечной системы.

На основании проведенных исследований сделаны выводы о строении Солнца. Полагают, что Солнце состоит из нескольких слоев – внутренних и внешних. К внутренним слоям относятся *ядро, область лучистого переноса энергии и конвективная зона*. Внешние слои образует *атмосфера*.

Ядро находится в центре Солнца. Его радиус составляет 1/3 солнечного радиуса. В ядре сосредоточена большая часть вещества Солнца. Температура вещества в центре Солнца превышает 10 млн К. В условиях сверхдавления и сверхвысокой температуры вещество ядра ионизировано, то есть представляет собой плазму. Частицы плазмы находятся в постоянном движении, скорость которого огромна. Поэтому между частицами непрерывно происходят ядерные реакции, в результате которых из атомов водорода образуются атомы гелия и выделяется большое количество энергии. Например:



Водородные ядерные реакции – источник солнечной энергии. За время своего существования Солнце не израсходовало еще и половины запасов водородного ядерного топлива. В течение почти всего этого времени излучение Солнца почти такое же, как и теперь. Так оно и будет светить миллиарды лет, пока в недрах Солнца весь водород не превратится в гелий.

Область лучистого переноса энергии следует за ядром. Полагают, что её толщина примерно равна радиусу ядра. Здесь в результате поглощения квантов, их дробления и переизлучения энергия переносится наружу.

Выше находится *конвективная зона* толщиной примерно 200 тыс. км. Температура в конвективной зоне уже значительно ниже. Конвективная зона не может полностью передать огромное количество энергии, поэтому систематически ядерное вещество прорывается в наружные слои таким образом, что конвекция на Солнце напоминает кипение воды. Эта зона переходит во внешние слои Солнца – атмосферу. Солнечная *атмосфера* также состоит из нескольких слоев: *фотосферы, хромосферы и короны*.

Фотосфера – самый глубокий и тонкий слой атмосферы. Здесь возникает подавляющее количество световых и тепловых лучей, посылаемых в пространство. Толщина фотосферы 200–300 км, ее температура около 6000 К. За фотосферой следует *хромосфера* – слой раскаленных

газов толщиной 10–20 тыс. км. Поскольку в верхних слоях солнечной атмосферы световая энергия в значительной степени переходит в тепловую, температура хромосферы значительно выше температуры фотосферы и оценивается в десятки тысяч кельвинов.

Корона – внешняя часть атмосферы Солнца. Температура в этой части Солнца – более 1 млн К. В короне плазма очень сильно разрежена, плотность ее в миллиарды раз меньше плотности воздуха. Поэтому корона еще прозрачнее, чем хромосфера, и количество излучаемого ею света очень мало. Яркость короны в миллионы раз меньше яркости фотосферы. Температура по мере удаления от поверхности Солнца уменьшается.

Солнечная корона имеет огромные размеры – более 200 радиусов Солнца – и достигает орбиты Марса. Таким образом, Земля оказывается, образно говоря, погруженной в солнечную корону. В этой связи на Землю постоянно воздействует так называемый *солнечный ветер* – поток заряженных частиц, испускаемых Солнцем. При соприкосновении с атмосферой Земли он отклоняется верхними ее слоями – ионосферой. Хотя внешние слои солнечной атмосферы имеют температуру более 1 млн К, их излучение составляет ничтожную долю от общей энергии, испускаемой Солнцем. Почти вся энергия исходит от фотосферы, имеющей температуру около 6000 К.

Солнечная активность. Периодически, с циклом в среднем около 11 лет, в солнечной атмосфере появляются активные области, число которых регулярно меняется. О возникновении активной области свидетельствуют *солнечные пятна*, наблюдаемые в фотосфере. Температура пятен примерно на 1000 К ниже температуры окружающей фотосферы. В активной области часто наблюдаются *вспышки*, яркость которых высока. В результате вспышек образуются направленные потоки очень быстрых заряженных частиц и космических лучей. Достигая Земли, этот поток вызывает заметные неправильные изменения магнитного поля Земли – так называемые магнитные бури. Причина периодичности солнечной активности пока неясна. Предполагают, что строение Солнца и процессы, происходящие в нем, могут быть типичными и для многих других звезд.

3.8.4. Планеты Солнечной системы

Крупнейшими после Солнца объектами Солнечной системы являются планеты и их спутники. Общая масса планет составляет 448 масс Земли, а спутников – 0,12 массы Земли. Суммарная масса планет и спутников составляет лишь 1/750 часть массы Солнца. По своим физическим характеристикам планеты Солнечной системы достаточно сильно отличаются друг от друга, поэтому их делят на две группы: планеты земной группы и газовые (или планеты-гиганты).

Планеты земной группы. Планеты земной группы сравнительно невелики, медленно вращаются вокруг своих осей (сутки на Меркурии длятся около 60 земных суток, на Венере – 243 дня). Ось вращения Венеры наклонена в другую сторону, и вращается Венера в направлении, обратном ее движению вокруг Солнца. У этих планет *мало спутников* (у Меркурия и Венеры нет, у Земли – один, у Марса – два совсем небольших).

У Меркурия атмосферы практически нет, Венера имеет очень плотную, состоящую в основном из углекислого газа атмосферу, пропускающую солнечное излучение и не выпускающую его обратно. Поэтому на Венере действует парниковый эффект, который сейчас отмечается и на Земле. В результате этого эффекта температура поверхности Венеры составляет около 500° С. У Земли плотная азотно-кислородная атмосфера. Атмосфера Марса состоит в основном из CO₂, однако она сильно разрежена (давление в 150 раз меньше, чем давление на поверхности Земли).

Поверхность планет земной группы твердая, гористая, она хорошо изучена благодаря автоматическим станциям, пролетавшим вблизи планет или даже садившимся на поверхности Марса и Венеры. Следует отметить, что в Солнечной Системе лишь планеты Земной группы имеют твердую поверхность. Химический состав планет Земной группы приблизительно одинаков. Они, в основном, состоят из соединений кремния и железа. В небольшом количестве присутствуют и другие элементы.

Более или менее одинаково и строение планет земной группы. В центре планет есть железные ядра разной массы. У Меркурия, Земли, Марса часть его находится в жидком состоянии. Выше ядра находится слой, который называют мантией. Верхний слой мантии называется корой. У этих планет есть магнитные поля: почти незаметное у Венеры и ощутимое у Земли. Меркурий и Марс обладают магнитными полями средней напряженности.

Планеты Земной группы отделены от планет-гигантов поясом астероидов – малых планет. Самая крупная из них – Церера была открыта первой, в начале XIX века. Сейчас зарегистрировано более 5500 малых планет. Все они движутся вокруг Солнца в том же направлении, что и большие планеты, однако их орбиты вытянуты значительно сильнее.

Планеты-гиганты. Они располагаются за орбитой Марса. Это Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Их особенность – большие размеры и масса. Например, радиус Юпитера в 11 раз больше земного, а масса в 318 раз больше земной. Самый легкий гигант – Уран – в 14,5 раза массивнее Земли.

Планеты-гиганты имеют малую плотность. В среднем их плотность в 3–7 раз уступает плотности планет земной группы. Самая низкая плотность у Сатурна – $0,7 \cdot 10^3$ кг/м³.

У планет-гигантов нет твердой поверхности. Газы их обширных атмосфер, уплотняясь с приближением к центру, постепенно переходят в жидкое состояние. Причем плотность жидкости тоже увеличивается к центру планеты. По-видимому, в недрах планет-гигантов, где давление и

температура очень высокие, есть слой водорода, обладающего металлическими свойствами. Это необычное вещество не является в полной мере ни газообразным, ни твердым. Но оно обладает важным свойством – проводит ток. Благодаря этому планеты-гиганты обладают магнитным полем. Магнитные поля планет-гигантов превосходят магнитные поля планет земной группы. Интенсивность магнитного поля качественно определяется размерами магнитосферы планеты: пространства вокруг нее, в котором магнитное поле планеты сильнее солнечного. Влияние солнечного ветра – потока заряженных частиц, вырывающихся с поверхности Солнца, – делает очертания магнитосфер несимметричными. Магнитные поля захватывают летящие от Солнца зараженные частицы высоких энергий, формируя мощные радиационные пояса и полярные сияния.

Сами гиганты и их атмосферы состоят из легких элементов: водорода и гелия. Уран и Нептун в значительной степени содержат в себе метан, аммиак, воду и другие не слишком тяжелые соединения. Другие элементы тоже есть, но их гораздо меньше. Ученые выяснили, что с увеличением массы гиганта растет и его атмосфера. Следовательно, самой обширной атмосферой обладает Юпитер. Уран и Нептун, близкие по массе, мало отличаются и своими атмосферами. Сатурн занимает промежуточное положение.

Планеты-гиганты быстро совершают один оборот вокруг своей оси (10–18 часов). Причем они вращаются как бы слоями: слой планеты, расположенный вблизи экватора, вращается быстрее всего, а самое медленное вращение присуще околополярным областям. Такое необычное вращение обусловлено тем, что, как уже было сказано выше, планеты-гиганты – это жидкие планеты. По той же причине гиганты сжаты у полюсов, что можно заметить в простой телескоп.

Они окружены естественными спутниками. Точное их число еще не известно. Из известных 68 спутников только три принадлежат планетам земной группы. У Сатурна открыто 18 спутников, у Урана – 21, у Юпитера – 17, у Нептуна – 8. Кроме спутников, планеты-гиганты имеют *кольца* – скопления мелких частиц, вращающихся вокруг планет и собравшихся вблизи плоскости их экваторов. Наиболее крупными обладает Сатурн – они были обнаружены еще в XVII веке.

3.8.5. Кометы, астероиды, метеорное вещество

Помимо 9 крупных спутников (планет) Солнце имеет множество мелких спутников, называемых *астероидами*. Большинство из них находится в поясе астероидов, между орбитами Марса и Юпитера. Есть также группа астероидов (Троянцы и Греки), движущаяся вдоль орбиты Юпитера, и другие группы. Всего в астрономических каталогах зафиксировано более 6000 малых планет.

Астероиды, называемые также малыми планетами, не имеют правильной формы и по химическому составу близки к планетам земной группы. Орбиты астероидов имеют различные углы с плоскостью эклиптики и заметно вытянуты. Все известные астероиды вращаются вокруг Солнца в прямом направлении. За орбитой Нептуна, как позволяют судить последние наблюдения, тоже находится пояс астероидов. Орбита планеты Плутон, видимо, уже проходит внутри этого пояса.

Кроме астероидов, движущихся по орбитам, подобным орбитам планет, Солнечную систему пересекают *кометы*. Орбиты комет одним краем приближены к Солнцу, другим удалены от него, иногда на очень значительные расстояния. Например, орбита кометы Когоутека с периодом обращения 75 000 лет выходит далеко за пределы орбиты Плутона.

По современным гипотезам, кометы представляют собой огромные глыбы, состоящие из смеси замерзших газов и пыли (грязные снежки). Приближаясь к Солнцу, кометы прогреваются, и с их поверхности начинают испаряться газы, которые светятся под действием солнечного излучения. Солнечный ветер отбрасывает испарившиеся частицы, образуя так называемые кометные хвосты, направленные от Солнца. Как и астероиды, кометы обладают малыми размерами и массами. Их орбиты могут быть самыми различными: иметь всевозможные эксцентриситеты, наклоны к плоскости эклиптики. Кометы могут двигаться вокруг Солнца как в прямом, так и в обратном направлении.

Ежегодно в августе Земля проходит через полосу пыли, оставшуюся от кометы Свифта-Тутля, и в эти периоды можно наблюдать метеоритные дожди, называемые Персеидами. Землю ежесекундно бомбардируют тысячи *метеоритов* – обломков космических тел. Однако большинство из них сгорает в атмосфере, не достигая поверхности Земли. Крупные метеориты могут взрываться, оставляя кратеры на земной поверхности.

3.9. Планета Земля

3.9.1. Размеры и форма Земли

Особое место в Солнечной системе занимает Земля – единственная планета, на которой в течение миллиардов лет развиваются различные формы жизни.

В IV в. до н.э. древнегреческий ученый Аристотель заметил, что тень от Земли на Луне, наблюдаемая во время лунных затмений, всегда имеет одинаковую круглую форму. Он предположил, что Земля, как Луна и Солнце, является шарообразным телом. Но Земля – не идеальный шар, она сплюснута у полюсов и расширена к экватору. Такое геометрическое тело называется *сфероидом*, или *эллипсоидом вращения*. Полярный радиус Земли составляет 6357 км, а экваториальный – 6378 км, то есть больше

полярного на 21 км (рис. 25). Масса Земли $5,976 \cdot 10^{24}$ кг. Земли движется в космическом пространстве по эллиптической траектории вокруг Солнца со средней скоростью около 30 км/ч.

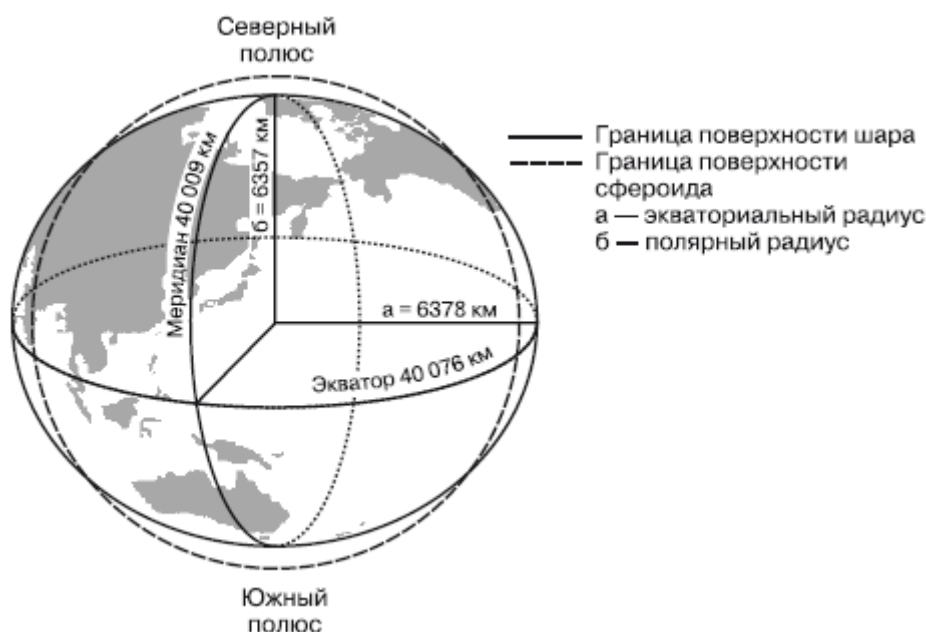


Рис. 25

Земля вращается вокруг своей оси, наклоненной к плоскости орбиты под углом $66^{\circ}34'$, и делает полный оборот за 24 часа.

Земная ось – это воображаемая прямая, проходящая через центр Земли. Две точки, через которые проходит ось Земли, называются полюсами. Их два – Северный и Южный.

По оценкам учёных, средний возраст Земли – 5–6 млрд лет.

Ближайшее к Земле небесное тело – ее спутник Луна. Луна имеет небольшое ядро из железа и серы, окруженное полурасплавленной астеносферой. Над астеносферой расположена литосфера (твёрдая каменная оболочка), а над ней – кора из минералов, богатых кальцием и алюминием. Поверхность Луны изрыта кратерами, имеет огромные равнины (моря) и горы.

3.9.2. Внутреннее строение Земли

Земля состоит из земной коры, мантии и ядра. Верхняя твёрдая оболочка Земли, включающая земную кору и верхнюю часть мантии, называется *литосферой* (от греч. *lithos* – камень и *sphaire* – шар). Её толщина составляет от 70 до 250 км (рис. 26).

Земная кора – верхняя часть литосферы – тоже не везде имеет одинаковую толщину. Различают два основных типа земной коры: материковый и океанический. Под океанами нижняя граница земной коры уходит

на глубину 5–10 км, под равнинами – на 35–45 км, а под горными массивами – до 70 км.

Слои земной коры состоят из горных пород и минералов.

Минерал – природное тело, приблизительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, образующееся в результате физико-химических процессов в глубинах и на поверхности литосферы. Это составная часть горных пород (Земли и некоторых других планет), руд и метеоритов.

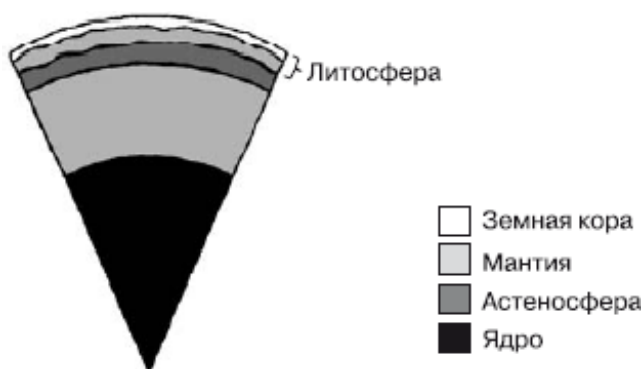


Рис. 26

Горная порода – природная совокупность минералов более или менее постоянного минералогического состава, образующая самостоятельное тело в земной коре.

По происхождению горные породы делятся на три группы: магматические, метаморфические и осадочные. Магматические и метаморфические горные породы составляют 90 % объема земной коры, остальные 10 % приходятся на долю осадочных, которые занимают 75 % земной поверхности.

Магматические горные породы образуются в результате застывания магмы, поднимающейся из сильно разогретых глубин Земли. В случае, когда магма медленно остывает на большой глубине, образуются *интрузивные* (или *глубинные*) горные породы, имеющие кристаллическую структуру (гранит, селенит, дунит). При быстром остывании магмы, излившейся на поверхность, образуются *эффузивные* (или *излившиеся*) горные породы (базальт, андезит).

Осадочные горные породы, в отличие от магматических, образуются только на поверхности Земли и формируются под воздействием внешних сил. По происхождению выделяют *неорганические* (обломочные и хемогенные) и *органические* осадочные породы.

Обломочные горные породы образовались в результате выветривания, переотложения водой, льдом или ветром продуктов разрушения ранее возникших горных пород. К ним относятся песок, глина, валунный суглинок. *Хемогенные* горные породы формируются в результате осаждения из воды морей и озер растворенных в ней веществ. Пример такой породы – каменная соль.

Органические породы образуются в результате накопления останков животных и растений, как правило, на дне океанов, морей и озер. Такой породой является известняк (в частности, его разновидность – ракушечник), мел, а также горючие полезные ископаемые.

Как осадочные, так и магматические горные породы при погружении на большие глубины под влиянием повышенного давления и высоких температур подвергаются значительным изменениям – метаморфизму, превращаясь в *метаморфические* горные породы. Так, например, известняк преобразуется в мрамор, песчаник – в кварцит, гранит – в гнейс.

Мантия – самая массивная часть Земли, составляющая около 83 % её объёма. Она располагается под земной корой, ближе к центру Земли и имеет толщину почти 3000 км. Внутри мантии, на глубине 100–250 км под континентами и 50-100 км под океанами, находится слой повышенной пластичности вещества, так называемая **астеносфера**. Ученые предполагают, что мантия состоит из магния, железа и кремния и имеет очень высокую температуру – до 2000 °С.

В астеносфере в горизонтальном направлении перемещаются крупные плиты, из которых состоит литосфера. На границах плит находятся сейсмические, тектонически активные зоны разломов.

Мантия – твёрдое образование, поскольку её вещество находится под огромным давлением. Как только давление уменьшается, твёрдые породы расплавляются, и образуется жидкая раскалённая масса – *магма*. В местах разломов она прорывается наружу. Так возникает вулканическое извержение.

Установлено, что температура горных пород с глубиной возрастает: в среднем на 1°С на каждые 33 м в глубь Земли. Увеличение температуры происходит главным образом за счет распада радиоактивных элементов, входящих в состав земного ядра

Ядро – самая глубинная часть Земли. Его радиус – около 3,5 тыс. км. Оно состоит из внешней оболочки в жидком состоянии и внутреннего твёрдого субъядра. Температура в центре ядра – примерно 5000°С, плотность вещества ядра – $12,5 \cdot 10^3$ кг/м³. Химический состав субъядра: железо – 80 %, никель – 20 %; внешней оболочки: железо – 52 %, смесь железа с серой – 48 %. Согласно одной из гипотез в результате циркуляции потоков расплавленных металлов во внешней оболочке ядра возникает магнитное поле Земли.

3.9.3. Минеральные ресурсы литосферы

Люди еще в древности научились применять для своих нужд полезные ископаемые, что нашло свое выражение в названиях исторических периодов развития человечества: «каменный век», «бронзовый век», «железный век». В наши дни используются более 200 различных видов минеральных ресурсов. По образному выражению академика А.Е. Ферсмана (1883–1945), ныне к ногам человечества сложена вся периодическая система Менделеева.

Полезные ископаемые – это минеральные образования земной коры, которые могут эффективно использоваться в хозяйстве, скопления полезных ископаемых образуют месторождения, а при больших площадях распространения – бассейны.

Распространение полезных ископаемых в земной коре подчиняется геологическим (тектоническим) закономерностям (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Залежи полезных ископаемых в зависимости от строения и возраста участка земной коры и формы рельефа

Форма рельефа	Строение и возраст участка земной коры	Характерные полезные ископаемые	Примеры
Равнины	Щиты архейско-протерозойских платформ	Обильные месторождения железных руд	Украинский щит, Балтийский щит Русской платформы
	Плиты древних платформ, чехол которых сформировался в палеозойскую и мезозойскую эру	Нефть, газ, каменный уголь, строительные материалы	Западно-Сибирская низменность, Русская равнина
Горы	Молодые складчатые горы альпийского возраста	Полиметаллические руды, строительные материалы	Кавказ, Альпы
	Разрушенные складчато-глыбовые горы мезозойской, герцинской и калидонской складчатостей	Руды черных (железо, марганец) и цветных (хром, медь, никель, уран, ртуть) металлов, россыпи золота, платины, алмазов	Казахский мелкосопочник
	Омоложденные горы мезозойской и палеозойской складчатостей	Руды черных и цветных металлов, россыпные месторождения золота, платины и алмазов	Урал, горы Центральной Европы
Материковая отмель (шельф)	Краевые прогибы	Нефть, газ	Мексиканский залив
	Затопленная часть плит, платформ	Нефть, газ	Персидский залив
Дно океана	Абиссальные равнины	Железо-марганцевые конкреции	Дно Северного моря

В табл. 6. показана зависимость между строением земной коры, рельефом и размещением полезных ископаемых.

Топливные полезные ископаемые имеют осадочное происхождение и обычно сопутствуют чехлу древних платформ и их внутренним и краевым

прогибам. Так что название «бассейн» отражает их происхождение довольно точно – «морской бассейн».

На земном шаре известно более 3,6 тыс. *угольных* бассейнов и месторождений, которые в совокупности занимают 15 % территории земной суши. Основная часть ресурсов угля приходится на Азию, Северную Америку и Европу и сконцентрирована в десяти крупнейших бассейнах Китая, США, России, Индии, Германии.

Нефтегазоносных бассейнов разведано более 600, разрабатывается 450. Общее число нефтяных месторождений достигает 35 тыс. Основные запасы находятся в Северном полушарии и являются отложениями мезозоя. Главная часть этих запасов также сконцентрирована в небольшом числе крупнейших бассейнов Саудовской Аравии, США, России, Ирана.

Рудные полезные ископаемые обычно приурочены к фундаментам (щитам) древних платформ, а также к складчатым областям. В таких областях они нередко образуют огромные по протяженности рудные (металлогенические) пояса, связанные своим происхождением с глубинными разломами в земной коре. Ресурсы геотермальной энергии особенно велики в странах и районах с повышенной сейсмической и вулканической активностью (Исландия, Италия, Новая Зеландия, Филиппины, Мексика, Камчатка и Северный Кавказ в России, Калифорния в США).

Для хозяйственного освоения наиболее выгодны территориальные сочетания (скопления) полезных ископаемых, которые облегчают комплексную переработку сырья.

Добыча минеральных ресурсов *закрытым* (шахтным) способом в мировых масштабах ведется в зарубежной Европе, Европейской части России, США, где многие месторождения и бассейны, находящиеся в верхних слоях земной коры, уже сильно выработаны.

Если полезные ископаемые залегают на глубине 20–30 м, выгоднее снять бульдозером верхний слой горной породы и вести добычу *открытым* способом. Открытым способом добывают, например, железную руду в районе Курска, уголь на некоторых месторождениях Сибири.

По запасам и добыче многих минеральных богатств Россия занимает одно из первых мест в мире (газ, уголь, нефть, железная руда, алмазы).

3.9.4. Гидросфера

Гидросфера (от греч. *hydro* – вода и *sphaira* – шар) – водная оболочка Земли, представляющая собой совокупность океанов, морей и континентальных водных бассейнов – рек, озер, болот и др., подземных вод, ледников и снежных покровов.

Полагают, что водная оболочка Земли образовалась в раннем архее, то есть примерно 3800 млн лет назад. В этот период истории Земли на нашей

планете установилась температура, при которой вода могла находиться в значительной мере в жидком агрегатном состоянии.

Вода как вещество обладает уникальными свойствами, к числу которых относятся следующие:

- способность к растворению очень многих веществ;
- высокая теплоемкость;
- нахождение в жидком состоянии в интервале температур от 0 до 100 °С;
- большая легкость воды в твердом состоянии (льда), нежели в жидком.

Уникальные свойства воды позволили ей играть важную роль в эволюционных процессах, происходящих в поверхностных слоях земной коры, в круговороте вещества в природе и являться условием возникновения и развития жизни на Земле. Вода начинает выполнять свои геологические и биологические функции в истории Земли после возникновения гидросферы.

Гидросферу составляют поверхностные воды и подземные воды. *Поверхностные воды* гидросферы покрывают 70,8 % земной поверхности. Их суммарный объем достигает 1370,3 млн км³, что составляет 1/800 общего объема планеты, а масса оценивается в 1,4 ч 10¹⁸ т. К числу поверхностных вод, то есть вод, покрывающих сушу, относят Мировой океан, континентальные водные бассейны и материковые льды.

Мировой океан включает в себя все моря и океаны Земли. Моря и океаны покрывают 3/4 поверхности суши, или 361,1 млн км². В Мировом океане сосредоточена основная масса поверхностных вод – 98 %. Мировой океан условно разделен на четыре океана: Атлантический, Тихий, Индийский и Северный Ледовитый. Полагают, что современный уровень океана установился около 7000 лет назад. По данным геологических исследований, колебания уровня океана за последние 200 млн лет не превышали 100 м.

Вода в Мировом океане соленая. Среднее содержание солей составляет около 3,5 % по массе, или 35 г/л. Их качественный состав следующий: из катионов преобладают Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺, из анионов – Cl⁻, SO₄²⁻, Br⁻, CO₃²⁻, F⁻. Считается, что солевой состав Мирового океана остается постоянным с палеозойской эры – времени начала развития жизни на суше, то есть примерно в течение 400 млн лет.

Континентальные водные бассейны представляют собой реки, озера, болота, водохранилища. Их воды составляют 0,35 % от общей массы поверхностных вод гидросферы. Некоторые континентальные водоемы – озера – содержат соленую воду.

Эти озера имеют либо вулканическое происхождение, либо представляют собой изолированные остатки древних морей, либо образованы в районе мощных отложений растворимых солей. Однако в основном

континентальные водоемы пресные. Пресная вода открытых водоемов также содержит растворимые соли, но в небольшом количестве. В зависимости от содержания растворенных солей пресную воду разделяют на мягкую и жесткую. Чем меньше в воде растворено солей, тем она мягче. Самая жесткая пресная вода содержит солей не более 0,005 % по массе, или 0,5 г/л.

Материковые льды составляют 1,65 % от общей массы поверхностных вод гидросферы, 99 % льда находится в Антарктиде и Гренландии. Общая масса снега и льда на Земле оценивается в 0,0004 % массы нашей планеты. Этого достаточно для того, чтобы покрыть всю поверхность планеты слоем льда толщиной 53 м. Согласно расчетам, если эта масса растает, то уровень океана поднимется на 64 м.

Химический состав поверхностных вод гидросферы приблизительно равен среднему составу морской воды. Из химических элементов по массе преобладают кислород (85,8 %) и водород (10,7 %). Поверхностные воды содержат значительное количество хлора (1,9 %) и натрия (1,1 %). Отмечается существенно более высокое, чем в земной коре, содержание серы и брома.

Подземные воды гидросферы содержат основной запас пресной воды. Предполагают, что суммарный объем подземных вод примерно 28,5 млрд км³. Это почти в 15 раз больше, чем в Мировом океане. Считают, что именно подземные воды являются основным резервуаром, пополняющим все поверхностные водоемы. Подземная гидросфера может быть разделена на пять зон.

Криозона. Область льдов. Зона охватывает полярные районы. Толщина ее оценивается в пределах 1 км.

Зона жидкой воды. Охватывает практически всю земную кору.

Зона парообразной воды ограничивается глубиной до 160 км. Полагают, что вода в этой зоне имеет температуру от 450 °С до 700 °С и находится под давлением до 5 ГПа.

Ниже, на глубинах до 270 км, располагается *зона мономерных молекул воды*. Она охватывает слои воды с диапазоном температур от 700 °С до 1000 °С и давлением до 10 ГПа.

Зона плотной воды простирается, предположительно, до глубин в 3000 км и опоясывает всю мантию Земли. Температуру воды в этой зоне оценивают в промежутке от 1000° до 4000 °С, а давление – до 120 ГПа. Вода при таких условиях полностью ионизирована.

Гидросфера Земли выполняет важные функции: она регулирует температуру планеты, обеспечивает круговорот веществ, является составной частью биосферы.

Непосредственное воздействие на *регуляцию температуры* поверхностных слоев Земли гидросфера оказывает благодаря одному из важных свойств воды – большой теплоемкости. По этой причине поверхностные

воды аккумулируют солнечную энергию, а затем медленно ее отдают в окружающее пространство. Выравнивание температуры на поверхности Земли происходит исключительно благодаря круговороту воды. Кроме того, снег и лед имеют очень высокую отражающую способность: она превышает среднюю для земной поверхности на 30 %. Поэтому на полюсах разность между поглощенной и излученной энергией всегда отрицательна, то есть поглощенная поверхностью энергия меньше испущенной. Так происходит терморегуляция планеты.

Другая важнейшая функция гидросферы – обеспечение *круговорота веществ*.

Гидросфера находится в постоянном взаимодействии с атмосферой, земной корой и биосферой. Вода гидросферы растворяет в себе воздух, концентрируя при этом кислород, используемый в дальнейшем водными живыми организмами. Находящийся в воздухе углекислый газ, образующийся преимущественно в результате дыхания живых организмов, сжигания топлива и извержения вулканов, обладает высокой растворимостью в воде и аккумулируется в гидросфере. Гидросфера растворяет в себе также тяжелые инертные газы – ксенон и криптон, содержание которых в воде выше, чем в воздухе.

Воды гидросферы, испаряясь, поступают в атмосферу и выпадают в виде осадков, которые проникают в горные породы, разрушая их. Так вода участвует в процессах *выветривания* горных пород. Обломки горных пород сносятся текучими водами в реки, а затем в моря и океаны или в замкнутые континентальные водоемы и постепенно отлагаются на дне. Эти отложения впоследствии превращаются в осадочные горные породы.

Полагают, что главные катионы морской воды – катионы натрия, магния, калия, кальция – образовались в результате выветривания горных пород и последующего выноса продуктов выветривания реками в море. Важнейшие анионы морской воды – анионы хлора, брома, фтора, сульфат-ион и карбонат-ион, вероятно, происходят из атмосферы и связаны с вулканической деятельностью.

Часть растворимых солей систематически выводится из состава гидросферы посредством их осаждения. Например, при взаимодействии растворенных в воде карбонат-ионов с катионами кальция и магния образуются нерастворимые соли, которые опускаются на дно в виде карбонатных осадочных горных пород. В осаждении некоторых солей большую роль играют организмы, населяющие гидросферу. Они извлекают из морской воды отдельные катионы и анионы, концентрируя их в своих скелетах и раковинах в виде карбонатов, силикатов, фосфатов и других соединений. После смерти организмов их твердые оболочки накапливаются на морском дне и образуют мощные толщи известняков, фосфоритов и различных кремнистых пород. Подавляющая часть осадочных горных пород и такие ценные полезные ископаемые, как нефть, уголь, бокситы,

разнообразные соли и т.д., образовались в прошлые геологические периоды в различных водоемах гидросферы. Установлено, что даже самые древние горные породы, абсолютный возраст которых достигает около 1,8 млрд лет, представляют собой сильно изменившиеся осадки, образованные в водной среде. Вода используется также в процессе фотосинтеза, в результате которого образуется органическое вещество и кислород.

В гидросфере примерно около 3500 млн лет назад зародилась жизнь на Земле. Эволюция организмов продолжалась исключительно в водной среде вплоть до начала палеозойской эры, когда примерно 400 млн лет назад началось постепенное переселение животных и растительных организмов на сушу. В этой связи гидросферу рассматривают как компонент биосферы (*биосфера* – сфера жизни, область обитания живых организмов).

Живые организмы распространены в гидросфере крайне неравномерно. Количество и многообразие живых организмов в отдельных участках поверхностных вод определяется многими причинами, в том числе комплексом факторов внешней среды: температурой, соленостью воды, освещенностью, давлением. С увеличением глубины ограничивающее действие освещенности и давления возрастает: количество поступающего света резко уменьшается, а давление, наоборот, становится очень высоким. Так, в морях и океанах заселены в основном литоральные зоны, то есть зоны не глубже 200 м, наиболее прогреваемые солнечными лучами.

3.9.5. Атмосфера

Атмосфера (от греч. *atmos* – пар, испарение и *sphaira* – шар) – воздушная оболочка Земли.

Атмосфера состоит из газов и взвешенных в них частиц твердых и жидких примесей – аэрозолей. Масса атмосферы $5,157 \cdot 10^{15}$ т. Столб воздуха оказывает давление на поверхность Земли: среднее атмосферное давление на уровне моря – 1013,25 гПа, или 760 мм рт. ст. Средняя температура воздуха у поверхности Земли – 15°C, при этом она изменяется примерно от 57°C в субтропических пустынях до -89°C в Антарктиде.

Атмосфера неоднородна. В ней выделяют следующие слои: *тропосферу*, *стратосферу*, *мезосферу*, *термосферу* и *экзосферу*, которые отличаются по особенностям распределения температуры, плотности воздуха и некоторым другим параметрам. Участки атмосферы, занимающие промежуточное положение между этими слоями, соответственно называют *тропопаузой*, *стратоплаузой* и *мезоплаузой*.

Тропосфера – нижний слой атмосферы высотой от 8–10 км в полярных широтах и до 16–18 км в тропиках. Тропосфера характеризуется падением температуры воздуха с высотой; с удалением от поверхности Земли на каждый километр температура уменьшается примерно на 6°C. Плотность

воздуха быстро убывает. В тропосфере сосредоточено около 80 % всей массы атмосферы.

Стратосфера располагается на высотах от 10–15 км до 50–55 км от поверхности Земли. В ней температура повышается с высотой. Возрастание температуры происходит по причине поглощения озоном, находящимся в этом слое атмосферы, коротковолновой радиации Солнца, прежде всего ультрафиолетовых лучей. При этом в нижней части стратосферы до уровня около 20 км температура мало меняется с высотой и может даже незначительно уменьшаться. Выше температура начинает возрастать – сначала медленно, а с уровня 34–36 км намного быстрее. В верхней части стратосферы на высоте 50–55 км температура достигает 260–270 К.

Мезосфера – слой атмосферы, расположенный на высоте 55–85 км. В мезосфере температура воздуха с увеличением высоты уменьшается – примерно с 270 К на нижней границе до 200 К на верхней границе.

Термосфера простирается на высотах примерно от 85 км до 250 км от поверхности Земли и характеризуется быстрым повышением температуры воздуха, достигающей на высоте 250 км 800–1200 К. Повышение температуры происходит вследствие поглощения этим слоем атмосферы корпускулярной и рентгеновской радиации Солнца; здесь тормозятся и сгорают метеоры. Таким образом, термосфера выполняет функцию защитного слоя Земли.

Выше термосферы находится *экзосфера*, верхняя граница которой условна и отмечается высотой примерно 1000 км над поверхностью Земли. Из экзосферы атмосферные газы рассеиваются в мировое пространство. Так происходит постепенный переход от атмосферы к межпланетному пространству.

В состав атмосферного воздуха входят следующие газы: азот (78,1 % по объему), кислород (20,9 % по объему), а также в гораздо меньших количествах аргон, углекислый газ, гелий, озон, радон, водяной пар. Кроме того, воздух может содержать различные переменные компоненты: оксиды азота, аммиак и др.

Помимо газов в состав воздуха входит *атмосферный аэрозоль*, который представляет собой взвешенные в воздухе очень мелкие твердые и жидкие частицы. Он образуется в процессе жизнедеятельности организмов, хозяйственной деятельности человека, вулканических извержений, подъема пыли с поверхности планеты и из космической пыли, попадающей в верхние слои атмосферы.

Состав атмосферного воздуха до высоты порядка 100 км в целом постоянен во времени и однороден в разных районах Земли. При этом содержание переменных газообразных компонентов и аэрозолей неодинаково. Выше 100–110 км происходит частичный распад молекул кислорода, углекислого газа и воды. На высоте около 1000 км начинают преобладать

легкие газы – гелий и водород, а еще выше атмосфера Земли постепенно переходит в межпланетный газ.

Важной составной частью воздуха является *водяной пар*. Он поступает в атмосферу при испарении с поверхности воды и влажной почвы, а также путем транспирации растениями. Относительное содержание водяного пара в воздухе меняется у земной поверхности от 2,6 % в тропиках до 0,2 % в полярных широтах. С удалением от поверхности Земли количество водяного пара в атмосферном воздухе быстро падает, и уже на высоте 1,5–2 км убывает наполовину. В тропосфере ввиду понижения температуры водяной пар конденсируется. При конденсации водяного пара образуются облака, из которых выпадают атмосферные осадки. Количество осадков, выпавших на Землю, равно количеству испарившейся с поверхности Земли воды. Избыток водяного пара над океанами переносится на континенты воздушными потоками. Количество водяного пара, переносимого в атмосфере с океана на континенты, равно объему стока рек, впадающих в океаны.

Еще одна составляющая воздуха – *озон*. Он сосредоточен на 90 % в стратосфере, остальная его часть находится в тропосфере. Озон поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца, которое негативно воздействует на живые организмы. Районы с пониженным содержанием озона в атмосфере называют *озоновыми дырами*. Наибольшие колебания толщины озонового слоя наблюдаются в высоких широтах, поэтому вероятность возникновения озоновых дыр в районах, близких к полюсам, выше, чем у экватора.

Углекислый газ поступает в атмосферу в значительном количестве. Он постоянно выделяется в результате дыхания организмов, горения, извержения вулканов и других процессов, происходящих на Земле. Однако содержание углекислого газа в воздухе мало, поскольку основная его масса растворяется в водах гидросферы. Тем не менее, отмечается, что за последние 200 лет содержание углекислого газа в атмосфере увеличилось на 35 %. Причина такого существенного увеличения – активная хозяйственная деятельность человека.

Главным источником тепла для атмосферы является поверхность Земли. Атмосферный воздух достаточно хорошо пропускает к земной поверхности солнечные лучи. Поступающая на Землю солнечная радиация частично поглощается атмосферой – главным образом, водяным паром и озоном, но подавляющая ее часть достигает земной поверхности.

Солнечная радиация, достигающая поверхности Земли, частично отражается от нее. Величина отражения зависит от отражающей способности конкретного участка земной поверхности, так называемого *альбедо*. Среднее альбедо Земли – около 30 %, при этом величина альбедо колеблется от 7–9 % для чернозема до 90 % для свежеснежного покрова. Нагреваясь, земная поверхность выделяет тепловые лучи в атмосферу и нагревает ее нижние слои. Помимо основного источника тепловой энергии

атмосферы – теплоты земной поверхности, тепло в атмосферу поступает в результате конденсации водяного пара, а также путем поглощения прямой солнечной радиации.

Неодинаковый разогрев атмосферы в разных областях Земли вызывает неодинаковое распределение давления, что приводит к перемещению воздушных масс вдоль поверхности Земли. Воздушные массы перемещаются из областей с высоким давлением в области с низким давлением. Такое движение воздушных масс называют *ветром*. При определенных условиях скорость ветра может быть очень большой, до 30 м/с и более. Ветер, имеющий скорость более 30 м/с, называют *ураганом*.

Состояние нижнего слоя атмосферы в данном месте и в данное время называют *погодой*. Она характеризуется температурой воздуха, осадками, силой и направлением ветра, облачностью, влажностью воздуха и атмосферным давлением. Погода определяется условиями циркуляции атмосферы и географическим положением местности. Она наиболее устойчива в тропиках и наиболее изменчива в средних и высоких широтах. Характер погоды, ее сезонная динамика зависят от *климата* на данной территории.

Под *климатом* понимаются наиболее часто повторяющиеся для данной местности особенности погоды, сохраняющиеся на протяжении длительного времени. Это усредненные за 100 лет характеристики – температура, давление, количество осадков и др. Понятие климата (от греч. *klima* – наклон) возникло еще в Древней Греции. Уже тогда понимали, что погодные условия зависят от угла, под которым солнечные лучи падают на поверхность Земли. Ведущим условием установления определенного климата на данной территории является количество энергии, приходящейся на единицу площади. Оно зависит от суммарной солнечной радиации, падающей на земную поверхность, и от альбедо этой поверхности. Так, в районе экватора и у полюсов температура мало меняется в течение года, а в субтропических областях и в средних широтах годовая амплитуда температур может достигать 65°C. Основными климатообразующими процессами являются теплообмен, влагообмен и циркуляция атмосферы. Все эти процессы имеют один источник энергии – Солнце.

Атмосфера является неперенным условием для всех форм жизни. Наибольшее значение для жизнедеятельности организмов имеют такие компоненты воздуха, как кислород, азот, водяной пар, углекислый газ, озон. Кислород необходим для дыхания подавляющему большинству живых организмов. Азот, усваиваемый из воздуха некоторыми микроорганизмами, необходим для минерального питания растений. Водяной пар, конденсируясь и выпадая в виде осадков, является источником воды на суше. Углекислый газ – исходное вещество для процесса фотосинтеза. Озон поглощает вредное для организмов жесткое ультрафиолетовое излучение.

По предположению ученых, атмосфера образовалась после завершения образования планеты около 4,5 млрд лет назад из газов, выделяемых твердыми оболочками Земли. В течение геологической истории Земли атмосфера под влиянием различных факторов претерпевала значительные изменения своего состава. Развитие атмосферы зависит от геологических и геохимических процессов, происходящих на Земле. После возникновения жизни на нашей планете, то есть примерно 3,5 млрд лет назад, на развитие атмосферы начали оказывать существенное влияние и живые организмы. Значительная часть газов – азот, углекислый газ, водяной пар – возникла в результате извержения вулканов. Кислород появился около 2 млрд лет назад как результат деятельности фотосинтезирующих организмов, первоначально зародившихся в поверхностных водах океана.

В течение последнего времени происходят заметные изменения в атмосфере, связанные с активной хозяйственной деятельностью человека. Так, согласно наблюдениям за последние 200 лет произошел существенный рост концентрации парниковых газов: содержание углекислого газа возросло в 1,35 раза, метана – в 2,5 раза. Значительно увеличилось содержание многих других переменных компонентов в составе воздуха.

Происходящие изменения состояния атмосферы – увеличение концентрации парниковых газов, озоновые дыры, загрязнение воздуха – представляют собой глобальные экологические проблемы современности.

Контрольные вопросы

1. Что изучают астрономия, космология?
2. Какие единицы измерения расстояний используются в астрономии?
3. В чем сущность космологической модели расширяющейся Вселенной?
4. Сформулируйте закон Хаббла.
5. Как, предположительно, произошел Большой Взрыв Вселенной?
6. Какова природа реликтового излучения?
7. В чем заключается сущность антропного принципа?
8. Каково среднее расстояние между галактиками?
9. Что такое квазары?
10. Как классифицируются галактики? Каково строение нашей Галактики?
11. Каков химический состав звезд, и каким образом он определяется?
12. Как характеризуется интенсивность блеска звезд?
13. На какие виды классифицируются звезды?
14. Каково строение Солнца?
15. Какие процессы являются источником солнечной энергии?
16. Охарактеризуйте гипотезы возникновения Солнечной системы.
17. Дайте общую характеристику планетам Солнечной системы.

18. Чему равен радиус Земли? Насколько экваториальный радиус Земли длиннее полярного?

19. Как называется оболочка Земли, состоящая из земной коры и верхней части мантии?

20. Назовите три слоя, составляющие материковую земную кору.

21. Назовите древние платформы, лежащие в основании материков Африка, Северная Америка, Южная Америка.

22. Дайте определение тектонических структур: плита, платформа, щит, фундамент, осадочный чехол.

23. Перечислите важнейшие функции гидросферы Земли. Каким образом вода осуществляет терморегуляцию планеты?

24. Какова роль гидросферы в круговороте веществ в природе?

25. На какие отдельные зоны делится атмосфера? Каковы принципы этого деления?

26. Каков состав атмосферы?

27. В чем разница между климатом и погодой?

28. В чем заключается гипотеза возникновения атмосферы?

4. ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ К-МЕЗОНОВ

Цель работы – ознакомление с методами применения законов сохранения энергии, импульса, заряда и др. для идентификации элементарных частиц. Расчёт характеристик микрочастиц по фотографиям их треков.

Приборы и принадлежности: фотографии треков частиц, калька, транспортир, линейка с миллиметровой шкалой, графики зависимости длины пробега частиц от их кинетической энергии.

Теоретическая часть

Мезоны – нестабильные элементарные частицы с нулевым или целым спином, принадлежащие к классу адронов и не имеющие барионного заряда. К ним относятся π -мезоны, K -мезоны и многие резонансы. Их название происходит от греч. *mesos* (промежуточный, средний). Это объясняется тем, что массы мезонов имеют промежуточное значение между массой электрона и массой протона.

π -мезоны (пионы) – группа из трёх нестабильных элементарных частиц: двух заряженных (π^+ и π^-) и одной нейтральной (π^0). Они были обнаружены в составе космического излучения в 1947 г. английским физиком С. Пауэллом.

K -мезоны (каоны) – группа нестабильных элементарных частиц, открытых в результате исследований в космических лучах методом фотоэмульсий (1949 г.) и изучения реакций с участием частиц высоких энергий, полученных на ускорителях учеными разных стран. Эта группа включает заряженные частицы (K^+ - и K^- -мезоны), а также нейтральные K^0 и \tilde{K}^0 (анти K -мезон).

Массы покоя K -мезонов составляют около $1000 m_e$ (m_e – масса покоя электрона). Средние времена жизни заряженных K^+ - и K^- -мезонов одинаковы и равны $(1,229 \pm 0,008) \cdot 10^{-8}$ с. Нейтральные K^0 - и \tilde{K}^0 -мезоны ведут себя как отдельные частицы только в момент рождения. При свободном движении они являются смесью двух других нейтральных частиц K_1^0 и K_2^0 , обладающих близкими массами, но различными временами жизни:

$$\tau_{K_1^0} = (0,92 \pm 0,02) \cdot 10^{-10} \text{ с}, \quad \tau_{K_2^0} = (5,62 \pm 0,08) \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

K -мезоны участвуют в сильных взаимодействиях. Они рождаются при столкновении пи-мезонов или нуклонов большой энергии (свыше миллиарда электронвольт) с нуклонами.

На рис. 1.1 показан известный случай образования двух нейтральных частиц (K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона) в результате взаимодействия π^- -мезона с покоящимся протоном $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$, а затем распад каждой из образовавшихся частиц на две с зарядами разных знаков. Очевидно, что продолжение линии полета нейтральной частицы (пунктирные линии на рисунке) должно проходить между следами продуктов их распада.

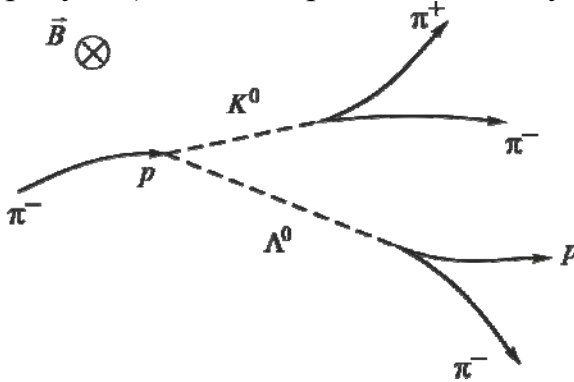


Рис. 1.1. Иллюстрация процессов взаимодействия и распада частиц

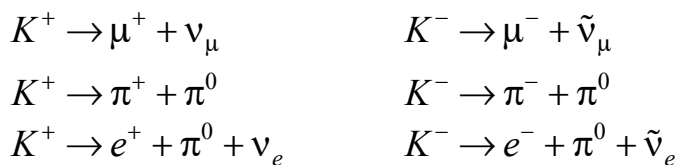
K -мезоны обладают отличным от нуля значением квантового числа *странности* (S), характеризующей их поведение в процессах, обусловленных сильным взаимодействием: у K^+ - и K^0 -мезонов ($S = +1$), а у K^- - и \tilde{K}^0 -мезонов, являющихся античастицами $S = -1$.

Совместно с гиперонами K -мезоны образуют группу так называемых *странных* частиц (для которых $S = \pm 1$).

K^+ - и K^0 -мезоны одинаковым образом участвуют в сильных взаимодействиях и так как имеют приблизительно одинаковые массы и различаются лишь электрическим зарядом, то могут быть объединены в одну группу – так называемый *изотопический дублет*. Они представляют собой различные зарядовые состояния одной и той же частицы с *изотопическим спином* $I = 1/2$. Аналогичную группу составляют K^- - и \tilde{K}^0 - мезоны.

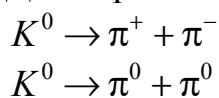
Из-за различия в странности нейтральные K -мезоны (K^0 - и \tilde{K}^0 -) являются разными частицами, различным образом участвующими в сильных взаимодействиях.

Распадаются K -мезоны разными путями с образованием π - или μ -мезонов, электронов или позитронов, а также нейтронов. Распад заряженных K -мезонов происходит преимущественно по схемам

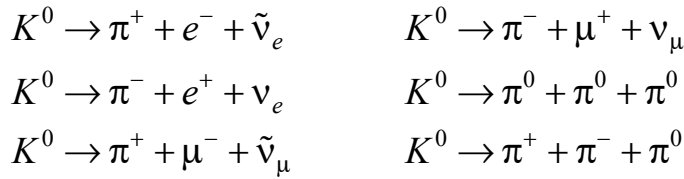


Распад нейтральных K -мезонов в основном происходит по следующим схемам (в порядке убывания вероятности распада):

Для короткоживущих



Для долгоживущих



Процессы распада и рождения новых частиц происходят в соответствии с законами сохранения заряда, массы, импульса, энергии, спина и др.

Например, **закон сохранения заряда** требует, чтобы *заряд распадающейся частицы равнялся суммарному заряду продуктов распада*.

Закон сохранения импульса утверждает, что *вектор импульса распадающейся частицы равен векторной сумме импульсов продуктов распада*.

Например, при распаде одной частицы на две (рис. 1.2) математическое выражение закона сохранения импульса имеет вид

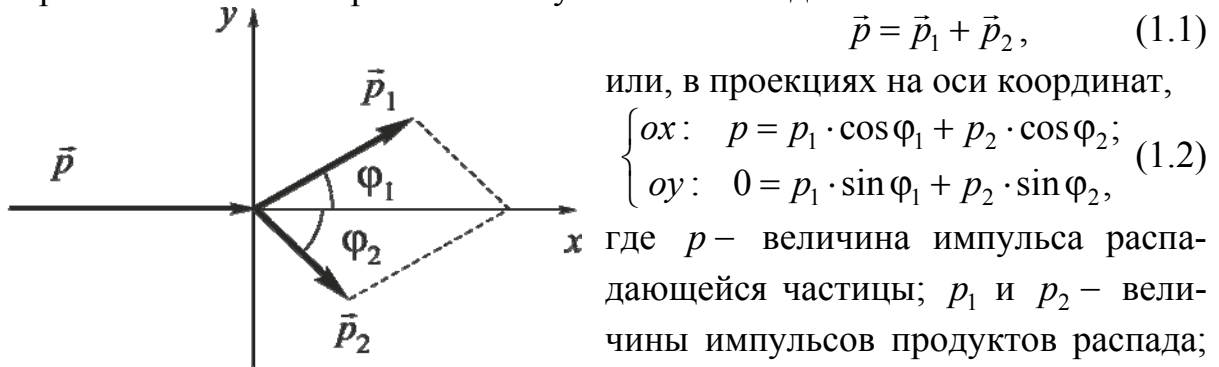


Рис. 1.2. Иллюстрация к закону сохранения импульса

или, в проекциях на оси координат,

$$\begin{cases} ox: & p = p_1 \cdot \cos \varphi_1 + p_2 \cdot \cos \varphi_2; \\ oy: & 0 = p_1 \cdot \sin \varphi_1 + p_2 \cdot \sin \varphi_2, \end{cases} \quad (1.2)$$

где p – величина импульса распадающейся частицы; p_1 и p_2 – величины импульсов продуктов распада; φ_1 и φ_2 – углы их разлета (с учетом правила отсчета углов, т.е. $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 < 0$).

Выражение закона сохранения энергии для такого распада записывают в виде:

$$E = E_1 + E_2, \quad (1.3)$$

где E – полная энергия распадающейся частицы. Согласно теории относительности полная энергия частицы может быть выражена через энергию покоя $E_0 = m_0 c^2$ и импульс частицы:

$$E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} \quad \text{или} \quad E = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2}, \quad (1.4)$$

где c – скорость света в вакууме. Аналогично для продуктов распада:

$$E_1 = \sqrt{(m_{10} c^2)^2 + (p_1 c)^2} \quad \text{или} \quad E_1 = \sqrt{E_{10}^2 + (p_1 c)^2}, \quad (1.5)$$

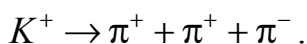
$$E_2 = \sqrt{(m_{20} c^2)^2 + (p_2 c)^2} \quad \text{или} \quad E_2 = \sqrt{E_{20}^2 + (p_2 c)^2}. \quad (1.6)$$

Используя эти и другие законы сохранения при исследовании траекторий частиц и продуктов их распада, можно рассчитать характеристики частиц (среднее время жизни, массу, заряд и др.).

Если трековый прибор, т.е. *устройство, которое тем или иным способом фиксирует траекторию движения частицы*, поместить в магнитное поле, то по кривизне траектории (трека) частицы можно определить знак её заряда. Известно, что искривление траектории заряженной частицы в магнитном поле обусловлено действием на неё силы Лоренца, направление которой зависит от знака заряда частицы. Нейтральная частица в магнитном поле движется прямолинейно.

Действующие в мире элементарных частиц законы сохранения не допускают возможности возникновения одиночных частиц. Во всех экспериментах с античастицами их возникновение наблюдается только в парах с частицами.

В данной лабораторной работе изучается распад K^+ -мезона. Распад K^+ -мезона сопровождается рождением π -мезонов (пионов):



Пример распада K^+ -мезона по этой схеме приведен на рис. 1.3.

При распаде на три частицы в формулы (1.1)–(1.3) необходимо добавить по одному слагаемому (углы φ_1 , φ_2 и φ_3 , см. рис. 1.3):

$$\begin{cases} ox: & p = p_1 \cdot \cos \varphi_1 + p_2 \cdot \cos \varphi_2 + p_3 \cdot \cos \varphi_3, \\ oy: & 0 = p_1 \cdot \sin \varphi_1 + p_2 \cdot \sin \varphi_2 + p_3 \cdot \sin \varphi_3, \end{cases} \quad (1.7)$$

$$E = E_1 + E_2 + E_3. \quad (1.8)$$

K -мезоны имеют кварковую структуру. Они построены из пары кварк – антикварк:

K^+ -мезон состоит из u -кварка и \tilde{s} -антикварка ($u\tilde{s}$);

K^- -мезон из s -кварка и \tilde{u} -антикварка ($s\tilde{u}$);

K^0 -мезон из d -кварка и \tilde{s} -антикварка ($d\tilde{s}$);

\tilde{K}^0 -мезон из s -кварка и \tilde{d} -антикварка ($s\tilde{d}$).

Сильное взаимодействие между кварками достигается за счёт обмена глюонами (от англ. *glue* – клей) – безмассовыми электрически нейтральными частицами со спином, равным 1.

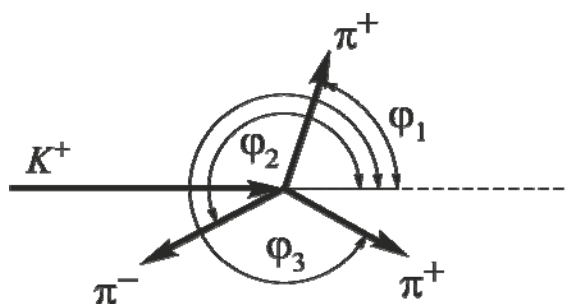


Рис. 1.3. Распад K^+ -мезона

Методика проведения эксперимента

Материалом для выполнения работы служат снимки треков частиц, полученные в пузырьковой камере, в рабочем объеме которой находится перегретая жидкость (т.е. при температуре выше температуры кипения). Такое состояние достигается путем кратковременного (на доли секунды) снижения температуры кипения жидкости путем уменьшения ее давления.

Заряженная частица, попавшая в пузырьковую камеру, образует на своем пути ионы жидкости, которые становятся центрами интенсивного парообразования. Вдоль траектории заряженной частицы появляются пузырьки пара, последовательность которых образует след частицы – трек. Образовавшиеся треки фотографируют и исследуют. Нейтральные частицы очень слабо взаимодействуют с молекулами среды, поэтому практически не образуют треков. Об их траекториях (которые всегда прямолинейны) судят по точкам рождения и распада.

Определение собственного времени жизни частицы с помощью трековых приборов основано на измерении длины её пробега, т.е. расстояния, пройденного частицей от момента образования до распада.

Импульс нейтральной частицы ввиду отсутствия потерь на взаимодействие с молекулами среды не меняется во время полета и пропорционален длине пробега l .

Действительно, поскольку

$$p = mv,$$

где масса частицы m связана с массой покоя m_0 уравнением

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

а скорость частицы v определяется длиной пробега l и временем её жизни в лабораторной системе отсчета $\tau_{\text{лаб}}$

$$v = \frac{l}{\tau_{\text{лаб}}},$$

то с учетом релятивистского соотношения между временем жизни в лабораторной системе отсчета $\tau_{\text{лаб}}$ и собственным временем жизни τ_0 в системе отсчета, в которой частица покоится (т.е. в системе отсчета, движущейся вместе с частицей)

$$\tau_{\text{лаб}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

можно получить значение собственного времени жизни частицы

$$\tau_0 = \frac{l}{v} \cdot \frac{m_0}{m} = \frac{l \cdot m_0}{p}, \text{ или } \tau_0 = l \cdot \frac{E_0}{p \cdot c^2}. \quad (1.9)$$

Импульс p распадающейся частицы можно рассчитать как сумму импульсов продуктов распада (формулы (1.1) и (1.2)). Поскольку продуктами распада в исследуемых случаях являются заряженные частицы, то их импульсы изменяются во время полета в результате потерь энергии на ионизацию окружающих атомов и молекул. Между этими потерями и длиной пробега заряженных частиц до остановки имеется определенная взаимосвязь.

Зависимости начальной кинетической энергии π^\pm -мезонов от длины пробега l этих частиц известны и представлены в виде графика в прил. 2 к данной работе. Определив по графику значение начальной кинетической энергии частицы и воспользовавшись известной формулой специальной теории относительности

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{T(2m_0c^2 + T)} = \frac{1}{c} \sqrt{T(2E_0 + T)}, \quad (1.10)$$

можно рассчитать значение импульса частицы.

При использовании графика для расчетов необходимо учитывать, что в экспериментальной ядерной физике энергию частиц измеряют в МэВ, импульс в $\frac{\text{МэВ}}{c}$, а массу в $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$. Здесь c – размерность внесистемной единицы скорости ($1 c = 3 \cdot 10^8$ м/с); МэВ (мегаэлектрон-вольт) – размерность внесистемной единицы энергии ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж).

Выбранные единицы измерения энергии, импульса и массы удобны для выполнения расчётов в данной работе. Например, при подстановке значений импульсов с такой размерностью в формулы (1.4)–(1.6) сразу получается значение произведения pc в МэВ.

Массу покоя распадающейся частицы можно рассчитать, решая систему уравнений (1.8) и (1.4)–(1.6).

$$m_0c^2 = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sqrt{E_{i0}^2 + (p_i c)^2} \right)^2 - (p \cdot c)^2}, \quad (1.11)$$

где N – число частиц-продуктов распада. Энергия покоя продуктов распада (π^+ -мезона и π^- -мезона) одинакова и составляет 139,6 МэВ.

Порядок выполнения работы

1. На фотографии (прил. 1) треков найдите распад K^+ -мезона ($K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$) и перерисуйте треки частиц на кальку. Измерьте длину двух (наибольших) из трех треков пионов, учитывая масштаб, указанный на фотографии. Измерьте углы вылета всех трех пионов (см. рис. 1.3). Данные занесите в табл. 1.1.

2. По графику зависимости длины пробега заряженных частиц от начальной кинетической энергии (прил. 2) определите начальные кинетические энергии пионов и по формуле (1.10) рассчитайте их начальные импульсы. Результаты занесите в табл. 1.1.

3. Переписав закон сохранения импульса (1.7) в виде системы линейных уравнений со свободными членами

$$\begin{cases} a = p - p_3 \cdot \cos(\varphi_3), \\ b = 0 - p_3 \cdot \sin(\varphi_3), \end{cases} \quad (1.12)$$

где $a = p_1 \cdot \cos(\varphi_1) + p_2 \cdot \cos(\varphi_2)$; $b = p_1 \cdot \sin(\varphi_1) + p_2 \cdot \sin(\varphi_2)$, решите её относительно неизвестных p и p_3 .

Замечание. В случае получения небольшого отрицательного значения величины проекции импульса K^+ -мезона принять, что в пределах ошибки измерения его импульс равен нулю, т.е. перед распадом K^+ -мезон практически остановился.

4. По формуле (1.11), используя приведенное выше значение энергии покоя пиона, определите массу K^+ -мезона в МэВ/с² и в электронных массах m_{0e} .

5. По формуле (1.9) рассчитайте время жизни K^+ -мезона. Результаты расчётов занесите в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Угол вылета пиона	Длина пробега пиона, см	Кинетическая энергия пиона, МэВ	Импульс пиона, МэВ/с	Импульс K^+ -мезона, МэВ/с	Масса K^+ -мезона, МэВ/с ²	Масса K^+ -мезона (m_{0e})	Время жизни K^+ -мезона, с
$\varphi_1 =$	$l_1 =$	$T_1 =$	$p_1 =$				
$\varphi_2 =$	$l_2 =$	$T_2 =$	$p_2 =$	$p =$	$M_{0K} =$	$M_{0K} =$	$\tau_0 =$
$\varphi_3 =$			$p_3 =$				

Контрольные вопросы

1. Какие частицы называются элементарными?
2. Расскажите об истории открытия элементарных частиц.
3. Назовите общие характеристики элементарных частиц.
4. Чем античастицы отличаются от частиц?
5. В чём заключается явление аннигиляции пары «частица – античастица»?
6. При каких условиях рождается пара «частица – античастица»?

7. Какие взаимодействия называются фундаментальными? Охарактеризуйте их.
8. Приведите классификацию элементарных частиц по видам взаимодействий.
9. Какие частицы называются лептонами? Перечислите их дуплетами.
10. Какие частицы называются адронами? Чем отличаются мезоны от барионов?
11. Что такое кварки? Как из кварков строятся мезоны? Барионы?
12. Перечислите и охарактеризуйте частицы-переносчики фундаментальных взаимодействий.
13. Что такое трек элементарной частицы? Почему одни элементарные частицы образуют треки, а другие нет?
14. Какова форма треков частиц, если на них действует магнитное поле?
15. Опишите устройство и принцип работы пузырьковой камеры.
16. Каковы основные условия протекания реакции взаимопревращения элементарных частиц?
17. Каково соотношение между импульсами продуктов реакции, если остановившаяся частица распалась на две частицы?
18. Как по известной кинетической энергии можно определить импульс частицы в релятивистском и нерелятивистском случаях?
19. В чем отличие собственной системы отсчета от лабораторной системы отсчета?
20. Чему равна длина пробега частицы в собственной системе отсчета?
21. В какой системе отсчета время жизни частицы минимально?
22. Какие единицы измерения энергии, импульса и массы используются в ядерной физике?
23. Определите полную энергию (в МэВ) и импульс (в МэВ/с) электрона, ускоренного до кинетической энергии, равной 2,53 МэВ.
24. При какой скорости кинетическая энергия частицы равна её энергии покоя?
25. При какой скорости кинетическая энергия релятивистской частицы с массой покоя m равна $\frac{mc^2}{2}$?
26. Энергия покоя электрона 0,511 МэВ. Найдите кинетическую энергию и импульс электрона, движущегося со скоростью $v = 0,8c$.

Лабораторная работа № 2 ИЗУЧЕНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы – количественное исследование броуновского движения.

Приборы и принадлежности: набор фотографий; калька; циркуль-измеритель; миллиметровая линейка.

Теоретическая часть

Одним из важнейших фактов, служащих доказательством молекулярного движения и зависимости его от температуры, является броуновское движение.

Броуновским движением называют хаотическое движение микроскопических частиц твердого вещества в жидкости или газе. Оно было открыто английским ботаником Р. Броуном. Летом 1827 года он проводил исследования пыльцы растений. В частности, Броун интересовался, как пыльца участвует в процессе оплодотворения. Как-то он разглядывал под обычным микроскопом выделенные из клеток пыльцы североамериканского растения *Clarkia pulchella* (кларкии хорошенькой) взвешенные в воде удлинённые цитоплазматические зерна. Неожиданно Броун увидел, что мельчайшие твердые крупинки, которые едва можно было разглядеть в капле воды, непрерывно дрожат и передвигаются с места на место. Он установил, что эти движения не связаны ни с потоками в жидкости, ни с ее постепенным испарением, а присущи самим крупинкам.

Наблюдение Броуна подтвердили другие ученые. Мельчайшие частички вели себя, как живые, причем их движение ускорялось с повышением температуры и с уменьшением размера частиц и явно замедлялось при замене воды более вязкой средой. Это удивительное явление никогда не прекращалось: его можно было наблюдать сколь угодно долго. Поначалу Броун подумал даже, что в поле микроскопа действительно попали живые существа, тем более что пыльца – это мужские половые клетки растений, однако так же вели себя частички из мертвых растений, даже из засушенных за сто лет до этого в гербариях.

Броун честно расписался в собственном бессилии объяснить происхождение этого хаотического движения. К началу XX века большинство ученых уже понимали, что взвешенные в жидкости и нерастворимые в ней мельчайшие частицы твердого вещества движутся под влиянием беспорядочных ударов молекул жидкости. Из-за хаотического теплового движения молекул жидкости эти удары никогда не уравниваются друг друга. В результате скорость броуновской частицы беспорядочно меняется по модулю и направлению, а ее траектория представляет собой сложную ломаную линию (рис. 2.1).



Рис. 2.1

Несмотря на кажущийся полный беспорядок, случайные перемещения броуновских частиц оказалось все же возможным описать математической зависимостью. Впервые строгое объяснение броуновского движения дали в 1905 году польский физик Марианн Смолуховский и Альберт Эйнштейн, который впервые осознал, что это таинственное, на первый взгляд, явление служит наилучшим экспериментальным подтверждением правоты атомной теории строения вещества. Он объяснил его примерно так: взвешенная в воде частица твердого вещества подвергается постоянной «бомбардировке» со стороны хаотично движущихся молекул воды. В среднем, молекулы воздействуют на нее со всех сторон с равной интенсивностью и через равные промежутки времени. Однако, как бы ни мала была частица, в силу чисто случайных отклонений сначала она получает импульс от молекулы, ударившей её с одной стороны, затем – от молекулы, ударившей её с другой и т.д. В результате усреднения таких соударений получается, что в какой-то момент частица «дергается» в одну сторону, затем, если с другой стороны ее «толкнуло» больше молекул – в другую и т.д. Используя законы математической статистики и молекулярно-кинетической теории газов, Эйнштейн и, независимо от него, М. Смолуховский получили уравнение движения броуновской частицы (описывающее зависимость среднеквадратичного смещения броуновской частицы от макроскопических показателей).

Пусть \vec{F} – равнодействующая сила, обусловленная неполной компенсацией ударов молекул жидкости о броуновскую частицу.

Кроме этой силы на частицу действует сила Стокса, вызванная вязкостью жидкости и направленная против силы \vec{F} .

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta a v,$$

где a – радиус частицы; η – динамическая вязкость жидкости; v – скорость частицы.

Уравнение движения частицы (второй закон Ньютона) имеет вид

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + 6\pi\eta a \mathbf{v} = \vec{F}, \quad (2.1)$$

где m – масса частицы; \vec{r} – радиус-вектор частицы, соединяющий начало координат с точкой пространства, в которой находится частица).

Обозначим произведение $6\pi\eta a$ буквой μ , а скорость частицы выразим по формуле $\mathbf{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. Тогда уравнение (2.1) приобретает вид

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + \mu \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F}.$$

Спроектируем это уравнение на ось X . Так как проекция радиус-вектора \vec{r} на эту ось есть координата x частицы, то

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} = F_x, \quad (2.2)$$

где F_x – проекция вектора \vec{F} на ось X .

Так как все направления движения частицы равновероятны $\langle x \rangle = 0$, то будем определять $\langle x^2 \rangle$. Для этого умножим обе части уравнения (2.2) на x

$$mx \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu x \frac{dx}{dt} = x F_x.$$

Выполним некоторые преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(x^2) &= 2x \frac{dx}{dt}; \\ \frac{d^2}{dt^2}(x^2) &= \frac{d}{dt}\left(2x \frac{dx}{dt}\right) = 2 \left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + x \frac{d^2 x}{dt^2} \right] \\ x \frac{d^2 x}{dt^2} &= \left[\frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2}(x^2) - \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \right]. \\ \frac{m}{2} \frac{d^2}{dt^2}(x^2) - m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 &= F_x x - 3\pi\eta a \frac{d}{dt}(x^2). \end{aligned}$$

Это равенство справедливо для любой частицы и поэтому оно справедливо и для средних значений входящих в него величин, если усреднение вести по достаточно большому числу частиц. Поэтому можно написать

$$\frac{m}{2} \frac{d^2}{dt^2} \langle x^2 \rangle - m \langle v_x^2 \rangle = \langle F_x x \rangle - 3\pi\eta a \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle.$$

Так как x и v_x не зависят друг от друга, можно записать

$$\langle F_x x \rangle = \langle F_x \rangle \langle x \rangle = 0;$$

$$m \frac{\langle v_x^2 \rangle}{2} = \frac{1}{2} kT;$$

$$\frac{m}{2} \frac{d^2}{dt^2} \langle x^2 \rangle - kT = -3\pi\eta a \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle.$$

Произведем замену

$$z = \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle.$$

Тогда

$$\frac{m}{2} \frac{dz}{dt} - kT = -3\pi\eta a z.$$

Полученное дифференциальное уравнение обыкновенное линейное неоднородное. Из математики известно, что его решение является суммой общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного.

Умножим обе части уравнения на величину $\frac{2}{m}$, тогда

$$\frac{dz}{dt} + \frac{6\pi\eta a}{m} z = \frac{2kT}{m};$$

$$z = C e^{-\frac{6\pi\eta a}{m} t} + \frac{kT}{3\pi\eta a};$$

$$z|_{t=0} = 0;$$

$$C = -\frac{kT}{3\pi\eta a};$$

$$z = -\frac{kT}{3\pi\eta a} e^{-\frac{6\pi\eta a}{m} t} + \frac{kT}{3\pi\eta a} = \frac{kT}{3\pi\eta a} \left(1 - e^{-\frac{6\pi\eta a}{m} t} \right).$$

Слагаемое в скобках весьма мало, следовательно им можно пренебречь. Тогда выражение примет вид

$$z = \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = \frac{kT}{3\pi\eta a}, \text{ откуда } \langle x^2 \rangle = \frac{kTt}{3\pi\eta a}. \quad (2.3)$$

Среднее значение квадрата смещения броуновской частицы за время t вдоль оси X или любой другой оси пропорционально этому промежутку времени. Формула (2.3) получила название формула Эйнштейна – Смолуховского. В ней x означает смещение частицы только в одном избранном

направлении (принятом нами за направление оси X), то есть x есть проекция полного смещения \vec{r} на это направление. Очевидно, что

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Усредняя и принимая во внимание, что $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle$, получим

$$\langle r^2 \rangle = 3\langle x^2 \rangle.$$

Поэтому формулу (2.3) можно записать в виде

$$\langle r^2 \rangle = \frac{kTt}{\pi\eta a}.$$

В 1908 г. французский физик Жан Батист Перрен начал количественные наблюдения за движением броуновских частиц под микроскопом. Крошечные шарики почти сферической формы и примерно одинакового размера Перрен получал из гуммигута. Он отмечал и потом зарисовывал (в сильно увеличенном масштабе) на разграфленном листе бумаги положение частиц через равные интервалы времени, например через каждые 30 с (рис. 2.2). Соединяя полученные точки прямыми, он получал замысловатые траектории. Такое хаотичное, беспорядочное движение частиц приводит к тому, что перемещаются они в пространстве довольно медленно: сумма отрезков намного больше перемещения частицы от первой точки до последней. Результаты, полученные Перреном, подтвердили теоретические выводы Эйнштейна.

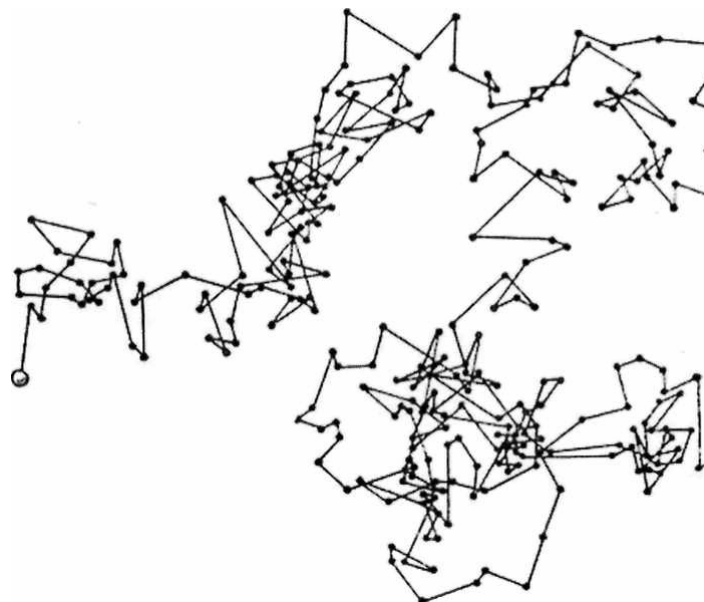


Рис. 2.2

Данное уравнение имеет историческую ценность, потому что на нем основан один из первых способов определения постоянной Больцмана.

В настоящей работе исследуется движение частицы на плоскости, поэтому не учитывается одна из координат частицы.

Порядок выполнения работы

Для количественного исследования броуновского движения необходимо проследить за смещениями броуновской частицы, которая зафиксирована на фотографиях (см. прил. 3).

1. Изучите набор фотографий в порядке возрастания номера фотографии.
2. Возьмите фотографию №1. Отметьте на кальке положение броуновской частицы (красная точка). Присвойте этой точке номер 1.

3. Аналогичную операцию проведите со всеми фотографиями в порядке следования. Пример возможной траектории броуновской частицы изображен на рис. 2.3.

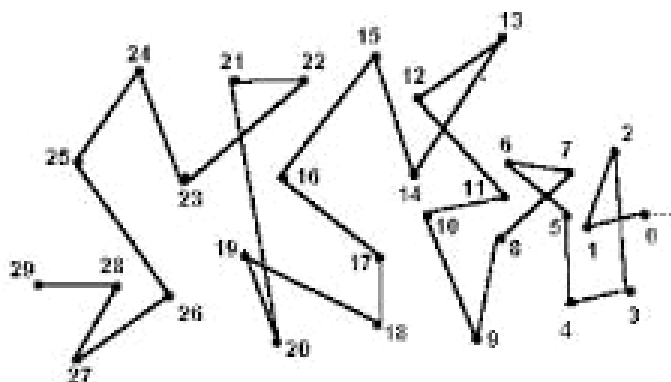


Рис. 2.3

4. Измерьте каждый отрезок между двумя последовательно изображенными точками на рисунке с помощью циркуля-измерителя и миллиметровой линейки. Результаты измерений занесите в таблицу экспериментальных данных (табл. 2.1). Здесь обозначение S_{i-j} соответствует расстоянию между двумя точками с номерами i и j .

Таблица 2.1

Таблица экспериментальных данных

t, c	S, cm									
2	S_{1-2}	S_{2-3}	S_{3-4}	S_{4-5}	S_{5-6}	S_{6-7}	S_{7-8}	S_{8-9}	S_{9-10}	S_{10-11}
4	S_{1-3}	S_{2-4}	S_{3-5}	S_{4-6}	S_{5-7}	S_{6-8}	S_{7-9}	S_{8-10}	S_{9-11}	
6	S_{1-4}	S_{2-5}	S_{3-6}	S_{4-7}	S_{5-8}	S_{6-9}	S_{7-10}	S_{8-11}		
8	S_{1-5}	S_{2-6}	S_{3-7}	S_{4-8}	S_{5-9}	S_{6-10}	S_{7-11}			
10	S_{1-6}	S_{2-7}	S_{3-8}	S_{4-9}	S_{5-10}	S_{6-11}				
12	S_{1-7}	S_{2-8}	S_{3-9}	S_{4-10}	S_{5-11}					

5. Произведите расчеты по приведенным ниже формулам и постройте график зависимости $\langle S^2 \rangle(t)$.

Физическая интерпретация результатов измерения состоит в расчете следующих величин:

Для момента времени $t = 2$ с расстояние, пройденное броуновской частицей, определится из формулы

$$\langle S_1^2 \rangle = \frac{1}{10} (S_{1-2}^2 + S_{2-3}^2 + S_{3-4}^2 + S_{4-5}^2 + S_{5-6}^2 + S_{6-7}^2 + S_{7-8}^2 + S_{8-9}^2 + S_{9-10}^2 + S_{10-11}^2).$$

Для момента времени $t = 4$ с – из формулы

$$\langle S_2^2 \rangle = \frac{1}{9} (S_{1-3}^2 + S_{2-4}^2 + S_{3-5}^2 + S_{4-6}^2 + S_{5-7}^2 + S_{6-8}^2 + S_{7-9}^2 + S_{8-10}^2 + S_{9-11}^2).$$

Для момента времени $t = 6$ с – из формулы

$$\langle S_3^2 \rangle = \frac{1}{8} (S_{1-4}^2 + S_{2-5}^2 + S_{3-6}^2 + S_{4-7}^2 + S_{5-8}^2 + S_{6-9}^2 + S_{7-10}^2 + S_{8-11}^2).$$

Для момента времени $t = 8$ с – из формулы

$$\langle S_4^2 \rangle = \frac{1}{7} (S_{1-5}^2 + S_{2-6}^2 + S_{3-7}^2 + S_{4-8}^2 + S_{5-9}^2 + S_{6-10}^2 + S_{7-11}^2).$$

Для момента времени $t = 10$ с – из формулы

$$\langle S_5^2 \rangle = \frac{1}{6} (S_{1-6}^2 + S_{2-7}^2 + S_{3-8}^2 + S_{4-9}^2 + S_{5-10}^2 + S_{6-11}^2).$$

Для момента времени $t = 12$ с – из формулы

$$\langle S_6^2 \rangle = \frac{1}{5} (S_{1-7}^2 + S_{2-8}^2 + S_{3-9}^2 + S_{4-10}^2 + S_{5-11}^2).$$

Для момента времени 14с – из формулы

$$\langle S_7^2 \rangle = \frac{1}{4} (S_{1-8}^2 + S_{2-9}^2 + S_{3-10}^2 + S_{4-11}^2).$$

Контрольные вопросы

1. Что такое броуновское движение и каковы его количественные характеристики?
2. Приведите вывод закона Эйнштейна – Смолуховского.
3. В чем состоит методика получения графического представления траектории броуновской частицы?

Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

Цель работы – изучение процессов в идеальных газах и определение универсальной газовой постоянной R .

Приборы и принадлежности: установка ФПТ1-12, лабораторный термометр.

Теоретическая часть

Для объяснения свойств вещества в газообразном состоянии используют модель идеального газа, предложенную в 1847 г. английским физиком Джоном Герепатом.

Идеальным принято считать газ, если:

- а) потенциальная энергия взаимодействия его молекул пренебрежимо мала по сравнению с кинетической энергией их хаотического движения;
- б) удары молекул о стенки сосуда являются абсолютно упругими;
- в) собственный объем молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ;
- г) тепловое равновесие по всему объему достигается мгновенно.

Условия, необходимые для того, чтобы реальный газ обрел свойства идеального, осуществляются при соответствующем разрежении реального газа. Некоторые газы даже при комнатной температуре и атмосферном давлении слабо отличаются от идеальных.

Основными параметрами идеального газа являются давление, объем и температура. Уравнение, устанавливающее связь между параметрами идеального газа было получено в середине XIX в. французским физиком Б. Клапейроном. В форме

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (3.1)$$

оно было впервые записано Д.И. Менделеевым. Поэтому уравнение (3.1) состояния идеального газа называют уравнением Клапейрона – Менделеева.

В уравнении (3.1) p – давление газа; V – объем; m – масса; M – молярная масса (масса одного моль газа); T – термодинамическая температура; R – универсальная газовая постоянная.

Физический смысл универсальной газовой постоянной в том, что она показывает, какую работу совершает 1 моль идеального газа при изобарном расширении и изменении температуры на 1 К ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)).

Переход газа из одного состояния в другое называют *процессом*.

Процессы, при которых масса газа и один из его параметров остаются постоянными, называются *изопроцессами*. К ним относятся:

1. Изотермический процесс – это квазистатический процесс, происходящий в газе при постоянной температуре ($T = \text{const}$).

Из уравнения (3.1) следует, что при постоянной температуре и неизменной массе произведение давления p газа на его объем V остается величиной постоянной.

$$pV = \text{const} . \quad (3.2)$$

Уравнение изотермического процесса было получено из эксперимента английским физиком Р. Бойлем (1662 г.) и, независимо от него, французским физиком Э. Мариоттом (1676 г.). Поэтому уравнение (3.2) называют законом Бойля – Мариотта.

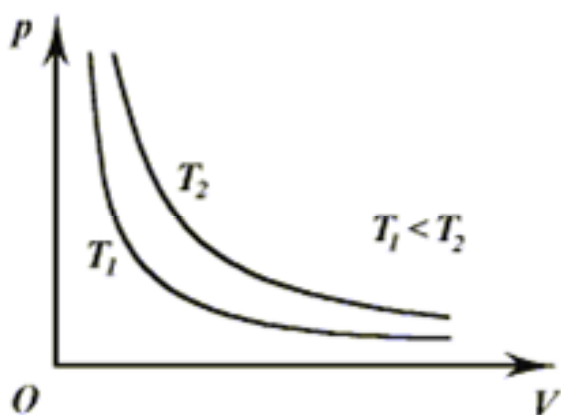


Рис. 3.1

На диаграмме (p, V) изотермические процессы изображают при различных значениях температур семейством гипербол $p \sim \frac{1}{V}$, которые называются изотермами. Так как коэффициент пропорциональности в этом соотношении увеличивается с ростом температуры, то изотермы, соответствующие более высоким значениям температуры, располагаются на графике выше изотерм, соответствующих меньшим значениям температуры (рис. 3.1).

2. Изобарный процесс – это квазистатический процесс, происходящий при постоянном давлении ($p = \text{const}$).

Для данной массы газа уравнение изобарного процесса имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const} . \quad (3.3)$$

Зависимость объема газа от температуры при неизменном давлении была экспериментально исследована французским физиком Ж. Гей-Люссаком (1862 г.). Поэтому уравнение (3.3) называют законом Гей-Люссака.

На диаграмме (V, T) изобарные процессы при разных значениях давления изображаются семейством прямых линий (рис. 3.2), которые называются изобарами.

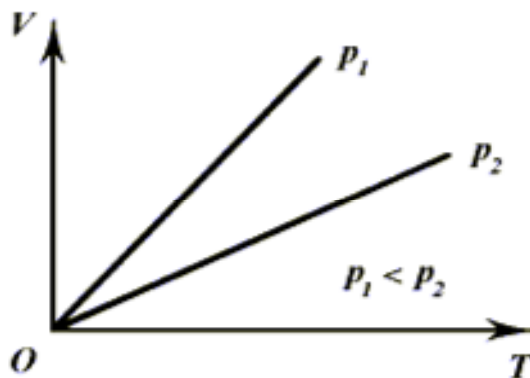


Рис. 3.2

3. **Изохорный процесс** – это процесс квазистатического нагревания или охлаждения газа данной массы газа при постоянном объеме ($V = \text{const}$).

Как следует из уравнения (3.1) состояния идеального газа, при этих условиях давление газа p изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре: $p \sim T$ или

$$\frac{p}{T} = \text{const} . \quad (3.4)$$

Экспериментально зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Ж. Шарль (1787 г.). Поэтому уравнение изохорного процесса (3.4) называют законом Шарля.

На диаграмме (p, T) изохорные процессы для заданной массы газа при различных значениях объема изображают семейством прямых линий, которые называются изохорами. Большим значениям объема соответствуют изохоры с меньшим наклоном к оси температур (рис. 3.3).

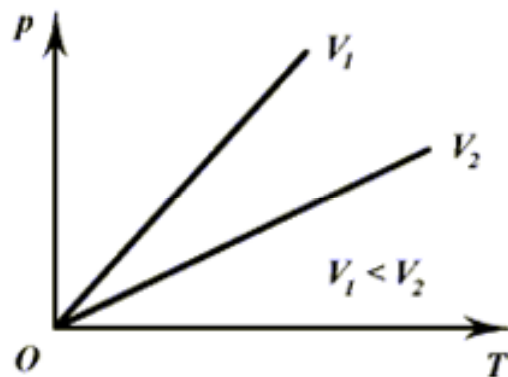


Рис. 3.3

Описание метода измерений

Эксперимент проводится с реальным газом – воздухом, представляющим собой смесь нескольких газов, основными компонентами которой являются азот (~78 %) и кислород (~21 %). Реальные газы близки к идеальному газу, если они разрежены и нагреты. Это выполняется, например, при нормальных условиях ($T = 273,15 \text{ К}$, $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

Метод экспериментального определения универсальной газовой постоянной, используемый в данной работе, заключается в следующем.

Предположим, что в сосуде известного объема V находится воздух при атмосферном давлении p_a и комнатной температуре T . Масса воздуха, заключенного в сосуде, равна m_1 . Поскольку в этих условиях воздух можно считать идеальным газом, то его состояние можно описать уравнением

$$p_a V = \frac{m_1}{M} RT . \quad (3.5)$$

Если теперь путем частичной откачки уменьшить давление воздуха в сосуде до нового значения p при той же комнатной температуре

T , то его масса уменьшится до значения m_2 . Для этого нового состояния газа, заключенного в сосуде, также справедливо уравнение Клапейрона – Менделеева

$$pV = \frac{m_2}{M} RT, \quad (3.6)$$

где M – молярная масса воздуха ($M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль).

Вычтем из формулы (3.5) уравнение (3.6):

$$(p_a - p)V = \frac{(m_1 - m_2)}{M} RT. \quad (3.7)$$

Из уравнения (3.7) получим формулу для определения универсальной газовой постоянной

$$R = \frac{(p_a - p)VM}{(m_1 - m_2)T}. \quad (3.8)$$

Лабораторная установка

Для определения универсальной газовой постоянной предназначена экспериментальная установка ФПТ1-12, общий вид которой приведен на рис. 3.4.

Установка состоит из стеклянной колбы 1, снабженной вакуумным краном 2 и установленной на электронных весах 3. Гибкие шланги 4 соединяют колбу, манометр 6 и насос 7. Манометр и насос закреплены на жестком основании 8. На жестком основании указан объем колбы.

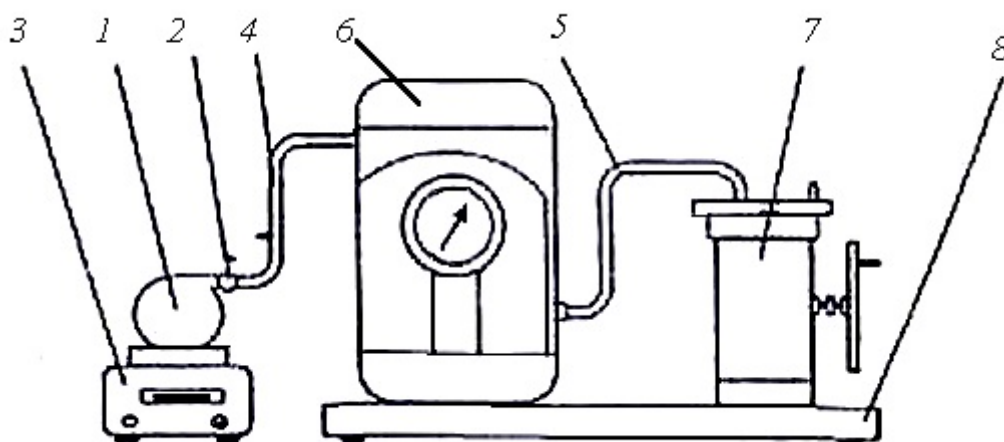


Рис. 3.4

Порядок выполнения работы

1. Измерьте атмосферное давление (барометром) и температуру в лаборатории в градусах Цельсия с помощью настенного термометра. Переведите температуру в Кельвины по формуле $T(K) = t^{\circ}\text{C} + 273 \text{ K}$. Внесите значения молярной массы воздуха M , объема колбы V и температуры T в табл. 3.1.

2. Отсоедините от колбы гибкий шланг, откройте на атмосферу вакуумный шланг, взвесьте колбу с воздухом и полученное значение m_1 занесите в табл. 3.1.

3. При открытом вакуумном кране присоедините к колбе гибкий шланг 4. Стрелка манометра при этом должна показывать нулевое избыточное давление.

4. Приведите в действие насос, вращая маховое колесо против часовой стрелки. Откачайте насосом воздух из колбы до тех пор, пока стрелка манометра не установится вблизи отрицательного избыточного давления Δp , равного $-0,7 \text{ кгс/см}^2$.

5. Снимите показание манометра. Перекройте вакуумный кран и только после этого остановите насос. Переведите значение Δp в Паскали, используя соотношение $1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ и внесите его в табл. 3.1.

6. Отсоедините от колбы гибкий шланг 4 и взвесьте колбу после откачки воздуха. Значение m_2 занесите в табл. 3.1.

7. По формуле (3.8) вычислите величину универсальной газовой постоянной $R_{\text{эксп}}$ и внесите её в табл. 3.1.

8. Повторите пп. 2–7 при немного отличающихся значениях избыточного давления Δp с тем, чтобы получить три значения $R_{\text{эксп}}$. Рассчитайте среднее значение универсальной газовой постоянной $\langle R_{\text{эксп}} \rangle$ и внесите его в табл. 3.1.

9. Вычислите относительную погрешность δR измерения универсальной газовой постоянной, воспользовавшись формулой

$$\delta R = \frac{|R_{\text{табл}} - \langle R_{\text{эксп}} \rangle|}{R_{\text{табл}}} \cdot 100 \%, \quad (3.9)$$

где $R_{\text{табл}} = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Внесите величину погрешности в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Номер опыта	M , кг/моль	V , м ³	T , К	m_1 , кг	m_2 , кг	Δp , Па	$R_{\text{эксп}}$, Дж/(моль·К)	$\langle R_{\text{эксп}} \rangle$, Дж/(моль·К)	δR , %

Контрольные вопросы

1. Опишите модель идеального газа.
2. Запишите уравнение состояния идеального газа.
3. Какой физический смысл имеет универсальная газовая постоянная и чему она равна?
4. Как связана универсальная газовая постоянная с другими константами?
5. Какие значения параметров газа называются нормальными условиями? Какой объем занимает один моль любого газа при этих условиях?
6. Опишите метод определения универсальной газовой постоянной, используемый в данной работе.
7. Как объясняется уменьшение давления в колбе при откачивании из нее воздуха с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
8. Из-за неисправности вентиля из баллона вытекает газ. Как изменится масса газа в баллоне при уменьшении давления в баллоне вдвое? Температура газа не изменяется.
9. Как изменится плотность идеального газа, если при неизменной температуре его давление увеличится на 1 %?
10. Какой процесс в идеальном газе называется изотермическим? Сформулируйте закон Бойля – Мариотта.
11. Какой процесс в идеальном газе называется изобарным? Сформулируйте закон Гей-Люссака.
12. Какой процесс в идеальном газе называется изохорным? Сформулируйте закон Шарля.

Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

Цель работы – исследование фазового перехода первого рода на примере плавления и кристаллизации олова. Определение температуры, удельной теплоты плавления олова и изменение энтропии при плавлении.

Приборы и приспособления: экспериментальная установка; IBM PC-совместимый персональный компьютер (ПК), дискета с программой LABTD11.EXE.

Теоретическая часть

1. Энтропия и её вероятностный смысл

В 1865 г. немецким физиком Робертом Клаузиусом было установлено, что в обратимых процессах сохраняется некоторая физическая величина S . Клаузиус назвал её энтропией.

Энтропия – это однозначная функция состояния системы, полный дифференциал dS которой равен приведённому количеству теплоты $\frac{\delta Q}{T}$

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (4.1)$$

где δQ – малое количество теплоты, сообщённой системе или отведённой от неё при малом изменении её состояния; T – температура системы, находящейся в контакте и тепловом равновесии с теплоотдатчиком или теплоприёмником.

Таким образом, Клаузиус определил изменение энтропии термодинамической системы при обратимом процессе как тепло, переданное системе, при постоянной температуре:

Например, при температуре 0°C вода может находиться в жидком состоянии и при незначительном внешнем воздействии начинает быстро превращаться в лёд, выделяя некоторое количество теплоты. При этом температура вещества так и остается 0°C . Изменяется состояние вещества, сопровождающееся выделением тепла вследствие изменения структуры. Энтропия – это количественная мера той теплоты, которая не переходит в работу.

Согласно определению, энтропия является функцией состояния, то есть не зависит от способа достижения этого состояния, а определяется параметрами данного состояния.

Поскольку энтропия является функцией состояния, то в левой части равенства (4.1) стоит её полный дифференциал. Напротив, количество

теплоты является функцией процесса, в котором эта теплота была передана, поэтому δQ не является полным дифференциалом.

Изменение энтропии системы ΔS при переходе её из состояния 1 в состояние 2 определяется только разностью значений S_1 и S_2 :

$$\Delta S = S_2 - S_1,$$

где S_1 – энтропия системы в состоянии 1; S_2 – энтропия системы в состоянии 2.

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}.$$

В любом обратимом тепловом процессе

$$\Delta S = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (4.2)$$

В термодинамике доказывается, что энтропия системы, совершающей необратимый процесс, возрастает:

$$\Delta S > 0. \quad (4.3)$$

Выражения (4.2) и (4.3) относятся только к **замкнутым системам**. Если же система не замкнута (обменивается теплотой с внешней средой), то ее энтропия может вести себя любым образом.

Соотношения (4.2) и (4.3) можно представить в виде неравенства Клаузиуса

$$\Delta S \geq 0, \quad (4.4)$$

т.е. энтропия замкнутой системы может либо возрасть (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае обратимых процессов).

Таким образом, понятие энтропии позволяет, в случае изолированных систем, отличать обратимые процессы от необратимых.

Более глубоко смысл энтропии вскрывается в статистической физике, где энтропия связывается с термодинамической вероятностью состояния системы.

Термодинамическая вероятность W состояния системы – это число способов, которыми может быть реализовано данное состояние макроскопической системы, или число микросостояний, осуществляющих данное макросостояние.

Согласно определению $W \geq 1$, т. е. термодинамическая вероятность не есть вероятность в математическом смысле (последняя меньше, либо равна 1).

В 1877 году австрийский физик Людвиг Больцман установил связь энтропии S с термодинамической вероятностью состояния системы. Фор-

мулу, выражающую эту связь, записал (и назвал формулой Больцмана) немецкий физик Макс Планк:

$$S = k \ln W ,$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$).

Согласно формуле Больцмана *энтропия данной системы, находящейся в определенном состоянии, пропорциональна натуральному логарифму термодинамической вероятности этого состояния.*

Следовательно, энтропия может рассматриваться как мера вероятности состояния термодинамической системы.

Известно, что материальная система, предоставленная самой себе, самопроизвольно переходит в состояние равновесия. Это состояние системы является наиболее вероятным. Следовательно, в предоставленной самой себе (изолированной) материальной системе (в которой отсутствует обмен энергией с окружающей средой) протекают только такие процессы, в которых энтропия увеличивается. *В состоянии равновесия энтропия системы максимальна.*

Однако при удалении системы от исходного состояния к равновесию, первоначальный порядок в ней нарушается и заменяется беспорядком. Чем дальше система от исходного состояния, тем больше беспорядка в ней.

Формула Больцмана позволяет дать энтропии следующее статистическое толкование: *энтропия является мерой беспорядка («хаоса») в системе.*

Так как реальные процессы необратимы (самопроизвольно система из состояния равновесия выйти не может), то можно утверждать, что все процессы в замкнутой системе ведут к увеличению её энтропии – **принцип возрастания энтропии.**

Отметим, однако, что эти утверждения имеют место для систем, состоящих из очень большого числа частиц, но могут нарушаться в системах с малым числом частиц. Для «малых» систем могут наблюдаться флуктуации, т.е. энтропия и термодинамическая вероятность состояний замкнутой системы на определенном отрезке времени могут убывать, а не возрастать, или оставаться постоянными.

2. Плавление и кристаллизация твердого тела

Переход кристаллического твердого тела в жидкое (*плавление*) и обратно (*кристаллизация*) относятся к фазовым превращениям первого рода, при которых скачком изменяются плотность, внутренняя энергия, энтропия тела. При этом поглощается (при плавлении) или выделяется (при кристаллизации) энергия, называемая теплотой плавления (кристаллизации). Если давление не меняется, то температура тела во время фазового перехода остается постоянной.

На рис. 4.1 изображена примерная диаграмма плавления: на горизонтальной откладывается время, на вертикальной – температура олова.

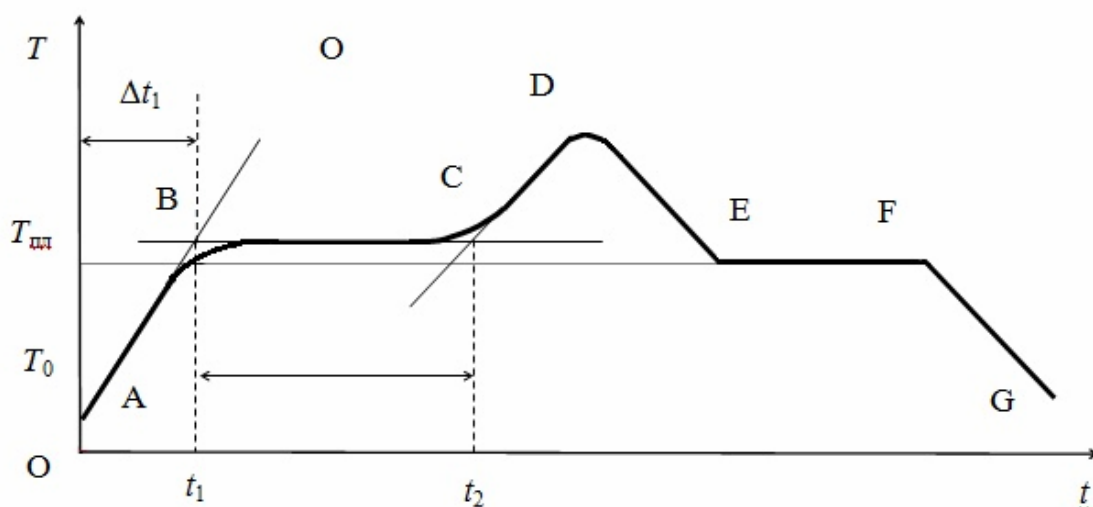


Рис. 4.1

При нагревании твердого тела внутренняя энергия возрастает, увеличивается амплитуда колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Это приводит к повышению температуры (линия *AB*).

Когда температура возрастает до точки плавления $T_{\text{пл}}$, амплитуда колебаний достигает такой величины, что начинается разрушение кристаллической решетки – твердое тело начинает плавиться. Процесс плавления происходит изотермически, т.е. при постоянной температуре (горизонтальная прямая *BC*), и характеризуется удельной теплотой плавления, которая определяется *количеством теплоты, необходимым для расплавления единицы массы вещества*

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (4.5)$$

Во время плавления сохраняется двухфазное состояние (твердое и жидкое), но плавно меняется соотношение масс каждой из фаз. Когда закончится процесс плавления, остается жидкая фаза и температура жидкости начинает повышаться (кривая *CD*).

Если прекратить нагрев жидкости (точка *D*) и начать ее охлаждать, то кривая *DE* пойдет вниз. Когда температура понизится до $T_{\text{пл}}$ (см. рис. 4.1), начинается процесс кристаллизации. Качественно процесс кристаллизации, как и процесс плавления, можно объяснить изменением характера теплового движения частиц вещества. Под влиянием сил взаимного притяжения между частицами их движение при охлаждении вещества в конце концов превращается в хаотические тепловые колебания около некоторых неизменных средних положений – узлов кристаллической решетки. Процесс

кристаллизации (линия EF) происходит при постоянной температуре, равной температуре плавления, и связан с выделением теплоты кристаллизации, равной теплоте плавления. Когда процесс кристаллизации закончится, прекратится выделение теплоты кристаллизации, начинается охлаждение твердого тела (кривая FG).

Процессы плавления и кристаллизации сопровождаются изменением энтропии вещества.

Так же, как и внутренняя энергия, энтропия является функцией состояния термодинамической системы. Если термодинамическая система получает в обратимом процессе количество теплоты δQ при температуре T , то отношение $\delta Q/T$ определяет изменение энтропии dS системы, т.е.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (4.6)$$

и для обратимого процесса является полным дифференциалом. На практике обычно интересуются только изменением энтропии, а не ее абсолютным значением.

Изменение энтропии системы можно найти, используя второе начало термодинамики

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (4.7)$$

где интеграл берется по пути термодинамического процесса между состояниями 1 и 2; S_1 и S_2 – значения энтропии в этих состояниях. Знак равенства соответствует обратимому процессу, а знак неравенства – необратимому.

Второе начало термодинамики (4.7) утверждает, что при обратимом процессе изменение энтропии системы равно интегралу от $\frac{\delta Q}{T}$ между состояниями 1 и 2 по обратимому пути и больше этого интеграла по пути необратимому, т.е. в этом случае интеграл от $\frac{\delta Q}{T}$ не выражает изменение энтропии, а меньше его.

Подсчитаем изменение энтропии при необратимом процессе плавления твердого тела. Процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое состоит из двух этапов.

1. Нагревание твердого тела от начальной температуры T_0 до температуры плавления $T_{пл}$. При этом

$$\delta Q_1 = cmdT ; \quad Q_1 = \int_{T_0}^{T_{пл}} cmdT. \quad (4.8)$$

Изменение энтропии на этом этапе

$$\Delta S_1 = \int_{T_0}^{T_{\text{пл}}} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_{\text{пл}}}{T_0}. \quad (4.9)$$

2. Плавление тела. Температура плавления остается постоянной ($T_{\text{пл}} = \text{const}$). Количество теплоты, необходимое для плавления:

$$Q_2 = \lambda m. \quad (4.10)$$

Изменение энтропии системы при этом изотермическом процессе

$$\Delta S_2 = \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}. \quad (4.11)$$

Поскольку энтропия – величина аддитивная, то полное изменение энтропии системы в процессе плавления

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{T_{\text{пл}}}{T_0} + \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}. \quad (4.12)$$

Энтропия характеризует степень беспорядочности теплового движения частиц в системе. Олово, как известно, имеет кристаллическую структуру и характеризуется упорядоченным пространственным расположением частиц на большом расстоянии, т.е. в расположении атомов олова реализуется дальний порядок. Процесс плавления представляет собой переход вещества в менее упорядоченное состояние – жидкое. По второму закону термодинамики такой переход должен сопровождаться возрастанием энтропии вещества.

Методика эксперимента

В ходе выполнения лабораторной работы изучаются процессы нагрева твердого олова, его плавления, нагревания и охлаждения жидкого олова, его кристаллизация и охлаждение твердого тела. Для первых двух процессов определяется изменение энтропии, а для пятого – температура плавления олова. Для определения изменения энтропии необходимо опытным путем найти значение удельной теплоемкости в процессе нагрева твердого олова и значение удельной теплоты плавления – в процессе его плавления.

Характеристики исследуемого образца приведены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Материал	Масса m , кг	Температура плавления $T_{\text{пл}}^T$, К	Удельная теплоемкость c_T , Дж/кг·К	Удельная теплота плавления λ_T , кДж/кг
Олово	0,150	505	230	59

Методика эксперимента заключается в получении зависимости температуры исследуемого образца от времени и построении графика этой зависимости; в расчетном определении теплофизических характеристик материала – удельной теплоемкости и удельной теплоты плавления. По графику зависимости температуры от времени определяются время нагрева $t_1 = \Delta t_1$ образца до температуры плавления, время плавления Δt_2 и температура плавления $T_{\text{пл}}$. С целью повышения точности температуру плавления определяем на этапе кристаллизации, так как эта температура стабильна в течение всего времени процесса.

Получив время нагрева, подсчитаем количество теплоты, выделившейся в нагревателе на первом этапе:

$$Q_3 = UI t_1, \quad (4.13)$$

где U – напряжение, подаваемое на нагреватель; I – сила тока в нагревателе.

Но ввиду неидеальности установки на нагрев олова пойдет лишь часть этого количества теплоты, остальная передается в окружающую среду. Уравнение теплового баланса для первого этапа:

$$Q_1 = \eta Q_3, \quad (4.14)$$

где η – КПД установки ($\eta = 0,33$); Q_1 – количество теплоты, необходимое для нагревания олова от температуры окружающей среды T_0 до температуры плавления $T_{\text{пл}}$.

$$Q_1 = cm(T_{\text{пл}} - T_0). \quad (4.15)$$

Подставив выражения (4.9) и (4.11) в уравнение (4.10), получим

$$cm(T_{\text{пл}} - T_0) = \eta UI t_1. \quad (4.16)$$

Отсюда выразим теплоемкость:

$$c = \frac{\eta UI t_1}{m(T_{\text{пл}} - T_0)}. \quad (4.17)$$

Получив по графику момент начала t_1 и конца t_2 плавления, время плавления можно определить по формуле

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (4.18)$$

Количество теплоты, выделившейся в нагревателе на этом этапе:

$$Q_4 = UI \Delta t_2. \quad (4.19)$$

Вследствие потерь на плавление олова пойдет только часть этого количества теплоты – Q_2 , ее можно определить по формуле (4.16).

Уравнение теплового баланса для второго этапа:

$$Q_2 = \eta Q_4, \quad (4.20)$$

Подставив уравнения (4.6) и (4.15) в уравнение (4.16), получим

$$\lambda m = \eta UI \Delta t_2. \quad (4.21)$$

Выразим удельную теплоту плавления

$$\lambda = \frac{\eta UI \Delta t_2}{m}. \quad (4.22)$$

Получив экспериментальным путем теплофизические характеристики образца, по формуле (4.12) можно подсчитать изменение энтропии.

Экспериментальная установка

Внешний вид установки представлен на рис. 4.2.

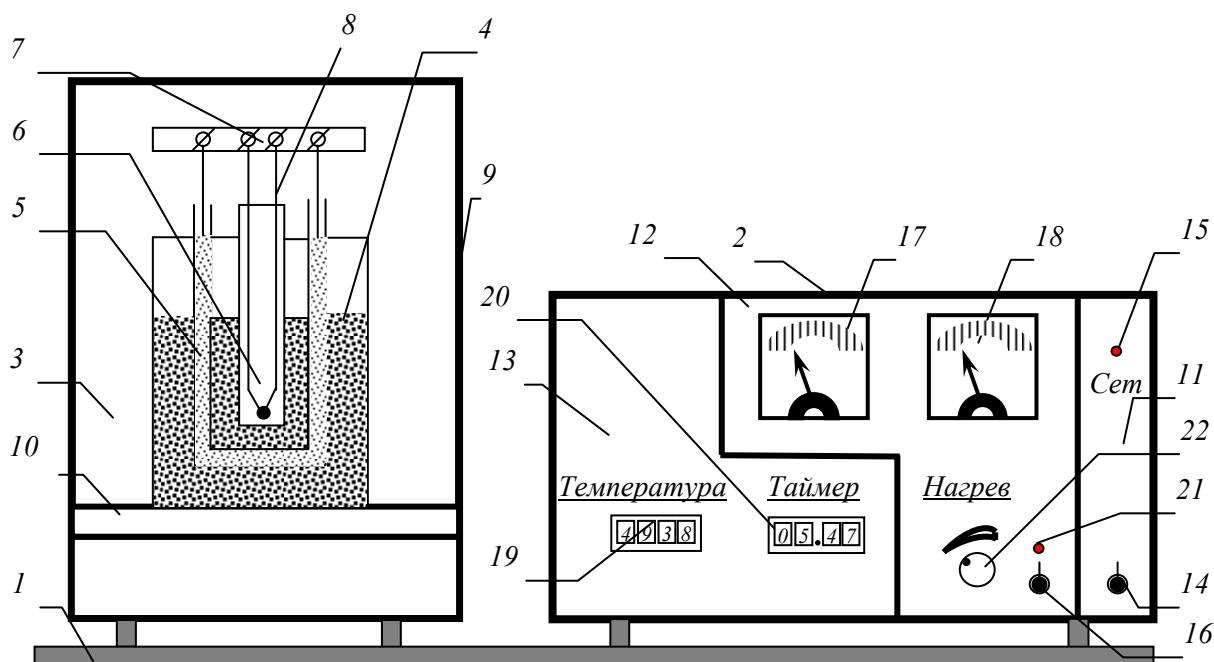


Рис. 4.2. Экспериментальная установка:

- 1 – стойка; 2 – блок приборов; 3 – блок нагрева; 4 – стакан с оловом; 5 – нагреватель; 6 – датчик температуры; 7 – разъем; 8 – электрические кабели; 9 – кожух; 10 – подставка; 11 – блок питания; 12 – блок регулирования; 13 – блок измерителей; 14 – тумблер включения; 15 – индикатор «Сеть»; 16 – тумблер нагревателя; 17 – вольтметр; 18 – амперметр; 19 – термометр; 20 – таймер; 21 – индикатор «Нагрев»; 22 – регулятор

На стойке 1 смонтированы блок приборный 2 и блок нагревательный 3. В блоке нагревательном на подставке 10 установлен стакан с оловом 4, закрытый снаружи слоем теплоизоляции. Внутри стакана 4 размещены: нагреватель 5 в виде электрической спирали, помещенной в стеклянную

трубку, и датчик температуры 6. Нагреватель 5 и датчик температуры 6 электрическими кабелями 8 через разъем 7 подключены к блоку приборному 2. Снаружи блок нагревательный закрыт защитным кожухом 9.

Блок приборный 2 включает в себя блок питания 11, блок регулирования нагрева 12 и блок измерительный 13. Блок питания содержит тумблер включения установки 14 и индикатор *Сеть* 15. Блок регулирования содержит тумблер включения нагревателя 16, индикатор *Нагрев* 21 и регулятор мощности 22. Напряжение, подаваемое на нагреватель, контролируется по вольтметру 17, сила тока в цепи – по амперметру 18. Блок измерительный содержит цифровой термометр 19 и электронный таймер 20. Питание на приборы подается автоматически при включении тумблера *Сеть*. Электронный таймер непрерывно показывает текущее время или время с начала эксперимента.

При включенном нагревателе через него течет постоянный ток и выделяется теплота. Часть теплоты расходуется на нагрев олова, а часть отдается в окружающую среду. КПД установки показывает, какая часть от выделившейся теплоты поглощается оловом. КПД установки для режима нагрева и плавления $\eta = 33 \%$. Олово поглощает часть теплоты, выделяющейся в нагревателе, при этом его температура постоянно растет. Датчик фиксирует температуру олова, а цифровой термометр постоянно показывает ее текущее значение.

При достижении температуры плавления показания термометра практически не меняются, так как плавление олова идет при постоянной температуре. При этом за счет направления передачи теплоты от горячего нагревателя к холодным стенкам и неравномерности температурных полей показания термометра немного превысят температуру плавления. После того, как все олово расплавится, теплота пойдет на нагревание полученной жидкости. При этом температура начнет увеличиваться, цифровой термометр зафиксирует ее рост.

При отключении нагревателя разогретый стакан с оловом отдает теплоту в окружающую среду и остывает, его температура уменьшается. Когда температура достигает температуры плавления, начинается процесс кристаллизации, олово из жидкого состояния переходит в твердое. Процесс идет при постоянной температуре. Эта температура отличается стабильностью в течение длительного времени и считается температурой плавления. После того, как все олово станет твердым, начинается его остывание, термометр также фиксирует этот процесс.

Установка питается от сети переменного тока напряжением 220 В, поэтому при работе с ней необходимо соблюдать меры техники безопасности. В случае отклонения в работе установки следует немедленно выключить тумблер *Сеть*, вынуть шнур питания из сети.

Порядок выполнения работы

1. Включите тумблер *Сеть* на правой панели, при этом загорится светодиод *Сеть*. Автоматически включается термометр, показывающий температуру олова, и таймер.

2. Запишите значение начальной температуры олова в табл. 4.2 и переведите ее в систему СИ по формуле

$$T_0 = t_0 + 273. \quad (4.23)$$

3. Включите тумблер *Нагрев*, при этом загорается светодиод и начинают работать приборы – вольтметр и амперметр.

4. Вращением регулятора установите напряжение 20 В, запишите значения напряжения и тока в табл. 4.2. Отметьте время начала эксперимента.

5. Через каждую минуту в табл. 4.3 записывайте значения температуры олова по термометру.

6. Постоянно контролируйте напряжение питания и при его отклонениях устанавливайте регулятором требуемое значение ($U_{\text{п}} = 20 \text{ В}$).

7. При достижении температуры олова 280°C выключите нагреватель.

8. Продолжайте записывать в табл. 4.3 значения температуры олова.

9. При достижении температуры 180°C выключите установку.

10. На миллиметровке в соответствующем масштабе постройте график зависимости температуры от времени.

11. На линии нагрева и плавления постройте касательные, точка их пересечения дает момент начала плавления олова t_1 (см. рис. 4.1).

12. Проведите касательную к линии нагрева жидкого олова. Точка пересечения ее с линией плавления дает время окончания плавления t_2 .

13. По графику определите время нагрева t_1 олова до температуры плавления и время плавления: $\Delta t_2 = t_2 - t_1$. Данные запишите в табл. 4.2.

14. На линии охлаждения определите температуру кристаллизации (плавления) и запишите ее в табл. 4.2.

15. Сравните полученное значение $T_{\text{пл}}$ с табличной величиной и подсчитайте относительную погрешность ее определения по формуле

$$\delta T = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{пл}}^{\text{т}}}{T_{\text{пл}}^{\text{т}}} \cdot 100 \%. \quad (4.24)$$

16. Подсчитайте значение удельной теплоемкости по формуле (4.17) и относительную погрешность ее определения по формуле

$$\delta c = \frac{c_{\text{T}} - c}{c_{\text{T}}} \cdot 100 \%. \quad (4.25)$$

17. Вычислите значение удельной теплоты плавления по формуле (4.22) и сравните ее с табличной по формуле

$$\delta \lambda = \frac{\lambda_{\text{T}} - \lambda}{\lambda_{\text{T}}} \cdot 100 \%. \quad (4.26)$$

18. Определите изменение энтропии по формуле (4.12). Данные всех расчетов запишите в табл. 4.4.

Результаты эксперимента

Результаты измерений и расчетов внесите в табл. 4.2–4.4.

Таблица 4.2

$T_0, \text{ К}$	$U_{\text{п}}, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$\Delta t_2, \text{ с}$	$T_{\text{пл}}, \text{ К}$

Таблица 4.3

Минуты	$t, \text{ }^\circ\text{С}$	Минуты	$t, \text{ }^\circ\text{С}$	Минуты	$t, \text{ }^\circ\text{С}$	Минуты	$t, \text{ }^\circ\text{С}$	Минуты	$t, \text{ }^\circ\text{С}$
1		11		21		31		41	
2		12		22		32		42	
3		13		23		33		43	
10		20		30		40		50	

Таблица 4.4

$T_{\text{пл}}, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}^T, \text{ К}$	$\delta T, \%$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_T, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\delta c, \%$	$\lambda, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\lambda_T, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\delta \lambda, \%$	$\frac{\Delta S, \text{ Дж}}{\text{К}}$

Контрольные вопросы

1. Какие системы называют гомогенными и гетерогенными? Что называется фазой в термодинамике?
2. Что называется фазовым переходом первого рода, второго рода?
3. Что называется плавлением и кристаллизацией твердых тел?
4. Объясните ход температурной кривой при плавлении и кристаллизации.
5. Что называется удельной теплотой плавления твердого тела? Как она определяется?
6. Что такое энтропия? Как определить изменение энтропии?
7. В чем состоит вероятностный смысл энтропии? Запишите формулу Больцмана.
8. Сформулируйте второе начало термодинамики.
9. Раскройте сущность физического смысла изменения энтропии при плавлении и кристаллизации твердых тел.

Лабораторная работа № 5 ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

Теоретическое введение

Обмен энергией между изучаемой системой и внешней средой описывают законы, которые изучает термодинамика.

Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии): теплота Q , сообщенная системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии ΔU и на совершение работы A против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A. \quad (5.1)$$

Внутренняя энергия системы характеризует общий запас ее энергии, состоящий из кинетической и потенциальной энергий всех частиц системы (молекул, атомов, электронов, протонов и т.д.).

Теплота – это микроскопическая форма передачи энергии от одного тела к другому посредством хаотического движения молекул.

Работа – это макроскопическая форма передачи энергии за счет перемещения масс вещества.

Тепловым эффектом химической реакции называется количество теплоты, выделенной или поглощенной системой в ходе химической реакции (при отсутствии полезной работы и при одинаковой температуре исходных и конечных веществ).

Если совершается только работа расширения газа ($A = p\Delta V$), то уравнение (5.1) принимает вид:

$$Q_p = \Delta U + p\Delta V, \quad (5.2)$$

где Q_p – теплота, подведенная к системе при постоянном давлении ($p = \text{const}$).

Вводя величину $H = U + pV$, которую называют *энтальпией* системы, получим:

$$Q_p = \Delta H, \quad (5.3)$$

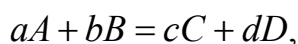
где $\Delta H = \Delta U + p\Delta V$ – изменение энтальпии.

Таким образом, тепловой эффект химической реакции при $p = \text{const}$ равен изменению энтальпии.

Раздел химической термодинамики, изучающий тепловые эффекты, называется термохимией. Все термохимические расчеты и измерения относят к одному моль образующегося вещества.

В основе большинства термохимических расчетов лежит *следствие из закона Гесса*: тепловой эффект химической реакции равен сумме энтальпий образования продуктов реакции за вычетом суммы энтальпий образования исходных веществ (с учетом стехиометрических коэффициентов).

Так, если уравнение реакции имеет вид



то тепловой эффект реакции равен

$$\Delta_r H^0 = (c \cdot \Delta_f H_C^0 + d \cdot \Delta_f H_D^0) - (a \cdot \Delta_f H_A^0 + b \cdot \Delta_f H_B^0), \quad (5.4)$$

где a, b, c, d – стехиометрические коэффициенты; $\Delta_f H^0$ – стандартные теплоты образования веществ.

Теплотой образования химического соединения называют тепловой эффект образования 1 моль какого-либо соединения из простых веществ. Для процессов при $p = \text{const}$ обычно используют стандартные энтальпии образования химических соединений ($\Delta_f H_{298}^0$), которые приводятся в справочниках при стандартной температуре 298,15 К.

Изменение энтальпии в ходе химических реакций не является критерием их самопроизвольного протекания (самопроизвольно могут протекать как экзотермические ($\Delta H < 0$), так и эндотермические процессы ($\Delta H > 0$)).

Критерием, определяющим направление процесса в изолированной системе, является *энтропия* (S). Согласно второму закону термодинамики в изолированных системах самопроизвольно протекают процессы, сопровождающиеся увеличением энтропии ($\Delta S \geq 0$).

В неизолированной системе критерием самопроизвольного протекания процессов является энергия Гиббса $G = H - TS$ (при постоянных давлении и температуре – $p = \text{const}$, $T = \text{const}$) или энергия Гельмгольца $A = U - TS$ (при постоянных объеме и температуре – $V = \text{const}$, $T = \text{const}$). При этом уменьшение данной функции ($\Delta G \leq 0$ или $\Delta A \leq 0$) является критерием самопроизвольности процесса.

Наибольшее значение имеют процессы, происходящие при постоянных давлении и температуре. Изменение энергии Гиббса для химической реакции может быть рассчитано по формуле

$$\Delta_r G_{298}^0 = \Delta_r H_{298}^0 - T \Delta_r S_{298}^0. \quad (5.5)$$

Изменение энтропии $\Delta_r S_{298}^0$ рассчитывается аналогично $\Delta_r H_{298}^0$ (см. формулу (5.4)).

Устройство калориметрической установки

Для большинства физико-химических расчетов необходимо измерять тепловые эффекты процессов растворения, фазовых превращений и химических реакций. Для этого при температурах 20–50 °С широко применяется калориметрический метод. Прибор для измерения количества выде-

ленной (или поглощенной) теплоты – калориметр – состоит из калориметрического стакана 1 (рис. 5.1) вместимостью 400 мл, который сделан по типу сосуда Дьюара, и магнитной мешалки.

Стакан ставят на магнитную мешалку, а внутрь стакана помещают сердечник магнитной мешалки 2. Стакан закрывают пластмассовой крышкой 3, имеющей три отверстия: одно – для небольшой воронки 4, второе – для помещения датчика температуры 5, позволяющего регистрировать температуру с точностью до сотых долей градуса, и третье – для нагревателя 6, имеющего известное сопротивление.

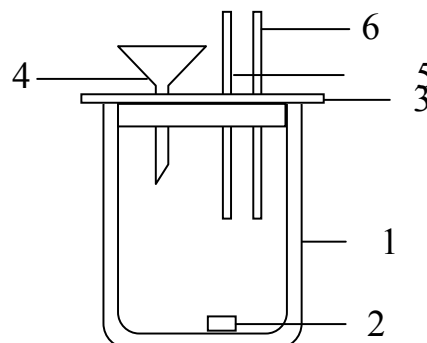
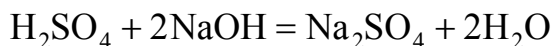


Рис. 5.1

Экспериментальная часть

Опыт 1. Определение теплоты нейтрализации сильной кислоты сильным основанием

Для определения теплового эффекта химической реакции



используют калориметрическую установку (см. рис.5.1).

Взвесьте сухой калориметрический стакан на технических весах, запишите его массу $m_{\text{СТ}}$.

Отмерьте цилиндром определенный (80 или 100 см^3) объем раствора гидроксида натрия с молярной концентрацией 1 моль/л. Вылейте раствор в калориметрический стакан и, перемешивая с помощью магнитной мешалки, определите начальную температуру раствора $t_{\text{н}}$. Затем добавьте такой же объем кислоты с молярной концентрацией $0,5$ моль/л, закройте стакан крышкой, перемешайте раствор магнитной мешалкой и запишите максимальную (конечную) температуру $t_{\text{к}}$.

Используя полученные данные, рассчитайте следующие параметры:

1) Разницу температур $\Delta T(K)$ по формуле

$$\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$$

2) Суммарную массу раствора, находящегося в калориметре (плотность раствора ρ можно принять равной 1 г/см^3):

$$m_{\text{р}} = (V_{\text{кисл}} + V_{\text{щел}})\rho.$$

3) Теплоемкость системы C (Дж/К) как сумму теплоемкостей раствора и стеклянного стакана:

$$C = C_p m_p + C_{\text{СТ}} m_{\text{СТ}},$$

где C_p – удельная теплоемкость раствора, $C_p = 4,184$ Дж/(г·К); $C_{\text{СТ}}$ – удельная теплоемкость стекла, $C_{\text{СТ}} = 0,753$ Дж/(г·К); $m_{\text{СТ}}$ – масса стакана, г.

4) Количество теплоты q (Дж), выделившейся в калориметре:

$$q = C \Delta T.$$

5) Число моль n полученной воды:

$$n = C_{\text{щел}} V_{\text{щел}},$$

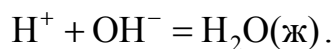
где $C_{\text{щел}}$ – молярная концентрация раствора щелочи NaOH, моль/л; $V_{\text{щел}}$ – объем гидроксида натрия, взятый для опыта, л.

6) Тепловой эффект (изменение энтальпии) реакции нейтрализации:

$$\Delta H = -\frac{q}{n}.$$

З а д а н и е . Термодинамический расчет изменения стандартной энтальпии реакции нейтрализации.

Согласно теории электролитической диссоциации реакция нейтрализации сильной кислоты сильным основанием сводится к уравнению



Произведите расчет стандартной энтальпии $\Delta_r H_{298}^0$ реакции нейтрализации по уравнению (5.4), используя данные, приведенные в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5 . 1

Стандартные значения термодинамических функций

	H^+	OH^-	$\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}$
$\Delta_f H_{298}^0$, кДж/моль·К	0	-230,0	-286,0
S_{298}^0 , Дж/моль·К	0	-10,5	70,0

Сравните полученные расчетное значение $\Delta_r H_{298}^0$ с экспериментальной величиной теплового эффекта ΔH , измеренной при комнатной температуре в опыте 1.

Аналогично рассчитайте изменение энтропии $\Delta_r S_{298}^0$ для этой реакции. По уравнению (5.5) вычислите изменение энергии Гиббса $\Delta_r G_{298}^0$ для реакции нейтрализации при температуре 298 К. Сделайте вывод о возможности самопроизвольного протекания процесса в стандартных изобарно-изотермических условиях.

Для плавного перехода особенностей одного спектрального класса в особенности другого каждый спектральный класс разбит на 10 подклассов, которые обозначаются цифрами от 0 до 9 после буквенного обозначения класса (например: B0, B1, B2, ..., B9, A0, A1, ...).

Спектральные классы O, B, A, F называются «ранними», G, K и M – «поздними». Разветвление спектральной последовательности связано с тем, что звезды класса C имеют спектр такой же, как и звезды класса G5 – K5. Однако они содержат сильные полосы соединений углерода. Спектры звезд класса S отличаются от спектров звезд класса M наличием полос окисей редких земель – циркония, иттрия и лантана.

В спектрах некоторых очень горячих звезд, достигающих температуры 100 000 К, наблюдаются яркие линии излучения. Эти звезды называются звездами Вольфа-Райе и обозначаются WN и WC в зависимости от элементов, к которым принадлежат линии излучения.

Описание спектральных классов

Класс O. Наиболее интенсивные линии ионизованного гелия и многократно ионизованных некоторых других элементов. Наблюдаются слабые линии нейтрального гелия и водорода. Цвет звезд голубоватый.

Класс B. Линии нейтрального гелия достигают максимальной интенсивности. Хорошо видны линии водорода и некоторых ионизованных элементов. Цвет голубовато-белый.

Класс A. Линии водорода достигают наибольшей интенсивности. Хорошо видны линии ионизованного кальция, наблюдаются слабые линии других металлов. Цвет звезд белый.

Класс F. Линии водорода становятся слабее. Усиливаются линии ионизованных металлов. Цвет желтоватый.

Класс G. Водородные линии не выделяются среди многочисленных линий металлов. Очень интенсивны линии ионизованного кальция. Цвет звезды желтый. Типичный пример – Солнце.

Класс K. Линии водорода не заметны среди очень интенсивных линий металлов. Цвет звезды красноватый.

Класс M. Красные звезды. Линии металлов ослабевают. Наблюдаются полосы поглощения молекул окиси титана и других молекулярных соединений.

Абсолютная звездная величина и светимость звезд

Абсолютной звездной величиной M называется звездная величина, которую имела бы звезда, находясь от нас на расстоянии 10 парсек (пк).

$$M = m + 5 - 5 \lg r \text{ или } M = m + 5 + 5 \lg \pi, \quad (6.1)$$

где m – видимая звездная величина, r – расстояние до звезды, π – годичный параллакс звезды.

При определении звездных величин из наблюдений измеряется только та часть излучения, которая прошла через атмосферу Земли. Часть же излучения, особенно в ультрафиолетовой и инфракрасной областях, поглощается атмосферой Земли. Для учета этого поглощения вводится *болометрическая поправка* ΔM_b , которая вычисляется теоретически с учетом условий прохождения через атмосферу разных участков спектра. Эта поправка прибавляется к абсолютной звездной величине.

$$M_b = M + \Delta M_b, \quad (6.2)$$

где M_b – болометрическая абсолютная звездная величина.

Светимостью L называется энергия, излучаемая всей поверхностью звезды в единицу времени. Формула Погсона позволяет связать абсолютные звездные величины со светимостями:

$$M_1 - M_2 = -2,5 \lg \frac{L_1}{L_2},$$

где L_1 и L_2 – светимости звезд с абсолютными звездными величинами M_1 и M_2 . Светимость звезд принято выражать в единицах солнечной светимости, т.е. светимость Солнца считают равной единице ($L_\odot = 1$). Тогда светимость звезды L в единицах солнечной светимости равна

$$\lg L = 0,4(M_\odot - M) \quad \text{или} \quad L = 10^{0,4(M_\odot - M)}. \quad (6.3)$$

С учетом болометрической поправки формулы (6.3) примут вид

$$\lg L_b = 0,4(M_{\odot b} - M_b) \quad \text{или} \quad L_b = 10^{0,4(M_{\odot b} - M_b)}. \quad (6.4)$$

Зная светимость Солнца $L_{\odot b} = 3,8610^{26}$ Дж/с в энергетических единицах, можно найти и светимость звезд в этих же единицах.

Показатель цвета

Различные приемники излучения, применяемые в астрономии, неодинаково чувствительны к различным цветам. Глаз наиболее чувствителен к зеленому цвету ($\lambda = 5550 \text{ \AA}$), обычная фотографическая эмульсия чувствительна к синим лучам ($\lambda = 4400 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 1000 \text{ \AA}$) или к ультрафиолетовым ($\lambda = 3500 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 500 \text{ \AA}$). Следовательно, определяемая звездная величина зависит от приемника излучения.

Разность между значениями звездных величин в двух различных цветовых интервалах называется *показателем цвета* CI . Наиболее точные значения CI определяют на основе фотоэлектрических измерений блеска звезды в ультрафиолетовой (U), синей (B) и желтой (V) областях спектра. Эти измерения позволяют ввести два показателя цвета: ультрафио-

летовый ($U - B$) и основной ($B - V$). Блеск звезды в синих лучах (B) можно считать примерно равным фотографической звездной величине m_p , блеск звезды в желтых лучах (V) – визуальной звездной величине m_v . Тогда $CI = m_p - m_v$.

Абсолютная звездная величина M и светимость L получают свое название (визуальная, фотографическая и др.) по соответствующему названию видимой звездной величины m звезд и Солнца, положенной в основу вычислений M и L . Связь между визуальными и фотографическими звездными величинами осуществляется через показатели цвета.

$$B - V = m_p - m_v = M_B - M_V$$

Диаграмма, связывающая абсолютные звездные величины звезд M (светимость $\lg L$) с их спектральными классами (температурами T) (диаграмма «спектр – светимость», см. рис. 6.1), была построена в начале XX столетия нидерландским астрономом Э. Герцшпрунгом и американским астрономом Г. Ресселом (диаграммой Герцшпрунга – Рессела).



Рис.6.1. Диаграмма «спектр – светимость»

Эта диаграмма позволила разделить звезды по классам светимости.

<i>Класс светимости</i>	<i>Последовательности</i>
Ia	Яркие сверхгиганты
Ib	Сверхгиганты
II	Яркие гиганты
III	Гиганты
IV	Субгиганты
V	Карлики
VI	Субкарлики
VII	Белые карлики

Класс светимости указывается после спектрального класса звезды. Например, наше Солнце – звезда класса G2V (желтый карлик).

Практическая часть

1. Сравнивая спектры звезд, полученные щелевым спектрографом, со спектрами гарвардской классификации, определите, к каким спектральным классам относятся спектры звезд (по вариантам):

- 1) δ Орла, ϵ Дельфина, μ Большой Медведицы, β Ворона;
- 2) μ Близнецов, γ Водолея, ξ Лебедя, η Волопаса;
- 3) α Змееносца, ϵ Волопаса, ξ Близнецов, δ Ориона;
- 4) α Лир, σ Кормы, ζ Геркулеса, κ Дракона;
- 5) η Геркулеса, δ Скорпиона, R Гидры, γ Девы;
- 6) τ^4 Эридана, ϵ Большой Медведицы, β Близнецов, δ Персея;
- 7) β Овна, γ Дракона, σ Ориона, η Стрельца;
- 8) β Андромеды, μ Девы, δ Кассиопеи, α Большой Медведицы.

При отождествлении спектров обратите особое внимание на интенсивность линий поглощения водорода ($H_\beta, H_\gamma, H_\delta, H_\epsilon$).

2. По спектральному классу, используя табл. 4П1, оцените температуру, показатель цвета ($B-V$) звезд. Полученный результат сравните с данными по исследуемым звездам, которые приведены в табл. 4П3. Занесите полученные результаты в табл. 6.1.

Название звезды	По спектрам звезд			По таблице 4П2		
	Спектр. класс; Класс свет.	T, K	$(B-V)$	Спектр. класс; Класс свет.	T, K	$(B-V)$

3. Используя данные табл. 4ПЗ (видимую звездную величину V , параллакс π), вычислите абсолютные звездные величины по формуле (6.1), определите болометрическую поправку ΔM_b (табл. 4П2) по формуле (6.2) и найдите светимости изучаемых звезд по формуле (6.4).

$$M_{\odot b} = 4,74^m .$$

4. Найдите на диаграмме «спектр – светимость» (см. рис. 6.1) абсолютные звездные величины изучаемых звезд по их спектральному классу и классу светимости. Сравните их с результатом Ваших вычислений абсолютных звездных величин. Занесите полученные результаты в табл. 6.2.

Т а б л и ц а 6.2

Название звезды	V	π	M	ΔM_b	M_b	L_b	M по диаграмме

Контрольные вопросы

1. Какие критерии лежат в основе спектральной классификации звезд? Назовите спектральные классы звезд. Чем объясняется наблюдаемое различие в спектрах?

2. Нарисуйте диаграмму «спектр – светимость» и укажите классы светимостей.

3. Какие физические характеристики звезды можно определить, зная её спектральный класс?

4. Что такое абсолютная звездная величина? Получите формулу (6.1). Вычислите абсолютную звездную величину Солнца.

5. Что характеризует болометрическая поправка?

6. Что называется показателем цвета? Какая система показателей цветов принята в настоящее время?

7. Что называется светимостью звезды? Как определяется светимость звезд? Как определить светимость Солнца?

8. Что характеризует класс светимости звезды?

9. Как можно найти расстояние до звезды, используя диаграмму «спектр – светимость»?

10. Видимая звездная величина Луны в полнолуние – $12,6^m$, а Солнца – $26,7^m$. Во сколько раз Солнце ярче Луны?

Лабораторная работа № 7 ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ЕГО СЛЕДСТВИЯ

Цель работы: изучение закономерностей, связанных с обращением Земли вокруг Солнца.

Пособия: модель небесной сферы, малый звездный атлас, подвижная карта звездного неба, астрономический календарь-ежегодник.

Теоретическая часть

Земля обращается вокруг Солнца в плоскости, которую называют *плоскостью земной орбиты*, и поэтому видимое годовое движение Солнца происходит в этой же самой плоскости, которая пересекает небесную сферу по большому кругу, называемому *эклиптикой*. Таким образом, плоскость эклиптики и плоскость земной орбиты идентичны.

В любой момент времени Солнце видно с Земли проецирующимся в некоторую точку небесной сферы. Эклиптика и небесный экватор пересекаются под определённым углом δ в двух диаметрально противоположных точках, называемых точками равноденствий. Эти точки носят такое название потому, что, когда в них находится Солнце, день равен ночи. Угол δ называется наклоном эклиптики к экватору. По наклонению можно вычислить угол наклона земной оси к плоскости земной орбиты.

Учитывая, что на всех географических широтах φ северного полушария Земли, удовлетворяющих условию $90^\circ > \varphi > \delta$, Солнце всегда кульминирует к югу от зенита, наклонение эклиптики к экватору можно определить, используя формулу, справедливую для момента верхней кульминации,

$$z = \varphi - \delta,$$

где z – зенитное расстояние Солнца; φ – широта места наблюдения; δ – склонение Солнца. В день летнего солнцестояния склонение Солнца максимально и равно наклонению эклиптики к экватору. В этот момент его зенитное расстояние будет минимальным, т.е. $z_{\min} = \varphi - \delta_{\max}$. Следовательно, $\delta_{\max} = \varphi - z_{\min}$. В день зимнего солнцестояния зимнее расстояние Солнца будет максимально, а склонение минимально и равно $-\delta$.

Экваториальные координаты Солнца α и δ содержатся в астрономических календарях – ежегодниках.

Видимое движение Солнца легко уяснить на модели небесной сферы.

Нужно помнить, что Солнце всегда находится на эклиптике. В дни весеннего и осеннего равноденствий время пребывания Солнца над горизонтом и под горизонтом одинаково и равно 12 часам. Отсюда происходит

название этих точек. При нахождении Солнца около точки летнего солнцестояния высота его над горизонтом в полдень будет максимальной; в это время в северных широтах самый длительный день и самая короткая ночь.

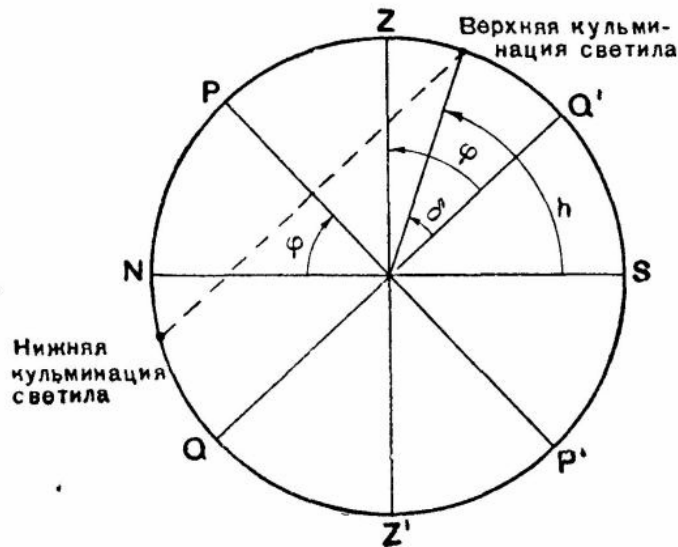


Рис. 7.1

Вблизи дня зимнего солнцестояния высота Солнца над горизонтом минимальна, день самый короткий в году, а ночь самая длинная.

На иных географических широтах земного шара продолжительность дня и ночи разная. На экваторе день всегда равен ночи и это соотношение не меняется в течение года. На полюсах бывает долгая полярная ночь, когда Солнце не поднимается над горизонтом в течение месяцев, и полярный день, когда Солнце не заходит.

Моменты восхода и захода Солнца, а также азимуты точек восхода и захода зависят от географической широты места наблюдения. Поставив небесную сферу на разные широты, можно проследить зависимость видимого годового движения Солнца от широты места.

Точные значения моментов восхода, захода, а также азимуты этих точек вычисляются по соответствующим формулам сферической астрономии. В астрономическом календаре-ежегоднике приведены значения этих величин для места с географической долготой $\lambda = 0^h 0^m 0^s$ и географической широтой $\varphi = 56^\circ 0' 0''$.

Моменты даны по гринвичскому (всемирному) времени. Приближенные значения тех же величин для определения географической широты могут быть найдены по подвижной карте звездного неба и помогают уяснить закономерность и причину их изменения на протяжении года.

На картах звездных атласов основные точки эклиптики ничем не обозначены, но легко отождествляются по их экваториальным координатам.

В зависимости от положения Солнца на эклиптике условия видимости созвездий на протяжении года непрерывно изменяются, и одно и то же созвездие в разные времена года видно в различное время суток. Условия видимости зодиакальных созвездий лучше всего могут быть выяснены по подвижной карте звездного неба, причем необходимо помнить, что звезды, расположенные в пределах около 15° к востоку и западу от Солнца, недоступны наблюдениям, так как темное время суток наступает не сразу после захода Солнца.

Границы тепловых поясов на Земле проведены по астрономическим признакам. В жарком поясе, границы которого простираются по обе стороны от экватора от $\varphi = +23^\circ 26'$ (северный тропик) до $\varphi = -23^\circ 26'$ (южный тропик), Солнце всегда восходящее и заходящее светило и два раза в году (на тропиках один раз) в полдень бывает в зените в тех местах, географическая широта φ которых равна δ в данный день.

Так как склонение Солнца не бывает больше $23^\circ 26'$, то и границы жаркого пояса, называемые тропиками, расположены на географических параллелях с такой же широтой.

В умеренных поясах, лежащих между тропиками и полярными кругами (от $\varphi = \pm 23^\circ 26'$ до $\varphi = \pm 66^\circ 34'$), Солнце каждый день восходит и заходит, но никогда не бывает в зените. Полярных дней и ночей здесь не бывает. Полгода продолжительность дня здесь больше продолжительности ночи, а полгода – наоборот. Полуденная высота Солнца всегда меньше 90° (кроме тропиков) и больше 0° (кроме полярных кругов).

В холодных поясах (от $\varphi = \pm 66^\circ 34'$ до $\varphi = \pm 90^\circ$) Солнце может быть незаходящим и невосходящим светилом. Полярный день и полярная ночь могут длиться от 24 часов до полугода.

Практическая часть

1. Определите наклонение эклиптики по измеренному зенитному расстоянию Солнца в верхней кульминации в дни солнцестояний: 22 июня – $19^\circ 23'$; 22 декабря – $66^\circ 27'$.

2. По картам звездного атласа найдите основные точки эклиптики и определите их экваториальные координаты. Определите названия и границы зодиакальных созвездий, на которые проецируются эти точки.

3. Пользуясь подвижной звездной картой, укажите точку эклиптики, в которой Солнце находится в текущий день.

4. Пользуясь небесной сферой, определите полуденную высоту Солнца и азимуты точек восхода и захода Солнца в дни равноденствий и

солнцестояний для Витебска. Найдите азимуты точек восхода и захода Солнца в день занятий для Минска по формуле:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi},$$

где δ – склонение Солнца; φ – широта места наблюдения.

5. Определите наклонение эклиптики около 3000 лет назад, если по наблюдениям в ту эпоху в некотором месте полуденная высота Солнца в день летнего солнцестояния равнялась $+63^{\circ}48'$, а в день зимнего солнцестояния $+16^{\circ}00'$ к югу от зенита.

6. Определите, на каких широтах земного шара Солнце бывает точно в зените.

Примеры выполнения некоторых заданий

Найдите азимуты точек восхода и захода Солнца в день занятий для Минска по формуле:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi},$$

где δ – склонение Солнца; φ – широта места наблюдения.

Решение

В эфемеридах Солнца находим на указанную дату склонение Солнца. Например, 1 октября $\delta = -3^{\circ}4'$. Широта Минска $\varphi = 53^{\circ}54'$. Подставляя в

формулу $\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}$ значения δ и φ , получим $\cos A = -\frac{\sin(-3^{\circ}4')}{\cos 53^{\circ}54'} = 0,09$.

$$A = \arccos 0,09 = \pm 84^{\circ}48'.$$

Знак «+» относится к точке захода, а «-» к точке восхода. Таким образом, $A_{\text{восхода}} = -84^{\circ}48'$, или $A_{\text{восхода}} = 360^{\circ} - 84^{\circ}48' = 275^{\circ}12'$, а $A_{\text{захода}} = +84^{\circ}48'$.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие эклиптики.
2. Дайте понятие эклиптики к экватору.
3. Расскажите о точках равноденствий и солнцестояний.
4. Объясните связь между видимым движением Солнца на разных широтах и границами тепловых поясов на Земле.
5. Продемонстрируйте на небесной сфере видимое движение Солнца на различных широтах.
6. Пользуясь подвижной картой, определите местонахождение Солнца в разное время года.

Лабораторная работа № 8 ЗАКОНЫ КЕПЛера И КОНФИГУРАЦИИ ПЛАНЕТ

Цель работы: изучение закономерностей в движении и вычисление их конфигураций с помощью модели Солнечной системы.

Пособия: модель Солнечной системы, астрономический календарь (постоянная часть), астрономический календарь-ежегодник.

Теоретическая часть

Движение планет относительно Солнца описывается законами, сформулированными в начале XVII века немецким ученым Иоганном Кеплером (1571–1630) как обобщение данных наблюдений Тихо Браге (1546–1601). Они используются в небесной механике.

Первый закон Кеплера:

все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце.

Второй закон Кеплера (закон площадей):

скорость движения планеты изменяется так, что её радиус-вектор за равные промежутки времени описывает равновеликие площади.

Применительно к Солнечной системе, с этим законом связаны два понятия: перигелий – ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты, и афелий – наиболее удаленная точка орбиты. Тогда можно утверждать, что планета движется вокруг Солнца неравномерно, имея линейную скорость в перигелии больше, чем в афелии.

Третий закон Кеплера (гармонический закон):

квадраты сидерических периодов обращений любых двух планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит.

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

где T_1 и T_2 – сидерические периоды обращений планет; a_1 и a_2 – большие полуоси их орбит.

Если большие полуоси орбит выразить в астрономических единицах, а периоды обращений в годах, то для Земли $a = 1$, $T = 1$, и период обращения любой планеты Солнца равен

$$T = \sqrt{a^3}.$$

Этот закон, равно как и первые два, применим не только к движению планет, но и к движению их как естественных, так и искусственных спутников.

Законы Кеплера были уточнены и объяснены Исааком Ньютоном на основе **закона всемирного тяготения**:

две материальные точки с массами m_1 и m_2 притягиваются друг к другу с силой F , прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Под материальными точками здесь понимаются любые тела при условии, что их линейные размеры намного меньше расстояния между ними. Коэффициент пропорциональности G называется *постоянной тяготения Ньютона*, или *гравитационной постоянной* ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$).

Открытие законов движения планет Кеплером имело неопределимое значение для развития естествознания. Оно свидетельствовало, во-первых, о том, что между движениями земных и небесных тел не существует принципиальной разницы (как полагал Аристотель), поскольку все они подчиняются определенным естественным законам; во-вторых, сам путь открытия законов движения небесных тел в принципе не отличается от открытия законов земных тел.

Благодаря работам И. Ньютона получены обобщенные законы Кеплера, которые в настоящее время формулируются так:

1. Под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений – кругу, эллипсу, параболе или гиперболе.

Эта формулировка подходит для описания движения всех небесных тел: спутников, комет, двойных звезд и др.

2. Площадь, описанная радиус-вектором планеты за единицу времени, есть величина постоянная.

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const},$$

где θ – полярный угол (истинная аномалия).

3.

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где M и m – массы центрального тела и спутника, индексы 1 и 2 относятся к различным парам «тело – спутник».

В данной работе предполагается проверка третьего закона Кеплера в первом приближении, при этом можно считать орбиты планет круговыми и лежащими в одной плоскости.

При своём движении по орбитам планеты могут различные положения относительно Солнца и Земли. Эти положения называются *конфигурациями*. Конфигурации различаются для нижних и для верхних планет. Нижними являются планеты, находящиеся ближе к Солнцу, чем Земля, верхними – те, которые дальше.

Для нижних планет выделяют конфигурации: нижнее и верхнее соединение с Солнцем, наибольшая западная и восточная элонгации (рис. 8.1). Слово *элонгация* означает удаление. Смысл двух элонгаций заключается в том, что если мы будем наблюдать нижние планеты с Земли, то они будут находиться на самом большом угловом расстоянии от Солнца.



Рис. 8.1

Когда планета находится в соединении, то она с Земли не наблюдается, так как максимально сближается с Солнцем и теряется в его лучах.

Конфигурации для верхних планет несколько иные. Верхние планеты имеют соединение, противостояние (оппозицию), западную и восточную квадратуру. Смысл этих конфигураций можно понять аналогично, как и для нижних планет. Соединение означает соединение с Солнцем при наблюдении планеты с Земли. Значит, во время нахождения планеты в этой конфигурации она наблюдаться не может, так как теряется в солнечных лучах. В противостоянии, наоборот, планета будет видна лучше всего, так как противостоит Солнцу, а значит, наблюдается на обратной стороне неба. В это время планета ближе всего – подходит к Земле и видна почти всю ночь. Нижняя планета находится ближе всего к Земле в момент нижнего соединения и дальше всего в момент верхнего. Верхняя планета приближается в момент противостояния и удаляется в момент соединения.

Прямые и попятные движения планет объясняются различием орбитальных линейных скоростей планеты и Земли, а также различными радиусами орбит планет, и могут быть поняты из рис. 8.2. В верхней части изображена траектория движения планеты на небе, показывающая, как планета делает петлю, а в нижней части видно, что эта петля кажущаяся, обусловленная тем, что Земля планету догоняет и перегоняет, или же наоборот, планета догоняет и перегоняет Землю.

В движении планет вокруг Солнца выделяют синодический и сидерический период обращения.

Синодический период обращения (S) планеты – это промежуток времени между её двумя последовательными одноименными конфигурациями.

Сидерический, или звёздный, период обращения (T) – это промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите.

Сидерический период обращения Земли называется звёздным годом (T_3).



Рис. 8.2

Угловое перемещение по орбите за сутки у планеты равно $\frac{360}{T}$, а у Земли – $\frac{360}{T_3}$. Разность суточных угловых перемещений планеты и Земли

есть видимое смещение планеты за сутки, т.е. $\frac{360}{S}$.

Получаем для нижних планет

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_3},$$

для верхних планет

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T}.$$

Это уравнения синодического движения.

Непосредственно из наблюдений могут быть определены только синодические периоды обращений планет S и сидерический период обращения Земли. Сидерические же периоды обращений планет вычисляются по уравнениям синодического движения.

Продолжительность сидерического периода Земли, или звёздного года, равна 365,256 средних солнечных суток.

Взаимное расположение планет легко устанавливается по их гелиоцентрическим эклиптическим координатам, значения которых на различные дни года публикуются в астрономических календарях-ежегодниках, в таблице под названием «Гелиоцентрические долготы планет».

Центром этой системы координат является центр Солнца, а основным кругом – эклиптика, полюсы которой Π и Π' отстоят от неё на 90° .

Большие круги, проведенные через полюсы эклиптики, называются *кругами эклиптических широт*. По ним отсчитывается от эклиптики гелиоцентрическая широта b , которая считается положительной в северном полушарии небесной сферы и отрицательной – в южном эклиптическом полушарии небесной сферы.

Гелиоцентрическая долгота l отсчитывается по эклиптике от точки весеннего равноденствия против часовой стрелки до основания круга широты светила и имеет значение в пределах от 0 до 360° . Из-за малого наклона орбит больших планет к плоскости эклиптики эти планеты всегда находятся вблизи эклиптики, и в первом приближении можно считать их гелиоцентрическую широту $b = 0$. Тогда положение планеты относительно Солнца определяется только её гелиоцентрической долготой.

По гелиоцентрической долготе планет легко вычислить дни (даты) наступления различных конфигураций. Пусть в некоторый день года t_1 гелиоцентрическая долгота верхней планеты l_1 .

Гелиоцентрическая долгота Земли – l_{01} , ω – средняя суточная угловая скорость планеты, ω_0 – средняя суточная угловая скорость Земли. Верхняя планета движется вокруг Солнца медленнее Земли ($\omega < \omega_0$), Земля догоняет планету, и в какой-то день года t_2 , при гелиоцентрической долготе планеты l_2 и Земли l_{02} , наступает искомая конфигурация планеты.

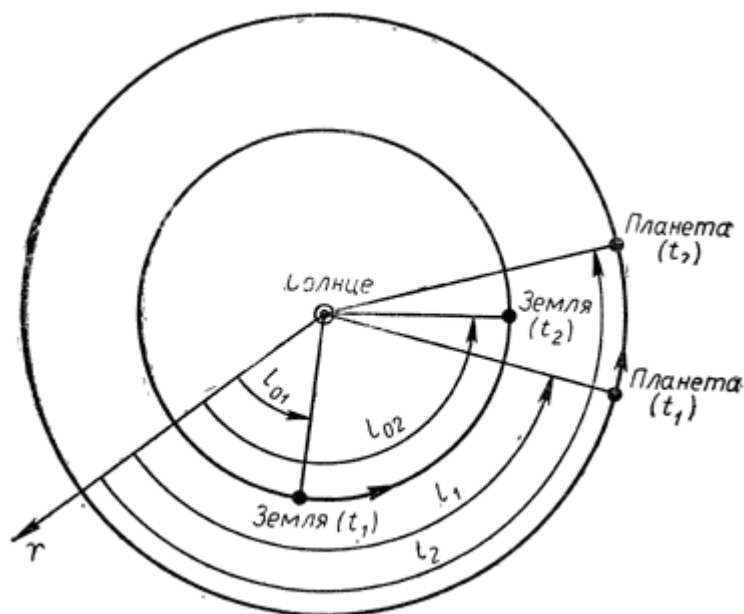


Рис. 8.3

При этом

$$l_2 = l_1 + \omega(t_2 - t_1) = l_1 + \omega\Delta t, \quad l_{02} = l_{01} + \omega_0(t_2 - t_1) = l_{01} + \omega_0\Delta t.$$

Обозначив $l_2 - l_1 = \Delta l$; $l_{02} - l_{01} = \Delta l_0$; $\omega_0 - \omega = \Delta\omega$, получим

$$\Delta t = \frac{\Delta l_0 - \Delta l}{\Delta\omega} = \frac{1}{\Delta\omega}.$$

Тогда $t_2 = t_1 + \Delta t$.

Аналогично вычисляются дни наступления конфигураций нижних планет с учетом того, что нижняя планета движется быстрее Земли.

Наглядно продемонстрировать и проверить расчет момента конфигурации планет можно с помощью модели Солнечной системы. Модель позволяет также осуществить проверку 3-го закона Кеплера.

Планеты на модели располагаются на расстояниях, пропорциональных действительным. Относительные размеры планет также соответствуют действительным.

На поверхности крышки прибора крепятся две шкалы:

- временная, с указанием месяцев года, с ценой деления 5 дней.
- гелиоцентрическая долгот, с ценой деления 5° .

Работа прибора основана на воспроизведении гелиоцентрических движений планет, что позволяет проводить демонстрации движений планет с сохранением их относительных синодических периодов обращения.

Включая и выключая двигатель, можно определить взаимное расположение планет и их конфигурации в последующие моменты. При этом следует сравнить данные, получаемые на модели, с данными в астрономическом календаре-ежегоднике.

Рассмотрим, например, работу с прибором при проверке уравнения синодического движения для Марса:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T}, \text{ или } S = \frac{TT_3}{T - T_3}.$$

Для этого, установив Марс в противостоянии с Землей, например, на 1 января, включают двигатель и выключают его в тот момент, когда Марс сделает один оборот, т.е. займет прежнее положение.

За один оборот Марса Земля сделает 1 оборот + 321 сутки и остановится на дате 17 ноября, т.е. $365 + 321 = 686$ суток. Следовательно, сидерический период Марса равен 686 земных суток, или 1,88 года.

Далее включают двигатель и следят, когда Марс вновь будет в противостоянии; в этот момент двигатель выключают. Это должно произойти 19 февраля. Земля к этому времени повернется на $(2 \cdot 365 + 50) = 780$ суток, что соответствует синодическому периоду Марса.

Подставив данные в формулу, полученную из уравнения синодического движения, убеждаемся в ее справедливости. Эту же проверку можно осуществить с помощью секундомера, отмечая предварительно время одного оборота Земли, Марса, а затем синодический период. При этом за единицу времени следует брать время оборота Земли.

Аналогично проверяется 3-й закон Кеплера. Расстояния до планет измеряют линейкой, за единицу принимаются расстояние от Земли до Солнца.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первый закон Кеплера.
2. Дайте формулировку второго закона Кеплера.
3. Сформулируйте и запишите формулу третьего закона Кеплера.
4. Сформулируйте и запишите формулу закона всемирного тяготения.
5. Дайте формулировки обобщенных законов движения небесной механики.
6. Что называют конфигурациями планет?
7. Чем различаются конфигурации для нижних и верхних планет?
8. Чем объясняются прямые и попятные движения планет?
9. Что называют синодическим периодом?
10. Что называют сидерическим периодом?
11. Запишите уравнения синодического движения.

Задания

1. Считая орбиты планет круговыми, определите гелиоцентрическую долготу Земли и планет по их конфигурациям:

21 марта – Меркурий в нижнем соединении, Венера в наибольшей западной элонгации, Марс в восточной квадратуре, Юпитер в соединении;

22 июня – Меркурий в верхнем соединении, Венера в наибольшей восточной элонгации, Марс в противостоянии, Юпитер в западной квадратуре.

Выполните схематические рисунки, учитывая масштаб.

2. С помощью подвижной карты звездного неба определите созвездия, в которых находятся вышеуказанные планеты на данные даты.

3. Используя модель Солнечной системы, установите заданную планету в указанную конфигурацию и определите её гелиоцентрическую долготу на 1993 год (гелиоцентрическую долготу Земли возьмите из астрономического календаря-ежегодника):

а) 28 января Меркурий в верхнем соединении;

б) 7 января Марс в противостоянии.

4. По известной дате указанной ниже конфигурации вычислите дату очередной такой же конфигурации планеты:

а) 27 декабря Марс в соединении;

б) 23 октября Юпитер в противостоянии.

5. Вычислите синодический период обращения астероида Офелии ($a = 3,13$ а.е.).

6. Считая орбиты планет круговыми, определите линейную скорость движения по орбите планет Меркурий, Земля и Юпитер.

7. Определите звездный период обращения Марса, зная, что его синодический период равен 779,94 суток.

8. По обобщенной формулировке третьего закона Кеплера определите массу Юпитера, зная, что расстояние 1-го спутника от Юпитера равно 422000 км, время его обращения вокруг Юпитера 1,77 суток, расстояние от Луны до Земли равно 384000 км, время обращения Луны вокруг Земли 27,32 суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Издавна люди пытались постичь многообразие окружающего их мира. Изучение объектов материи и структурных уровней её организации является необходимым условием формирования научного мировоззрения.

Структурные уровни организации материи строятся по принципу пирамиды: высшие уровни состоят из многочисленного числа низших уровней. Низшие уровни являются основой существования материи. Без этих уровней невозможно дальнейшее построение «пирамиды материи». Высшие (сложные) уровни образуются путём эволюции – постепенно переходя от простого к сложному. Структурные уровни материи образованы из определенного множества объектов какого-либо вида и характеризуются особым способом взаимодействия между составляющими их элементами.

Все объекты не только неживой, но также живой природы можно представить в виде определенных систем, обладающих конкретными особенностями и свойствами, характеризующими их уровень организации. С учетом уровня организации можно рассматривать иерархию структур организации материальных объектов живой и неживой природы. Такая иерархия структур начинается с элементарных частиц, представляющих собой первоначальный уровень организации материи, и заканчивается живыми организациями и сообществами – высшими уровнями организации.

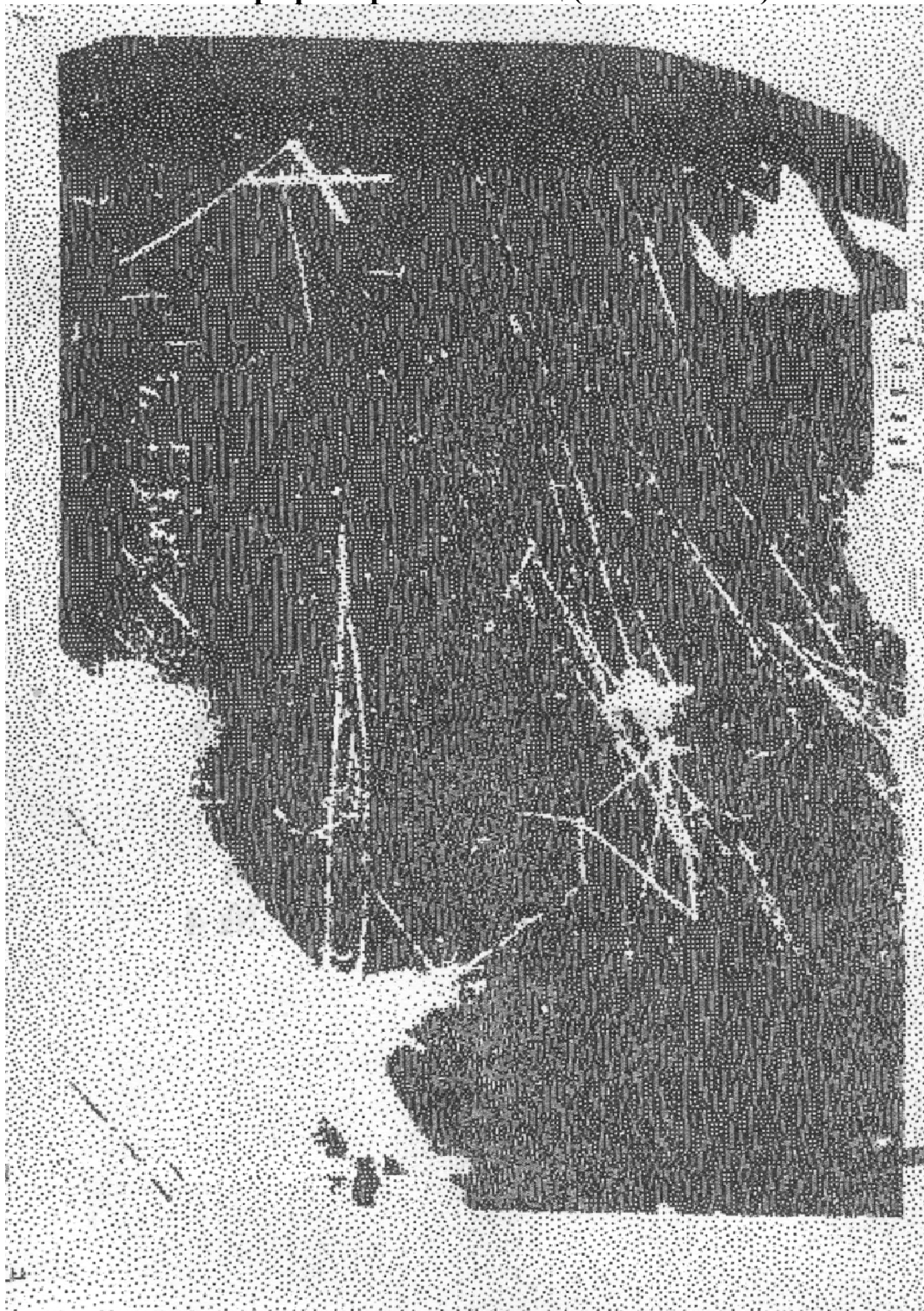
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов, Л.А. Концепции современного естествознания [Текст] / Л.А. Михайлов. – СПб.: Питер, 2012. – 336 с.
2. Исаков, А.Я. Основы современного естествознания [Текст] / А.Я. Исаков. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 274 с.
3. Карпенков, С.Х. Концепции современного естествознания [Текст] / С.Х. Карпенков. – М.: Директ-Медиа, 2014. – 447 с.
4. Разумов, В.А. Концепции современного естествознания [Текст] / В.А. Разумов. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 352 с.
5. Лавриненко, В.Н. Концепции современного естествознания [Текст] / В.Н. Лавриненко, В.П. Ратников. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. – 319 с.
6. Тулинов, В.Ф. Концепции современного естествознания [Текст] / В.Ф. Тулинов, К.В. Тулинов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2014. – 484 с.
7. Гусейханов, М.К. Концепции современного естествознания [Текст] / М.К. Гусейханов. – М.: Юрайт, 2011. – 608 с.
8. Рузавин, Г.И. Концепции современного естествознания [Текст] / Г.И. Рузавин. – М.: Проспект, 2015. – 245 с.
9. Брызгалина, Е.В. Концепции современного естествознания [Текст] / Е. В. Брызгалина. – М.: Проспект, – 2015. – 496 с.
10. Романов, Л.А. Концепции современного естествознания [Текст]: практикум / Л.А. Романов. – М.: Вузовский учебник: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 128 с.
11. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2010. – 560 с.
12. Стрельник, О.Н. Концепции современного естествознания [Текст] / О.Н. Стрельник. – М.: Юрайт, 2011. – 223 с.

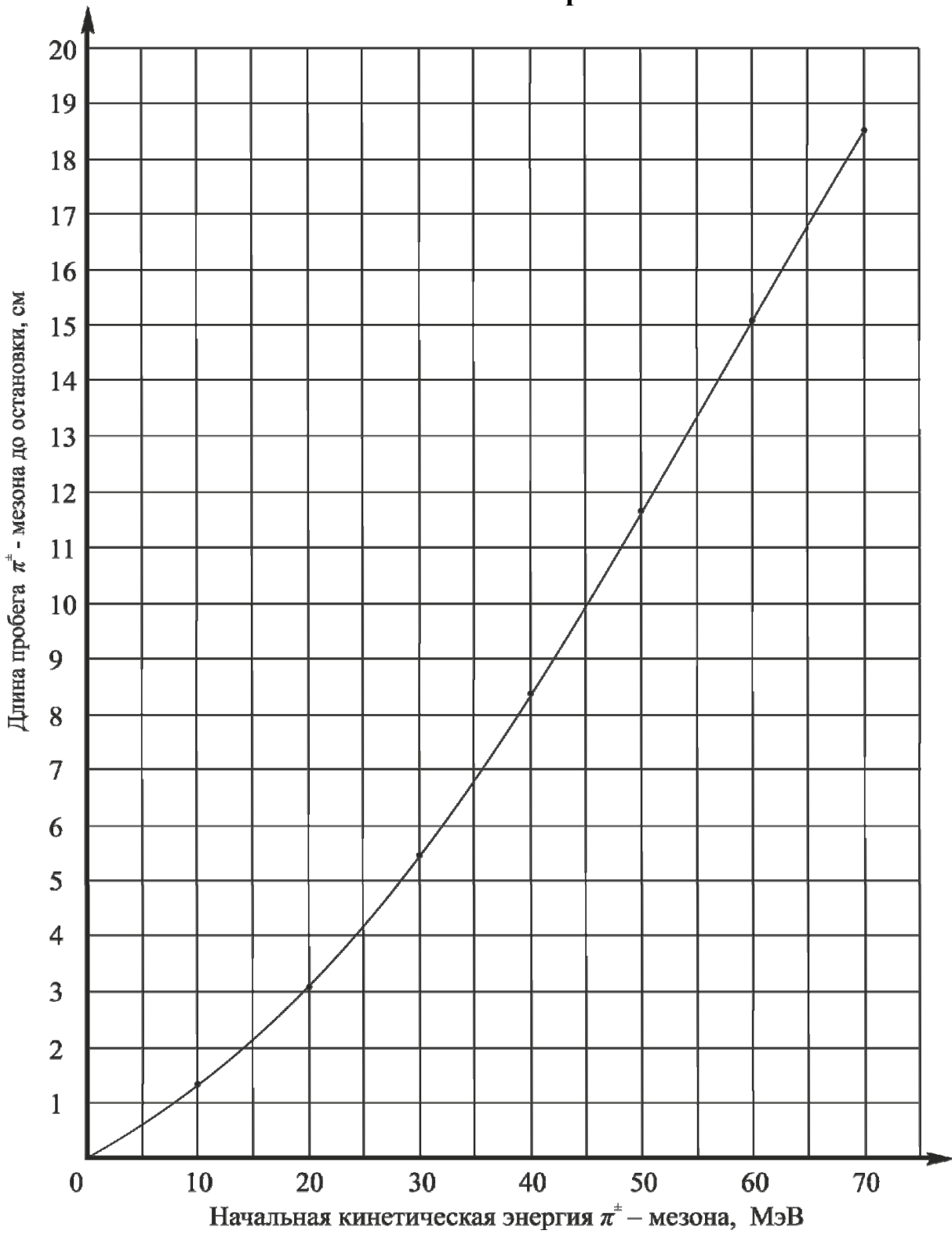
ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Фотография треков частиц (масштаб 5:1)



Зависимость длины пробега заряженных частиц от начальной кинетической энергии

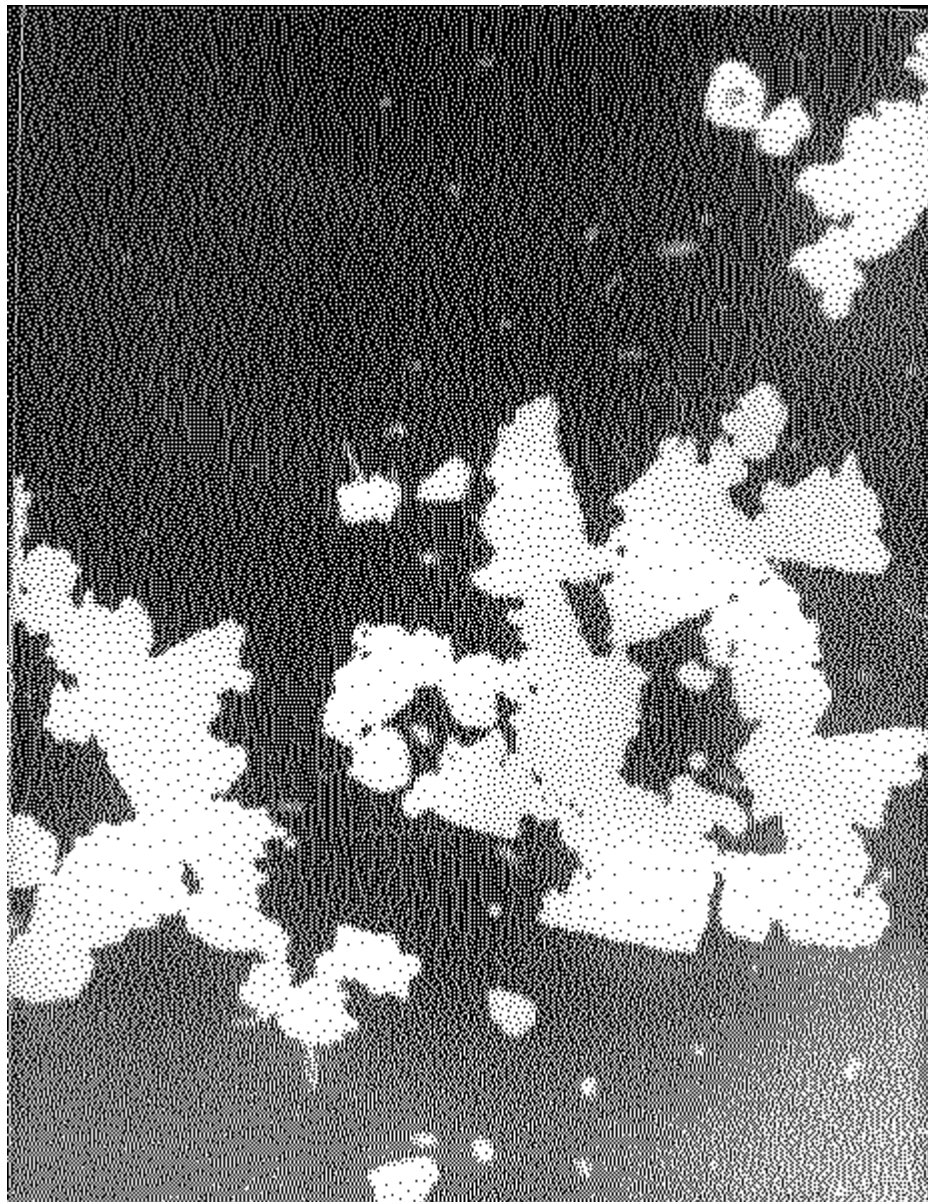


ФОТОГРАФИЯ № 1

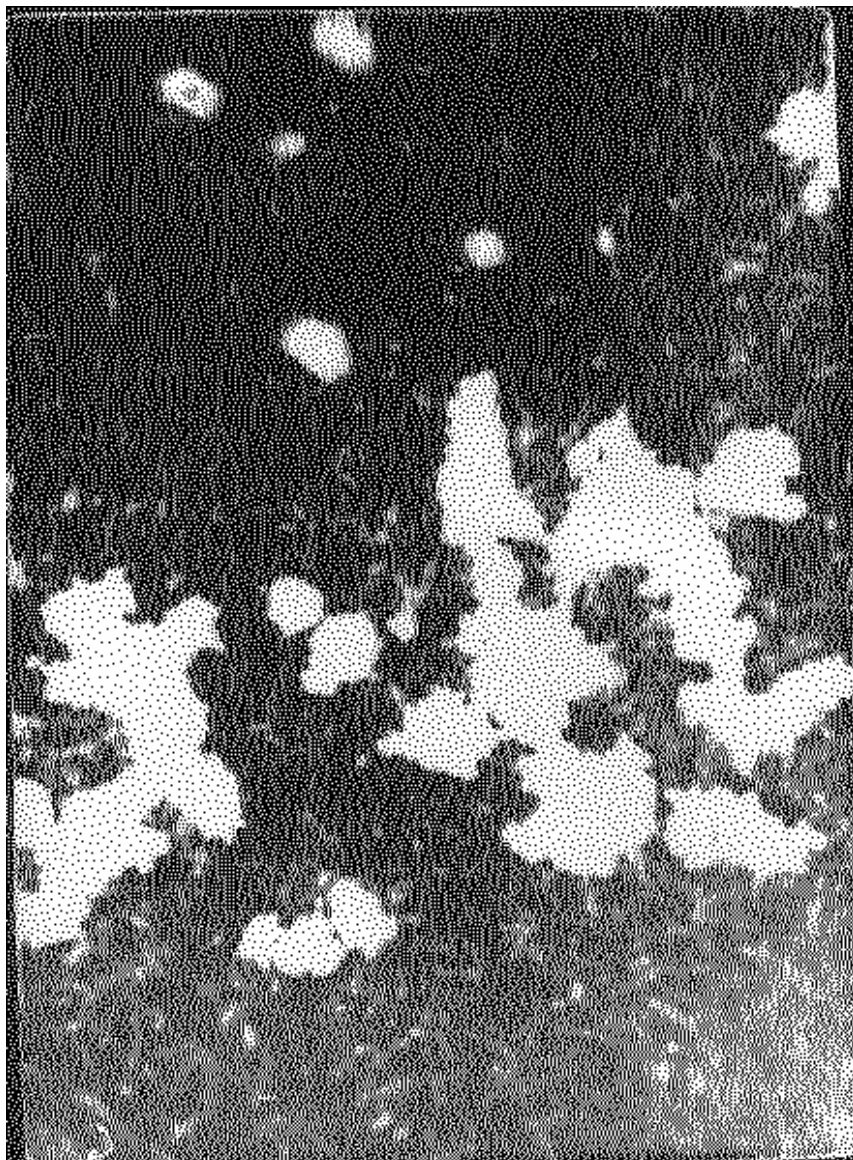


Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 2

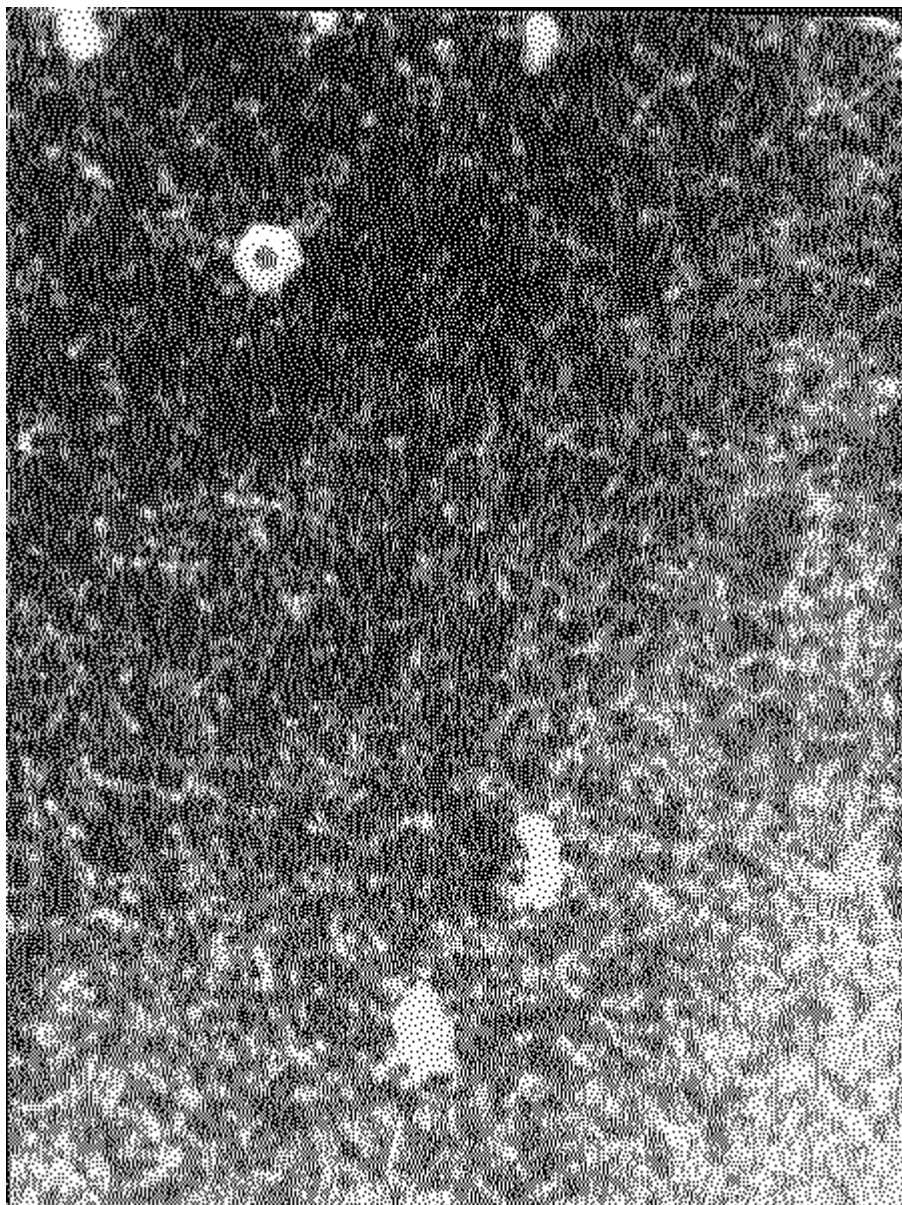


ФОТОГРАФИЯ № 3



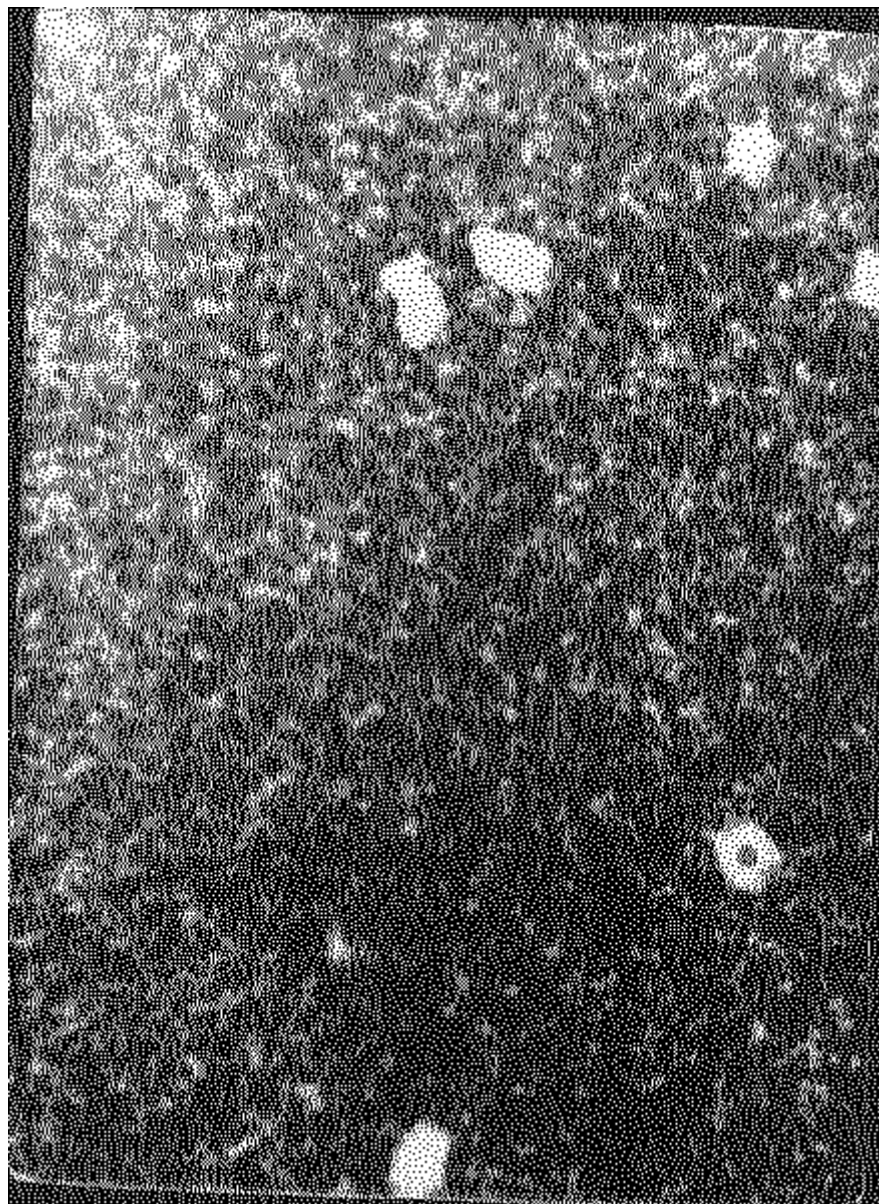
Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 4

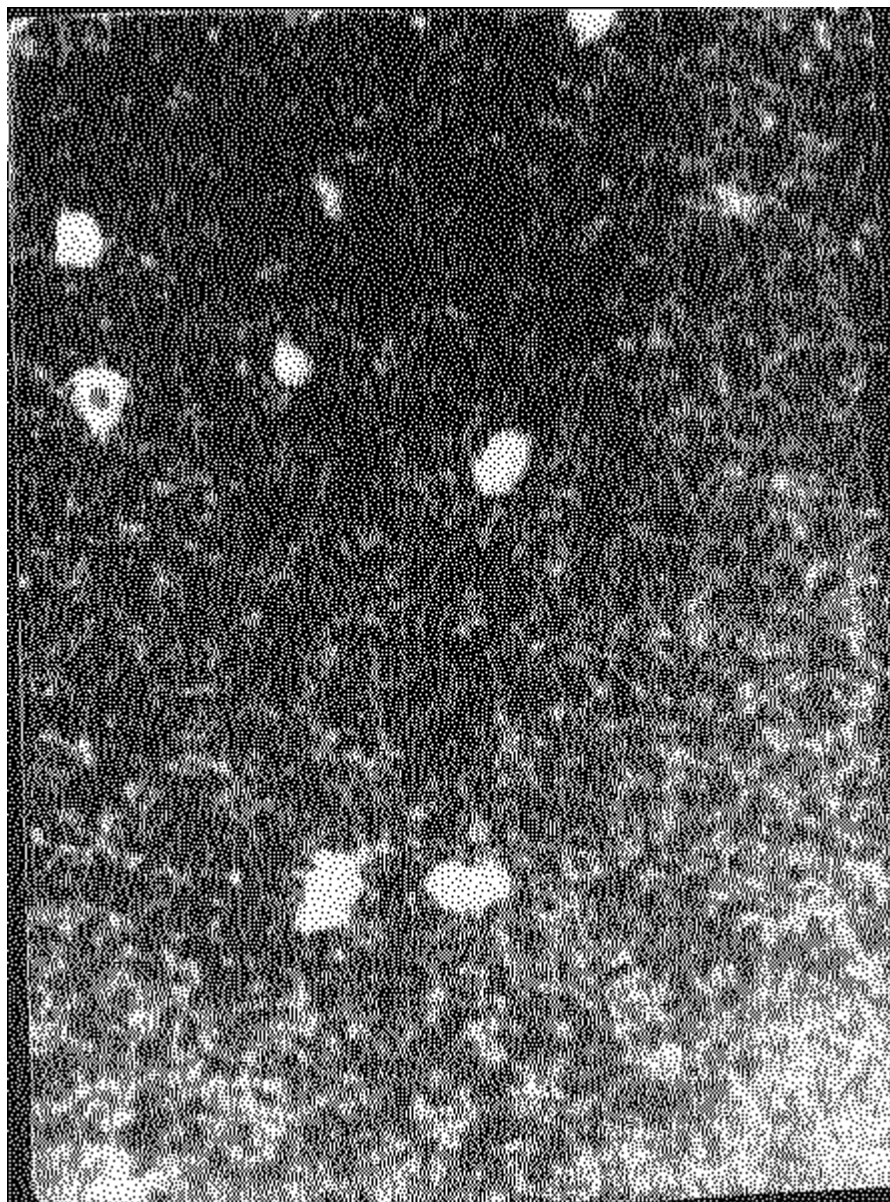


Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 5

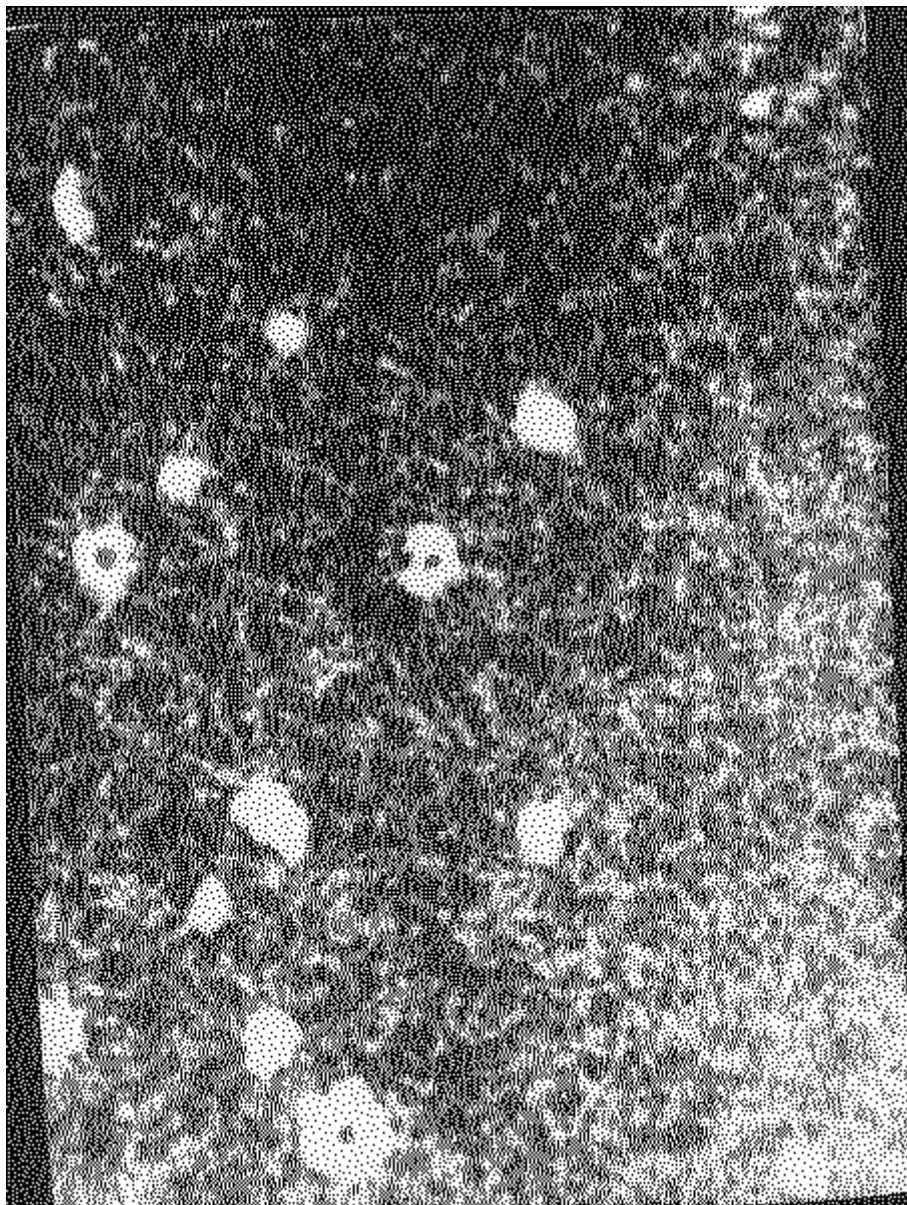


ФОТОГРАФИЯ № 6



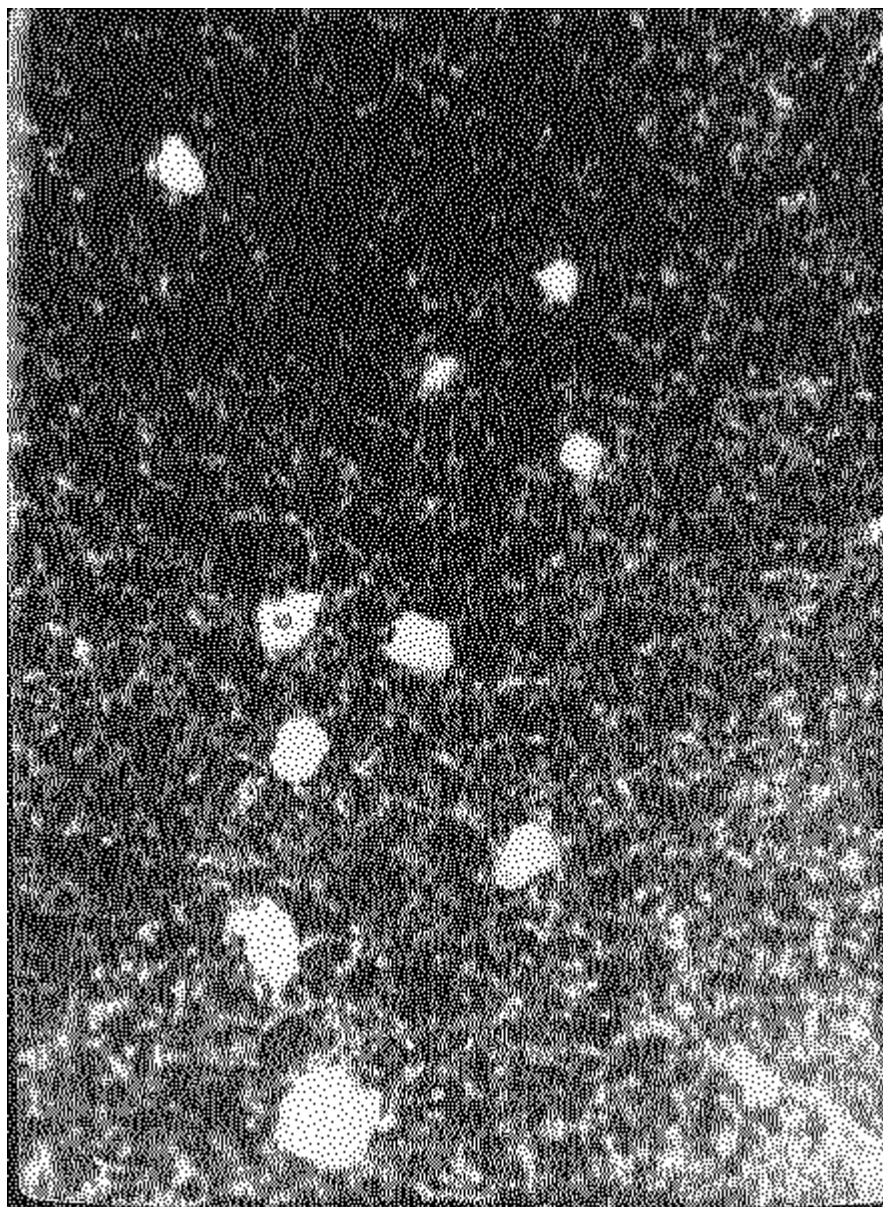
Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 7



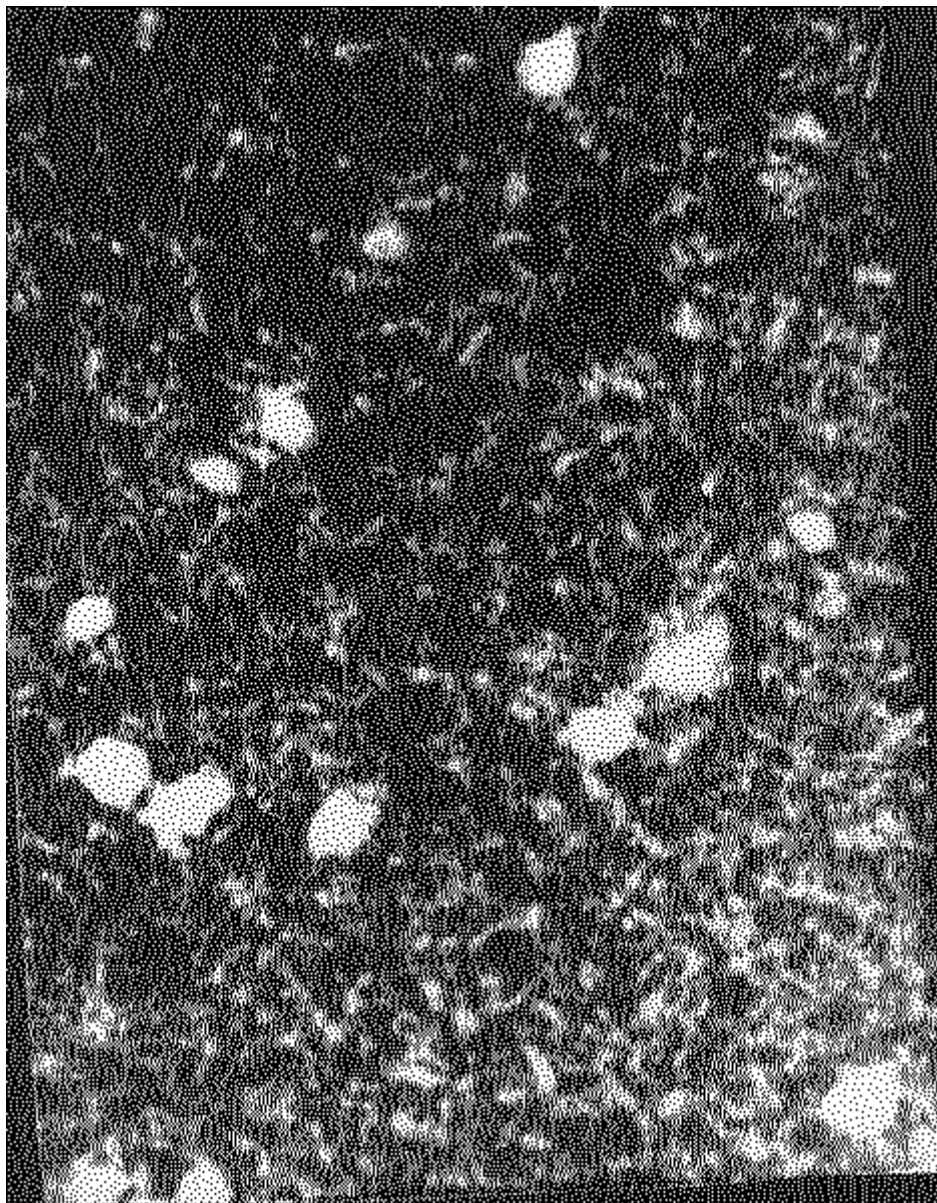
Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 8



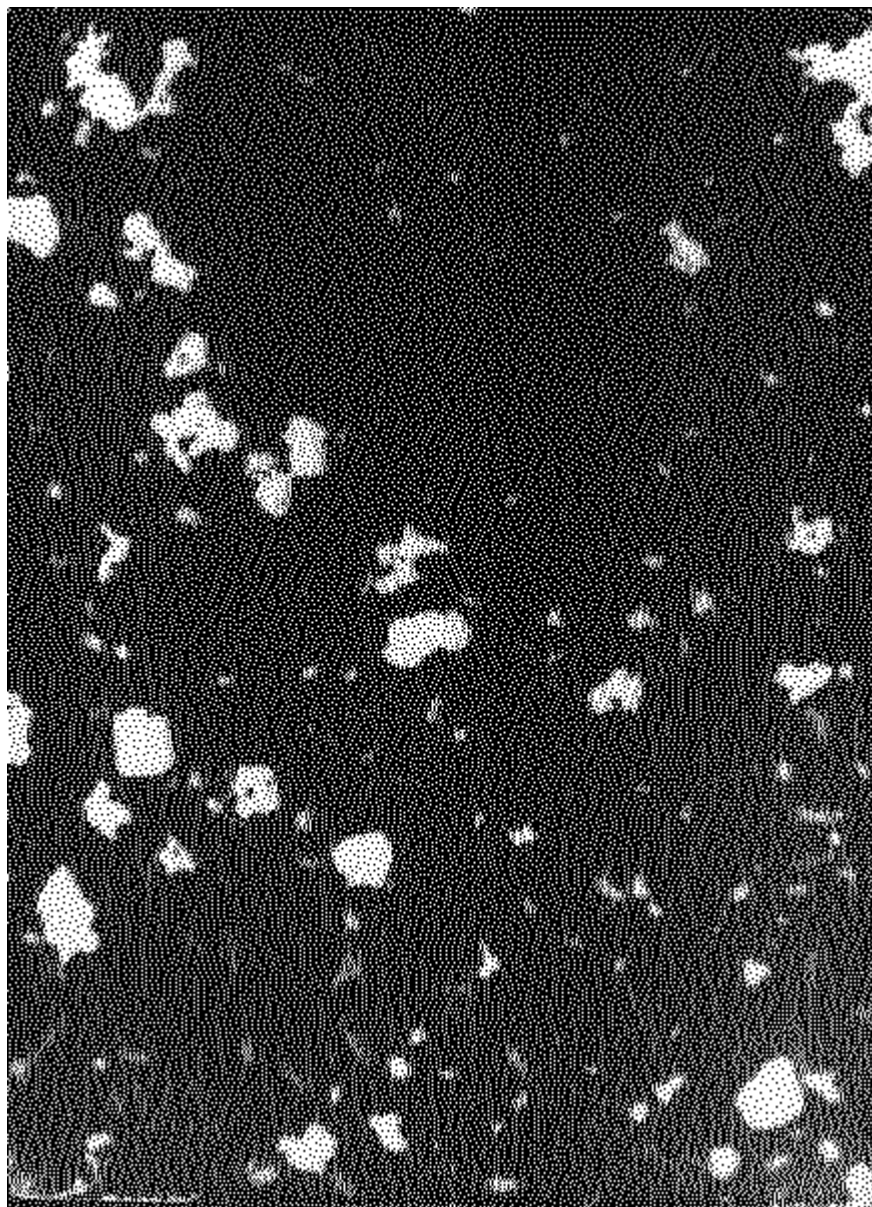
Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 9



Продолжение прил. 3

ФОТОГРАФИЯ № 10



ФОТОГРАФИЯ № 11



Приложение 4

Таблица 4П1
Средние значения температуры T , показателей цвета CI и $(B-V)$

Спектр. класс	Главная последовательность			Гиганты и сверхгиганты		
	T , К	CI	$(B-V)$	T , К	CI	$(B-V)$
O5	35000	-0,50	-0,45	35000	-0,50	-0,45
B0	21000	-0,45	-0,31	21000	-0,45	-0,31
B5	15500	-0,39	-0,17	15500	-0,39	-0,17
A0	11000	-0,15	0,00	11000	-0,15	0,00
A5	9800	0,00	+0,16	9800	0,00	+0,16
F0	8600	+0,12	+0,30	8600	+0,12	+0,30
F5	7500	+0,2	+0,45	7500	+0,26	+0,45
G0	6500	+0,42	+0,57	5700	+0,42	+0,57
G5	5400	+0,64	+0,70	5000	+0,64	+0,70
K0	4700	+0,89	+0,84	4300	+0,89	+0,84
K5	4000	+1,20	+1,11	3600	+1,20	+1,11
M0	3600	+1,30	+1,39	3400	+1,30	+1,39
M5	3000	+1,80	+1,61	2800	+1,80	+1,61

Таблица 4П2
Болометрические поправки ΔM_b

Спектр	ΔM_b	Спектр	ΔM_b		
			Главная последоват.	Гиганты	Сверхгиганты
B0	-2,70	F5	-0,04	-0,08	-0,12
B5	-1,58	F8	-0,05	-0,17	-0,28
A0	-0,72	G0	-0,06	-0,25	-0,42
A5	-0,31	G2	-0,07	-0,31	-0,52
F0	-0,09	G5	-0,10	-0,39	-0,65
F2	-0,04	G8	-0,10	-0,47	-0,80
		K0	-0,11	-0,54	-0,93
		K2	-0,15	-0,72	-1,20
		K3	-0,31	-0,89	-1,35
		K4	-0,55	-1,11	-1,56
		K5	-0,85	-1,35	-1,86
		M0	-1,43	-1,55	-2,2
		M1	-1,70	-1,72	-2,6
		M2	-2,03	-1,95	-3,0
		M3	-2,35	-2,26	-3,6
		M4	-2,7	-2,72	-3,8
		M5	-3,1	-3,4	-4,0

Окончание прил. 4
Таблица 4ПЗ

Сведения о звездах

Звезда	α_{1900}	δ_{1900}	V	Спектр	$(B-V)$	π
β Андромеды	1 ^h 0,41 ^m	+ 36 ^o 05'	2,09 ^m	M0 III	+ 1,61 ^m	0,043''
β Близнецов	7 39,2	+ 28 16	1,16	K0 III	+ 1,01	0,100
μ Близнецов	6 16,9	+ 22 34	2,76	M3 III	+ 1,75	0,016
ξ Близнецов	6 39,7	+ 13 00	3,28	F5 III	+ 0,42	0,049
α Большой Медведицы	10 57,6	+ 62 17	1,80	K0 III	+ 1,06	0,031
ϵ Большой Медведицы	12 49,6	+ 56 30	1,78	A0 V	- 0,02	0,067
μ Большой Медведицы	10 16,4	+ 42 00	3,00	M0 III	+ 1,52	0,032
γ Водолея	22 16,5	- 1 53	3,88	A0 V	- 0,07	0,038
η Волопаса	13 49,9	+ 18 54	2,70	G0 IV	+ 0,59	0,112
ϵ Волопаса	15 11,5	+ 33 41	3,50	G8 III	+ 0,95	0,028
β Ворона	12 29,1	- 22 51	2,68	G5 II	+ 0,87	0,027
ζ Геркулеса	16 37,5	+ 31 47	2,82	G0 IV	+ 0,64	0,100
η Геркулеса	16 39,5	+ 39 07	3,45	G5 III	+ 0,92	0,048
R Гидры	13 24,2	- 22 46	3,5			
γ Девы	12 36,6	- 00 54	2,75	F0 V	+ 0,35	0,095
μ Девы	14 37,8	- 05 13	3,89	F5 III	+ 0,37	0,039
ϵ Дельфина	20 28,4	+ 10 58	3,95	B5 V	- 0,12	0,012
γ Дракона	17 54,3	+ 51 30	2,22	K5 III	+ 1,52	0,022
κ Дракона	12 29,2	+ 70 20	3,84	B5 III	- 0,11	0,011
α Змееносца	17 30,3	+ 12 38	2,08	A5 III	+ 0,15	0,056
δ Кассиопеи	1 19,3	+ 59 43	2,67	A5 V	+ 0,14	0,032
σ Кормы	7 26,1	- 43 06	3,31	M0	+ 1,45	0,018
ξ Лебедя	21 01,3	+ 43 32	3,90	K5 Ib	+ 1,7	0,006
α Лиры	18 33,6	+ 38 41	0,04	A0 V	0,00	0,121
β Овна	1 49,1	+ 20 19	2,62	A5 V	+ 0,14	0,064
δ Орла	19 20,5	+ 02 55	3,37	F0 IV	+ 0,32	0,059
δ Ориона	5 26,9	- 00 22	2,19	O9 III	- 0,21	0,010
σ Ориона	5 33,7	- 02 39	3,73	O9 V	- 0,24	0,004
δ Персея	3 35,8	+ 47 28	3,03	B5 III	- 0,14	0,012
δ Скорпиона	15 54,4	- 22 20	2,30	B0 IV	- 0,14	0,011
τ Стрельца	18 10,9	- 36 47	3,17	M3 II	+ 1,50	0,024
τ^4 Эридана	3 15,1	- 22 07	3,73	M5	+ 1,58	0,009

П р и м е ч а н и е . V – видимая звездная величина звезды в системе U, B, V .

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СТРУКТУРА МИКРОМИРА.....	7
1.1. Общие характеристики элементарных частиц	7
1.2. Античастицы.....	11
1.3. Классификация элементарных частиц	12
1.3.1. Фундаментальные физические взаимодействия	12
1.3.2. Теории объединения взаимодействий.....	17
1.3.3. Классы элементарных частиц. Взаимодействие элементарных частиц	18
1.4. Нуклонный уровень	25
1.4.1. Атомное ядро. Ядерная энергия	25
1.4.2. Ядерные силы	31
1.5. Атомный уровень	38
1.5.1. Структура атома	38
1.5.2. Спектр атома водорода. Серийные формулы	39
1.5.3. Комбинационный принцип Ритца	41
1.5.4. Модель атома водорода по Бору.....	41
1.6. Молекулярный уровень	43
Контрольные вопросы.....	43
2. ФИЗИКА И ХИМИЯ МАКРОМИРА.....	45
2.1. Строение макросистем.....	45
2.2. Взаимодействие молекул и агрегатные состояния вещества.....	46
2.3. Размеры и масса молекул	50
2.4. Развитие представлений о составе, свойствах и превращениях веществ	52
2.5. Химическое равновесие. Принцип Ле Шателье	59
2.6. Энергетика химических систем. Тепловые эффекты реакций.....	61
2.7. Строение и некоторые свойства твердых тел, жидкостей и газов.....	62
2.7.1. Свойства твердых тел	62
2.7.2. Свойства жидкостей.....	68
2.7.3. Свойства газов	77
Контрольные вопросы.....	80
3. СТРУКТУРА МЕГАМИРА.....	81
3.1. Общая характеристика Вселенной	81
3.2. Космологические теории эволюции Вселенной.....	81
3.2. Виды материи и их вклад в её общую плотность Вселенной	86
3.4. Проблемы самоорганизации Вселенной	88
3.5. Антропный принцип	88
3.6. Галактики и структура Вселенной.....	89
3.6.1. Эволюция галактик	94
3.7. Звезды.....	94
3.8. Солнечная система	105
3.8.1. Общая характеристика Солнечной системы	105
3.8.2. Концепции происхождения Солнечной системы.....	106
3.8.3. Солнце	108
3.8.4. Планеты Солнечной системы.....	110
3.8.5. Кометы, астероиды, метеорное вещество.....	112

3.9. Планета Земля	113
3.9.1. Размеры и форма Земли	113
3.9.2. Внутреннее строение Земли	114
3.9.3. Минеральные ресурсы литосферы	116
3.9.4. Гидросфера	118
3.9.5. Атмосфера	122
Контрольные вопросы	126
4. ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ	128
Лабораторная работа № 1	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ К-МЕЗОНОВ	128
Лабораторная работа № 2	
ИЗУЧЕНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ	136
Лабораторная работа № 3	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ	143
Лабораторная работа № 4	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА	149
Лабораторная работа № 5	
ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ	160
Лабораторная работа № 6	
СПЕКТРЫ И СВЕТИМОСТЬ ЗВЕЗД	164
Лабораторная работа № 7	
ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ЕГО СЛЕДСТВИЯ	170
Лабораторная работа № 8	
ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА И КОНФИГУРАЦИИ ПЛАНЕТ	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	182
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	183
ПРИЛОЖЕНИЕ	184

Учебное издание

Очкина Наталья Александровна

Шумкина Анна Александровна

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ МИРОЗДАНИЯ

Учебное пособие

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.И. Грейсуха

Р е д а к т о р Н.Ю. Шалимова

В е р с т к а Н.А. Сазонова

Подписано в печать 17.03.2015. Формат 60×84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл. печ. л. 11,625. Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 80 экз.

Заказ № 187.



Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.