

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса естественно-математического направления
общеобразовательной школы

В двух частях

ЧАСТЬ 2

11

Рекомендовано Министерством образования и науки
Республики Казахстан



Алматы «Атамұра» 2020







УДК 373.167.1
ББК 22.3 я 72
Ф 50

Учебник подготовлен в соответствии с Типовой учебной программой по предмету «Физика» для 10-11 классов уровня общего среднего образования по обновленному содержанию, утвержденной Министерством образования и науки РК.

**Авторы: Р. Башарулы, К. Ш. Шункеев, Л. Н. Мясникова,
Н. Н. Жантурина, А. А. Бармина, З. К. Аймаганбетова**

Под общей редакцией Р. Башарулы

Условные обозначения:

-  – вопросы
-  – упражнения для самостоятельного решения
-  – уровневые задания
-  – задание (теоретические, практические, экспериментальные исследования)
-  – дополнительный материал
-  – углубленный материал

Ф 50 **Физика:** Учеб. для 11 кл. естеств.-математ. направл. общеобразоват. шк. В 2 ч. Ч. 2 / Р. Башарулы, К. Ш. Шункеев, Л. Н. Мясникова, Н. Н. Жантурина, А. А. Бармина, З. К. Аймаганбетова. – Алматы: Атамұра, 2020. – 208 с.

ISBN 978-601-331-734-2

Часть 2. – 2020. – 208 с.
ISBN 978-601-331-733-5

УДК 373.167.1
ББК 22.3 я 72

ISBN 978-601-331-733-5 (часть 2)
ISBN 978-601-331-734-2




© Башарулы Р., Шункеев К. Ш.,
Мясникова Л. Н., Жантурина Н. Н.,
Бармина А. А., Аймаганбетова З. К., 2020
© «Атамұра», 2020

Глава 7



ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  сопоставлять принцип относительности Эйнштейна с принципом относительности Галилея;
-  объяснять релятивистские эффекты, используя постулаты Эйнштейна и преобразования Лоренца при решении задач;
-  объяснять принцип действия ускорителей заряженных частиц с учетом имеющих место в них релятивистских эффектов.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
салыстырмалылық принципі	принцип относительности	relativity principle
Максвелл заңдары	законы Максвелла	Maxwell laws
релятивистік заң	релятивистский закон	relativistic law
Эйнштейн формуласы	формула Эйнштейна	Einstein formula
Эйнштейн постулаттары	постулаты Эйнштейна	Einstein postulates
тыныштық энергиясы	энергия покоя	rest energy
тыныштық массасы	масса покоя	rest mass
Майкельсон интерферометрі	интерферометр Майкельсона	Michelson interferometer

В данной главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «принцип относительности», «законы Максвелла», «релятивистский закон», «формула Эйнштейна», «постулаты Эйнштейна», «энергия покоя», «масса покоя», «интерферометр Майкельсона».

§ 7.1

Принцип относительности в механике и электродинамике

1. После того как во второй половине XIX века Максвеллом были сформулированы основные законы электродинамики, возник вопрос, распространяется ли принцип относительности, справедливый для механических явлений, и на электромагнитные явления.

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно было выяснить, меняются ли основные законы электродинамики при переходе от одной инерциальной системы к другой или же подобно законам Ньютона они остаются неизменными. Можно отбросить сомнения в справедливости принципа относительности Галилея применительно к электромагнитным процессам и рассматривать этот принцип как общий закон природы.

Согласно *преобразованиям Галилея* и его *принципу относительности* все законы ньютоновской механики сохраняются во всех инерциальных системах отсчета. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что законы электродинамики также одинаково сохраняются во всех инерциальных системах.

Кроме того, этими экспериментальными исследованиями (опыты Майкельсона и Морли, Трутона и Нобла) было установлено, что скорость света ($c = 300\,000$ км/с) остается постоянной во всех инерциальных системах независимо от их скорости движения. Однако это обстоятельство противоречило преобразованиям Галилея.

Для убедительности возникающего противоречия рассмотрим две инерциальные системы K и K_1 (рис. 7.1.1). Система K_1 движется относительно K с постоянной скоростью v . Пусть материальная точка (тело) движется в системе K со скоростью v_0 . Тогда в системе K_1 (согласно преобразованиям Галилея, где время является абсолютной величиной) скорость и координаты тела имеют следующий вид:

$$v' = v_0 + v; \quad x' = x + vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t. \quad (7.1)$$

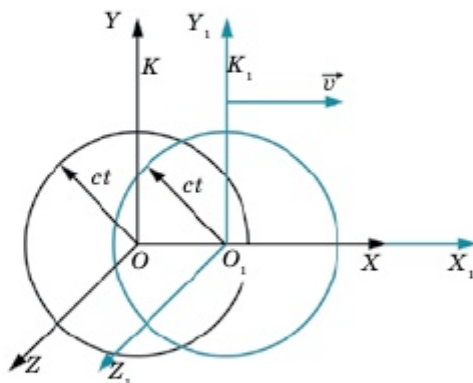


Рис. 7.1.1. Движение инерциальной системы K_1 относительно неподвижной инерциальной системы K

Согласно преобразованиям Галилея свет, движущийся в системе K со скоростью $v_0 = c$, в системе K_1 (в зависимости от ее направления движения по оси OX) будет иметь скорость $v' = c + v$ или $v' = c - v$. Из этого вытекает следующий вывод: согласно преобразованиям Галилея свет со скоростью c движется только в одной инерциальной системе, а в других системах движется с другими скоростями. Это противоречит и законам электродинамики, и результатам экспериментальных исследований. В конце XIX и начале XX века ученые искали пути решения этого глубочайшего противоречия.

Для того чтобы скорость света оставалась неизменной во всех инерциальных системах, А. Эйнштейн предложил смелую идею, отбросившую абсолютную неизменность пространства и времени, которая являлась одним из канонов классической физики. Эта идея вошла в историю развития физики под названием *постулаты теории относительности Эйнштейна*.

2. Постулаты теории относительности. Для объяснения отрицательных результатов опыта Майкельсона и других опытов, которые должны были обнаружить движение Земли относительно эфира, вводились различные гипотезы. С помощью этих гипотез пытались объяснить, почему не удается обнаружить преимущественную систему отсчета (считали, что такая система в действительности якобы имеется).



Альберт Эйнштейн (1879–1955). Им создано новое учение о пространстве и времени – специальная теория относительности. Обобщая эту теорию на случай неинерциальных систем отсчета, Эйнштейн построил общую теорию относительности, представляющую собой современную теорию тяготения.

А. Эйнштейн впервые ввел представление о частицах света – фотонах. Его работа по теории броуновского движения привела к окончательной победе молекулярно-кинетической теории строения вещества.

По-иному подходу к этой проблеме, Эйнштейн утверждал: не следует изобретать различные гипотезы для объяснения отрицательных результатов всех попыток обнаружить различие между инерциальными системами. Законом природы является полное равноправие всех инерциальных систем отсчета в отношении не только механических, но и электромагнитных процессов. Нет никакого различия между состоянием покоя и состоянием равномерного прямолинейного движения.

Принцип относительности – главный постулат теории Эйнштейна. Его можно сформулировать так: *все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета*.

Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

Но теория относительности основывается не только на принципе относительности. Имеется еще **второй постулат: скорость света в вакууме одинакова для всех**

инерциальных систем отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала.

Скорость света занимает, таким образом, особое положение. Более того, как вытекает из постулатов теории относительности, скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи взаимодействий в природе.

Для того чтобы решиться сформулировать постулаты теории относительности, нужна была большая научная смелость, так как они противоречили классическим представлениям о пространстве и времени.

В самом деле, допустим, что в момент времени, когда начала координат инерциальных систем отсчета K и K_1 , движущихся друг относительно друга со скоростью \vec{v} , совпадают, в начале координат происходит кратковременная вспышка света. За время t системы сместятся друг относительно друга на расстояние vt . Следовательно, с позиции классической теории Гюйгенса волновые фронты света, исходящие из точек O и O_1 , имели бы кривизну с различными радиусами; тогда как, согласно теории относительности Эйнштейна, они имеют одинаковую сферическую волновую поверхность с радиусом $R = ct$ (рис. 7.1.1).

Возникшее противоречие не исходит из самой теории относительности, а возникает вследствие классического представления об абсолютной неизменности пространства и времени. В действительности размеры и пространства, и времени претерпевают существенные изменения при больших скоростях, близких к скорости света. Следовательно, все классические законы пригодны лишь для объяснения процессов, протекающих с малой скоростью; а для объяснения происходящих процессов при скоростях, близких к скорости света, проявляют противоречие и становятся непригодными.



Вопросы

1. Что объясняет теория относительности?
2. Уместен ли принцип относительности только для механических процессов или выполняется и для других явлений?
3. Одинаковы ли во всех инерциальных системах отсчета электромагнитные процессы? Какова скорость распространения электромагнитных волн в вакууме?
4. В чем заключается противоречие принципа относительности Галилея с электродинамикой?
5. Каковы основные идеи и результаты опыта Майкельсона – Морли?
6. Как формулируются постулаты теории относительности?
7. Какова роль теории относительности в современной научной физике?



Задание (теоретический анализ)

Неподвижный наблюдатель 1 (рис. 7.1.2) увидел, что одновременно зажглись фонари. Были ли эти два события одновременными для наблюдателей 2 и 3?

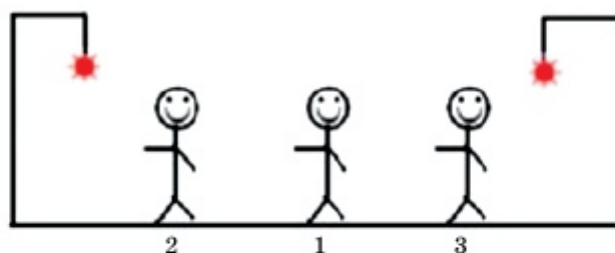


Рис. 7.1.2

Результаты анализа оформите письменно в виде реферата.

§ 7.2

Преобразования Лоренца

1. Несостоятельность представления об абсолютности пространства и времени. До начала XX века никто не сомневался, что время абсолютно. Два события, одновременные для жителей Земли, считались одновременными для жителей любой космической цивилизации. Создание теории относительности показало, что это не так. Представление об абсолютном времени, которое течет раз и навсегда заданным темпом, совершенно независимо от материи и ее движения, оказывается неправильным.

Причиной несостоятельности классических представлений о пространстве и времени является неправильное представление, утверждающее возможность мгновенной передачи взаимодействия и сигнала из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействия вызывает необходимость глубокого изменения обычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте.

Если допустить мгновенное распространение сигналов, то утверждение, что события в двух пространственно разделенных точках A и B произошли одновременно, будет иметь абсолютный смысл. Можно поместить в точки A и B часы, и сигнал отправлен из A , например, в 0 ч 45 мин, и он в этот же момент времени по часам B пришел в точку B , то, значит, часы показывают одинаковое время, т.е. идут синхронно. Если же такого совпадения нет, то часы можно синхронизировать, подведя вперед те часы, которые показывают меньшее время в момент отправления сигнала.

Только располагая в точках A и B синхронизированными часами, можно судить о том, произошли ли два каких-либо события в этих точках одновременно или нет. Но как можно синхронизировать часы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, если скорость распространения сигналов не бесконечно велика?

Для синхронизации часов естественно прибегнуть к световым или вообще к электромагнитным сигналам, так как скорость электромагнитных волн в вакууме является строго определенной, постоянной величиной.

Рассмотрим подробнее простой метод синхронизации часов, не требующий никаких вычислений. К примеру, космонавт хочет узнать, одинаково ли идут часы A и B , установленные на противоположных концах космического корабля (рис. 7.2.1). Для этого с помощью источника, неподвижного относительно корабля и расположенного в его середине, космонавт производит вспышку света. Свет одновременно достигает и тех, и других часов. Если показания часов в этот момент одинаковы, то часы идут синхронно.

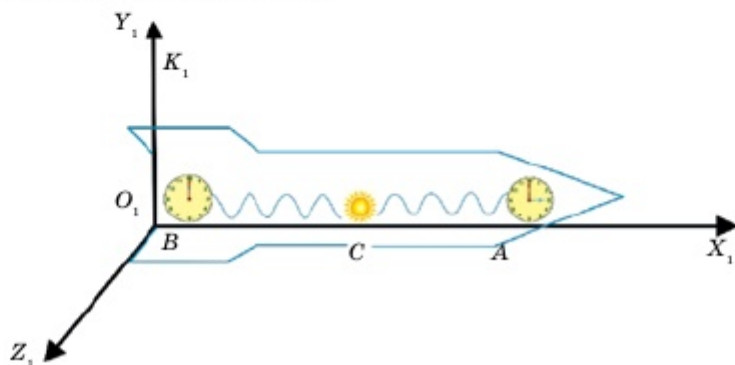


Рис. 7.2.1. Часы на космическом корабле

Но так будет лишь относительно системы отсчета K_1 , связанной с кораблем. В системе же отсчета K , относительно которой движется корабль, положение иное. Часы на носу корабля удаляются от того места, где произошла вспышка света источника (точка с координатой OC), и, чтобы достигнуть часов A , свет должен преодолеть расстояние, которое больше половины длины корабля (рис. 7.2.2, а, б). В то время как часы B на корме приближаются к месту вспышки, и путь светового сигнала меньше половины длины корабля. (На рис. 7.2.2, а координаты X и X_1 совпадают в момент вспышки; на рис. 7.2.2, б показано положение систем отсчета, когда свет достигает часов B .) Поэтому наблюдатель в системе K придет к правильному выводу, что сигналы достигают и тех, и других часов неодновременно.

Два любых события в точках A и B , одновременные в системе K_1 , не одновременны в системе K . Но в силу принципа относительности системы K и K_1 совершенно равноправны. Ни одной из этих систем нельзя отдать предпочтение. Поэтому мы вынуждены прийти к заключению, что **одновременность пространственно разделенных событий относительна. Причиной относительности является, как мы видим, конечность скорости распространения сигналов.**

Именно в относительности одновременности кроется решение парадокса со сферическими световыми сигналами, о котором шла речь в § 7.1. Свет одновременно достигает точек сферической поверхности с центром в точке O только с точки зрения наблюдателя, находящегося в покое относительно системы K .

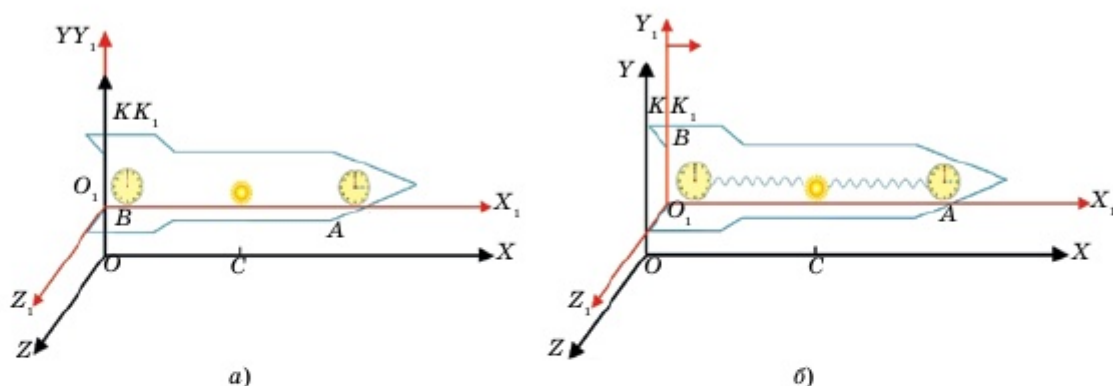


Рис. 7.2.2. Относительность одновременности в двух инерциальных системах

С точки зрения же наблюдателя, связанного с системой K_1 , свет достигает этих точек в разные моменты времени. Разумеется, справедливо и обратное: в системе K свет достигает точек поверхности сферы с центром O_1 в различные моменты времени, а не одновременно, как это представляется наблюдателю в системе K_1 . Следовательно, **одновременность событий – понятие относительное**.

Отсюда следует, что никакого парадокса в действительности нет. Одновременность событий относительна. Представить себе это наглядно, «почувствовать» мы не в состоянии из-за того, что скорость света много больше тех скоростей, с которыми движемся мы.

2. Основные следствия, вытекающие из постулатов теории относительности.

Из постулатов теории относительности вытекает ряд важнейших следствий, касающихся свойств пространства и времени. Эти следствия получены в результате приложения **математических преобразований Лоренца** к физическим явлениям.

Относительность расстояний вытекает из утверждения о том, что пространство не является абсолютной величиной, а размеры тел в нем зависят от скорости движения тела относительно данной системы отсчета. Действительно, если обозначим через l_0 длину стержня в системе отсчета K , относительно которой он покоится, то его длина l в системе отсчета K_1 , относительно которой стержень движется со скоростью \vec{v} , определяется формулой:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (7.2)$$

Как видно из этой формулы, $l < l_0$. В этом состоит релятивистское сокращение размеров тела в движущихся системах отсчета.

Относительность промежутков времени вытекает из утверждения о том, что время не является абсолютной величиной, а зависит от скорости движения тел. Пусть интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке инерциальной системы K , равен τ_0 . Этими событиями, например, могут быть два удара метронома, отсчитывающего секунды. Тогда

интервал τ между этими же событиями в системе отсчета K_1 , движущейся относительно системы K со скоростью \vec{v} , выражается так:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.3)$$

Очевидно, что $\tau > \tau_0$. В этом состоит *релятивистский эффект* замедления времени в движущихся системах отсчета.

Если $v \ll c$, то в формулах (7.2) и (7.3) можно пренебречь величиной $\frac{v^2}{c^2}$. Тогда $l \approx l_0$ и $\tau \approx \tau_0$, которые напоминают галилеевские преобразования с абсолютизацией времени (7.1). Это говорит о том, что при малых скоростях преобразования Галилея остаются в силе.

3. Релятивистский закон сложения скоростей. Новым релятивистским представлениям о пространстве и времени соответствует новый закон сложения скоростей. Очевидно, что классический закон сложения скоростей Галилея при скоростях, близких к световой, не может быть справедлив, так как он противоречит утверждению о постоянстве скорости света в вакууме.

Если поезд движется со скоростью \vec{v} и в вагоне в направлении движения поезда распространяется световая волна, то ее скорость относительно Земли, согласно второму постулату Эйнштейна, должна равняться опять-таки \vec{c} , а не $\vec{v} + \vec{c}$, как предписывает классический закон. Новый закон сложения скоростей и должен приводить к требуемому результату, т.е. постоянству скорости c в любой системе отсчета в любой инерциальной системе отсчета.

Мы запишем новый закон сложения скоростей для частного случая, когда тело движется вдоль оси X_1 системы отсчета K_1 , которая в свою очередь движется со скоростью \vec{v} относительно системы отсчета K . Причем в процессе движения координатные оси X и X_1 все время совпадают, а координатные оси Y и Y_1 , Z и Z_1 остаются параллельными (рис. 7.2.3).

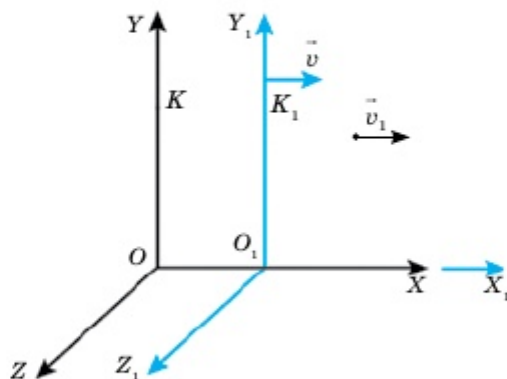


Рис. 7.2.3. Скорости в двух системах отсчета

Обозначим скорость тела относительно K_1 через v_1 , а скорость этого же тела относительно K через v_2 . Тогда *релятивистский закон сложения скоростей* будет иметь вид:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}. \quad (7.4)$$

Если $v \ll c$ и $v_1 \ll c$, то членом $\frac{v_1 v}{c^2}$ в знаменателе можно пренебречь, и вместо (7.4) получим классический закон сложения скоростей Галилея (7.1):

$$v_2 = v_1 + v.$$

Следовательно, при малых скоростях закон сложения скоростей Галилея также остается в силе.

4. Замечательным свойством релятивистского закона сложения скоростей, полученного на основе преобразований Лоренца, является то, что при любых скоростях v_1 и v (конечно, не больших c) результирующая скорость v_2 не превышает c . Действительно, при $v_1 = c$ скорость v_2 также равна c , как этого требуют экспериментальные данные и второй постулат теории относительности:

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c \frac{c + v}{c + v} = c.$$

Таким образом, преобразования Лоренца позволяют объективно описывать события, происходящие при больших скоростях, доказывая при этом, что скорость света остается неизменной во всех инерциальных системах отсчета.

Релятивистский закон сложения скоростей справедлив, но не нагляден. Представьте себе большую космическую ракету, движущуюся относительно Земли со скоростью, близкой к скорости света c . С нее стартует малая ракета и приобретает скорость, близкую к c относительно большой ракеты. Однако скорость малой ракеты относительно Земли окажется почти такой же, как и большой.



Вопросы

1. В чем кроется причина возникновения неверного представления об абсолютности пространства и времени? На каком экспериментальном результате основан отказ от абсолютизации пространства и времени?
2. Какие следствия вытекают из теории относительности? Какими формулами эти следствия выражаются? В чем их физический смысл?
3. В чем сходство и отличие принципов (постулатов) относительности Галилея и Эйнштейна?
4. Какова роль преобразований Лоренца в теории относительности Эйнштейна?





Задание (теоретический анализ)



1. Какую скорость должно иметь движущееся тело, чтобы его предельные размеры уменьшились в 2 раза?



2. С какой скоростью должен двигаться космический корабль относительно Земли, чтобы часы на нем шли в 4 раза медленнее, чем на Земле?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. При какой скорости движения релятивистское сокращение длины движущегося тела составит 25%?

Д а н о:

$$\frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \frac{l}{l_0} = 0,25$$

$v = ?$

Р е ш е н и е:

Релятивистское сокращение выражается формулой:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (1)$$

Из условия задачи следует, что $\frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \frac{l}{l_0} = 0,25$,

$$\text{отсюда } l = 0,75l_0. \quad (2)$$

Подставив формулы (2) в выражение (1), получим $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,75$.

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = 0,5625; \quad v = \sqrt{c^2 (1 - 0,5625)} = 1,98 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}.$$

О т в е т: $v = 1,98 \cdot 10^8$ (м/с).

Задача 2. В некоторой инерциальной системе отсчета K частица A покоится, а частица B удаляется от нее со скоростью $0,2c$. С какой скоростью должна двигаться другая инерциальная система отсчета K_1 относительно первой, чтобы обе частицы удалялись от нее с одинаковой по модулю скоростью, но в противоположных направлениях?

Д а н о:

$$v = 0,2c$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$v_0 = ?$

Р е ш е н и е:

$$\text{Из условия задачи следует: } \frac{-v_1 + v_0}{1 + \frac{v_1 v_0}{c^2}} = 0, \text{ откуда } v_1 = v_0. \quad (1)$$

Релятивистское сложение выражается формулой:

$$v = \frac{v_1 + v_0}{1 + \frac{v_1 v_0}{c^2}}. \quad (2)$$

$$\text{С учетом (1) выражение (2) примет вид: } v = \frac{2v_0}{1 + \frac{v_0^2}{c^2}}. \quad (3)$$

Определить из (3) искомую скорость v_0 :

$$v + \frac{v}{c^2} v_0^2 = 2v_0; \quad \frac{v}{c^2} v_0^2 - 2v_0 + v = 0.$$

$$\text{Отсюда } v_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{\frac{v}{c^2}} \quad \text{или} \quad v_0 = \frac{c^2}{v} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right).$$

$$\text{С учетом условия } v_0 = \frac{c^2}{0,2c} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0,04c^2}{c^2}} \right) = 0,1 c \text{ (м/с).}$$

Произведем вычисление:

$$v_0 = 0,1 \cdot 3 \cdot 10^8 = 3 \cdot 10^7 \text{ (м/с).}$$

О т в е т: $v_0 = 3 \cdot 10^7 \text{ (м/с).}$



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 7.2.1. Какую скорость должно иметь движущееся тело, чтобы его продольные размеры уменьшились в два раза? (Ответ: $2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$)
- 7.2.2. Две частицы, расстояние между которыми составляет 10 м, летят навстречу друг другу со скоростью 0,6 с. Через какое время произойдет соударение? (Ответ: через $3,77 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$)
- 7.2.3. Две частицы удаляются друг от друга со скоростью 0,8 с относительно земного наблюдателя. Какова относительная скорость частиц? (Ответ: 0,976 с.)

Уровень В

- 7.2.4. Две частицы в некоторый момент времени находятся на расстоянии 1 км друг от друга и движутся навстречу друг другу со скоростями 0,4 с и 0,6 с. Через какое время они столкнутся? (Ответ: через 4 мкс.)
- 7.2.5. Чему равна скорость одной инерциальной системы отсчета относительно другой, если скорость частицы относительно одной системы равна 0,5 с, а ее же скорость относительно другой инерциальной системы отсчета составляет 0,3 с, где с – скорость света в вакууме? (Ответ: $7 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$)
- 7.2.6. Какое время пройдет на Земле, если в космическом корабле, движущемся со скоростью 0,8 с относительно Земли, пройдет 21 год? (Ответ: 35 лет.)

Уровень С

- 7.2.7. Три частицы движутся в одном направлении вдоль одной прямой в инерциальной системе отсчета. Скорость первой частицы относительно второй $v_{12} = 0,2 \text{ с}$, скорость второй частицы относительно третьей $v_{23} = 0,5 \text{ с}$. Скорость третьей частицы относительно этой системы отсчета $v_3 = 0,7 \text{ с}$. Чему равны скорости первой частицы v_1 и второй v_2 относительно системы отсчета, в которой они движутся? (Ответ: 0,89 с; 0,93 с.)

- 7.2.8. Звездный корабль, движущийся со скоростью $0,8 c$, путешествовал 10 лет по часам космонавтов. На сколько земляне будут старше космонавтов, когда корабль вернется на Землю? (*Ответ:* на 6,7 лет.)
- 7.2.9. Космический корабль удаляется от Земли с относительной скоростью $0,75 c$, а затем с него стартует ракета (в направлении от Земли) со скоростью $0,75 c$ относительно корабля. Чему равна скорость ракеты относительно Земли? (*Ответ:* $0,96 c$.)
- 7.2.10. С какой скоростью будет двигаться космический корабль относительно Земли, принятой за неподвижную систему отсчета, если ход времени на корабле замедлится в два раза с точки зрения земного наблюдателя? (*Ответ:* $2,6 \cdot 10^8$ м/с.)

§ 7.3

Энергия, импульс и масса в релятивистской динамике

1. Законы механики Ньютона при больших скоростях движения не согласуются с новыми пространственно-временными представлениями. Покажем это на примере второго закона Ньютона:

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (7.5)$$

Согласно второму закону Ньютона (7.5) постоянная сила, действуя на тело продолжительное время, может сообщить телу сколь угодно большую скорость. Но в действительности скорость света в вакууме является предельной, и ни при каких условиях тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Следовательно, для того чтобы преодолеть это противоречие, требуется изменение уравнения Ньютона. Для этого перейдем к той форме записи второго закона динамики, которой пользовался сам Ньютон:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \quad (7.6)$$

где $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс тела.

В уравнениях Ньютона масса тела считалась независимой от его скорости, постоянной величиной. Однако *при увеличении скорости тела, как показывают результаты экспериментальных исследований, его масса не остается постоянной, а растет.*

2. Зависимость массы от скорости можно найти, исходя из предположения, что закон сохранения импульса справедлив и при новых представлениях о пространстве и времени. Не прибегая к сложным математическим вычислениям, приведем лишь конечный результат. Если через m_0 обозначить массу покоящегося

тела, то масса m того же тела, но движущегося со скоростью \vec{v} , определяется формулой (рис. 7.3.1):

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.7)$$

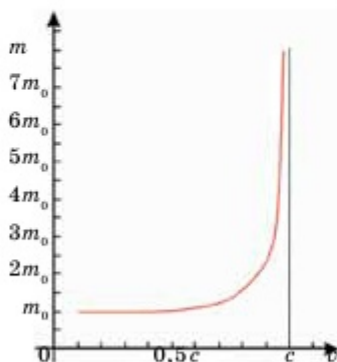


Рис. 7.3.1. График зависимости массы тела от его скорости

При скоростях движения, много меньших скорости света, выражение $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ чрезвычайно мало отличается от единицы. Так, при скорости современной космической ракеты $v \approx 10$ км/с получим следующее значение:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,99999999944 \approx 1.$$

Поэтому неудивительно, что заметить увеличение массы с ростом скорости при таких сравнительно небольших скоростях движения невозможно.

3. Элементарные частицы в современных ускорителях заряженных частиц достигают огромных скоростей. Если скорость частицы всего лишь на 90 км/с меньше скорости света, то ее масса увеличивается в 40 раз. Мощные ускорители для электронов способны разгонять эти частицы до скоростей, которые меньше скорости света лишь на 35–50 м/с. При этом масса электрона возрастает примерно в 2000 раз. Чтобы такой электрон удерживался на круговой орбите, на него со стороны магнитного поля должна действовать сила, в 2000 раз большая, чем можно было бы предполагать, не учитывая зависимости массы от скорости. Как видно, для расчета траекторий быстрых частиц пользоваться механикой Ньютона уже нельзя. В этой связи с учетом соотношения (7.7) импульс тела определяется по формуле:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{p}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.8)$$

Основной же закон релятивистской динамики записывается в прежней форме:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (7.9)$$

Однако импульс тела здесь определяется формулой (7.8), а не просто произведением $m_0 \vec{v}$.

Таким образом, масса, считавшаяся со времен Ньютона неизменной, в действительности зависит от скорости.

По мере увеличения скорости движения масса тела, определяющая его инертные свойства, увеличивается. При $v \rightarrow c$ масса тела в соответствии с уравнением (7.7) возрастает неограниченно ($m \rightarrow \infty$). Поэтому ускорение стремится к нулю и скорость практически перестает возрастать, как бы долго ни действовала сила.

Необходимость пользоваться релятивистским уравнением движения при расчете ускорителей заряженных частиц означает, что теория относительности в наше время стала инженерной наукой.

Законы механики Ньютона можно рассматривать как частный случай релятивистской механики, справедливый при скоростях движения тел, много меньших скорости света.

Релятивистское уравнение движения, учитывающее зависимость массы от скорости, применяется при конструировании *ускорителей элементарных частиц* и других релятивистских приборов.

Ускорителями заряженных частиц называются устройства, в которых под управляемым действием электрических и магнитных полей разгоняют заряженные частицы (электроны, протоны и т.д.) до высоких энергий.

В основе работы ускорителя заложен принцип взаимодействия заряженных частиц с электрическим и магнитным полями. Электрическое поле способно напрямую совершать работу над частицей, т.е. увеличивать ее энергию. Магнитное же поле, создавая силу Лоренца, только отклоняет частицу, не изменяя ее энергии, и задает орбиту, по которой движутся частицы.

Ускорители делятся на *непрерывные* (из них выходит равномерный во времени пучок) и *импульсные* (из них частицы вылетают порциями – импульсами). По форме траектории и механизму ускорения частиц ускорители делятся на *линейные* (траектории близки к прямым линиям), *циклические* и *индукционные* (траекториями являются окружности или спирали), которые носят соответствующие названия: **1) линейный ускоритель; 2) линейный резонансный ускоритель; 3) циклотрон; 4) фазотрон; 5) синхротрон; 6) синхрофазотрон; 7) бетатрон.**

В фазотронах, синхротронах и синхрофазотронах частицы ускоряются до релятивистских скоростей, т.е. до скоростей, близких к скорости света.

**Вопросы**

1. Какой вывод вытекает из основного закона ньютоновской механики относительно скорости тела? Соответствует ли этот вывод экспериментальным данным?
2. Каковы график зависимости и аналитическая формула зависимости массы от скорости?
3. Как изменится релятивистская масса тела при возрастании скорости его движения? Как изменяется релятивистская масса при нагревании тела?
4. В чем заключается смысл закона сохранения импульса в ньютоновской и релятивистской механике? Какими формулами закон сохранения импульса описывается в классической и релятивистской механике?
5. Какие установки называются ускорителями? Какие процессы лежат в основе работы ускорителей?

**Задание (теоретический анализ)**

1. При какой скорости масса движущегося электрона вчетверо больше массы покоящегося электрона?
2. При какой скорости релятивистская масса тела возрастает в два раза?
3. Какую скорость должно иметь тело, чтобы его плотность увеличилась в пять раз?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Ракета движется относительно неподвижного наблюдателя со скоростью $0,99c$ (c – скорость света в вакууме). Какое время пройдет по часам неподвижного наблюдателя, если по часам, движущимся вместе с ракетой, прошел один год? Как изменяются линейные размеры тел в ракете (по линии движения) для неподвижного наблюдателя? Как изменится для этого наблюдателя плотность вещества в ракете?

Д а н о:
 $v = 0,99c$
 $\tau_0 = 1$ год

Р е ш е н и е:

Время, прошедшее по часам неподвижного наблюдателя, найдем по формуле:

$\tau - ?$
 $l - ?$
 $\rho - ?$

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

Размеры тел (вдоль линии движения) найдем из соотношения:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2)$$

Плотность вещества в ракете для неподвижного наблюдателя найдем по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ где } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ и } V = lS.$$

$$V = l_0 S \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

$$\rho = \frac{m_0}{l_0 S \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{V_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{\rho_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Найдем время, прошедшее по часам неподвижного наблюдателя:

$$\tau = \frac{1,00}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,99c}{c}\right)^2}} \approx 7,1 \text{ (год)}.$$

Определим длину тел вдоль линии движения:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{0,99c}{c}\right)^2} \approx 0,14 l_0 \text{ (м)}.$$

Найдем плотность вещества в ракете для неподвижного наблюдателя:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \left(\frac{0,99c}{c}\right)^2} = \frac{\rho_0}{0,0199} \approx 50,25 \rho_0 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

О т в е т: $\tau \approx 7,1$ (год); $l \approx 0,14 l_0$ (м); $\rho \approx 50,25 \rho_0$ (кг/м³).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 7.3.1. Какова длина метрового стержня (для земного наблюдателя), движущегося со скоростью $0,6c$? (Ответ: 0,8 м.)
- 7.3.2. Если скорость $0,8c$, определите отношение массы движущего тела к массе покоящегося тела. (Ответ: в 1,67 раза больше.)
- 7.3.3. Длина линейки, неподвижной относительно земного наблюдателя, равна 2 м. Какова длина этой же линейки, движущейся со скоростью, равной $0,5c$? (Ответ: 1,73 м.)

Уровень В

- 7.3.4. Масса покоя частицы равна 1 г. Для наблюдателя определите массу движущейся частицы со скоростями $0,1c$ и $0,9c$. (Ответ: 1 г; 2,29 г.)

- 7.3.5. В ракете, движущейся со скоростью $0,96 c$, было зафиксировано время полета – один год. Сколько времени должно пройти по подсчетам земного наблюдателя? (*Ответ: 3,57 года.*)
- 7.3.6. Какую скорость должно приобрести тело, чтобы его продольные размеры уменьшились для наблюдателя в три раза? До этого тело покоилось относительно данного наблюдателя. (*Ответ: $2,8 \cdot 10^8$ м/с.*)
- 7.3.7. Какой промежуток времени пройдет на звездолете, движущемся относительно Земли со скоростью, равной $0,4$ скорости света, за 25 земных лет? (*Ответ: 23 года.*)

Уровень С

- 7.3.8. Во сколько раз увеличивается время жизни нестабильной частицы, если она движется со скоростью $0,99 c$? (*Ответ: в 7,1 раза.*)
- 7.3.9. Собственное среднее время жизни одной из нестабильных элементарных частиц (время, измеренное в системе отсчета, в которой эта частица покоится) равно $2,2$ мкс. Пучок таких частиц движется со скоростью $0,95 c$. Какова средняя длина их пробега в отсутствие столкновений? (*Ответ: 2 км.*)

§ 7.4**Закон взаимосвязи массы и энергии для материальных тел**

1. Перейдем теперь к важнейшему следствию теории относительности, играющему одну из главных ролей в ядерной физике и физике элементарных частиц. Речь пойдет об универсальной связи между энергией и массой.

Формула Эйнштейна. С помощью теории относительности Эйнштейн установил замечательную по своей простоте и общности формулу связи между энергией и массой:

$$E = mc^2. \quad (7.10)$$

Энергия тела или системы тел равна их массе, умноженной на квадрат скорости света.

Формулу (7.10) с учетом (7.7) можно записать в такой форме:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.10')$$

Если изменяется энергия системы на величину ΔE , то на величину Δm изменяется и ее масса:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (7.11)$$

Коэффициент $\frac{1}{c^2}$ очень мал, поэтому заметные изменения массы возможны лишь при очень больших изменениях энергии. При химических реакциях или при нагревании тел в обычных условиях изменения энергии настолько малы, что соответствующие изменения масс не удастся обнаружить на опыте. Например, горячий чайник имеет большую массу, чем холодный; но даже с помощью самых чувствительных весов эта разность не может быть обнаружена. Лишь при превращениях атомных ядер и элементарных частиц изменения энергии оказываются настолько большими, что изменение массы уже заметно.

2. Энергия покоя. Согласно формуле (7.10) тело обладает энергией и при скорости, равной нулю. Энергия тела при его нулевой скорости называется *энергией покоя* и обозначается знаком E_0 :

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (7.12)$$

При превращениях элементарных частиц, у которых $m_0 = 0$, энергия покоя целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц. Этот факт, установленный в ядерной физике, является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

В физике известны лишь две «великие формулы», чрезвычайно простые и краткие по форме и всеобъемлющие по содержанию. Одна из них – формула Эйнштейна: $E = mc^2$, другая – формула Планка: $E = h\nu$, с которой познакомимся в следующей главе.



Вопросы



1. Какова аналитическая формула взаимосвязи массы и энергии? В чем ее физическая сущность? Приведите примеры ее экспериментального подтверждения.
2. Какая энергия называется энергией покоя?
3. Обладает ли энергией частица, у которой масса покоя равна нулю?
4. Обладает ли массой движущаяся частица, у которой масса покоя равна нулю? Как можно определить такую массу?



Задание (теоретический анализ)

1. На сколько уменьшится масса 10 кг воды при замерзании?
2. При какой скорости движения частицы ее кинетическая энергия равна энергии покоя?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Электрон движется со скоростью 0,8 с. Масса покоя электрона составляет $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Определите: 1) энергию покоя электрона; 2) массу электрона; 3) полную энергию электрона; 4) кинетическую энергию электрона.

Д а н о:	Р е ш е н и е:
$m_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	1. Энергию покоя электрона найдем по формуле:
$v = 0,8 c$	$E_0 = m_0 c^2;$
$E_0 - ?$	$E_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг $\cdot 9 \cdot 10^{16}$ м ² /с ² $\approx 8,2 \cdot 10^{-14}$ Дж.
$m - ?$	Выразим энергию электрона в электрон-вольтах,
$E - ?$	учитывая, что 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.
$E_k - ?$	$E_0 \approx \frac{8,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} \approx 5,12 \cdot 10^5 \text{ эВ} \approx 0,51 \text{ МэВ}.$

2. Массу движущегося электрона найдем из соотношения:

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

$$m = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{0,6} \approx 1,52 \cdot 10^{-30} \text{ кг}.$$

3. Полную энергию электрона найдем по формуле:

$$E = mc^2;$$

$$E \approx 1,52 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \approx 13,7 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

4. Из формулы $E = E_0 + E_k$ найдем кинетическую энергию электрона:

$$E_k = E - E_0.$$

$$E_k \approx 13,7 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} - 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \approx 5,5 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

О т в е т: $E_0 \approx 8,2 \cdot 10^{-14}$ Дж или $E_0 \approx 0,51$ МэВ;

$m \approx 1,52 \cdot 10^{-30}$ кг; $E \approx 13,7 \cdot 10^{-14}$ Дж; $E_k \approx 5,5 \cdot 10^{-14}$ Дж.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 7.4.1. Чему равна скорость частицы, если ее кинетическая энергия равна $0,25mc^2$? (Ответ: $1,8 \cdot 10^8$ м/с.)
- 7.4.2. Масса совокупности двух безмассовых частиц, движущихся с противоположными и равными по абсолютной величине импульсами, равна m . Чему равна энергия E каждой частицы в отдельности? (Ответ: $0,5mc^2$.)

- 7.4.3. Какому изменению массы соответствует изменение энергии на 4,19 Дж?
(*Ответ:* $4,66 \cdot 10^{-17}$ кг.)

Уровень В

- 7.4.4. Солнце излучает в пространстве каждую секунду около $3,75 \cdot 10^{26}$ Дж энергии. На сколько каждую секунду уменьшается масса Солнца? (*Ответ:* $4,2 \cdot 10^9$ кг.)
- 7.4.5. На сколько увеличится масса пружины жесткостью 10 кН/м при ее растяжении на 3 см? (*Ответ:* $5 \cdot 10^{-17}$ кг.)

Уровень С

- 7.4.6. Релятивистская частица массой m , покоящаяся относительно инерциальной системы отсчета, самопроизвольно распадается на две движущиеся частицы с массами m_1 и m_2 . Определите энергии E_1 и E_2 образовавшихся частиц.

$$(\text{Ответ: } E_1 = \frac{c^2 (m^2 + m_1^2 - m_2^2)}{2m}; E_2 = \frac{c^2 (m^2 - m_1^2 + m_2^2)}{2m}.)$$

- 7.4.7. Покоящаяся частица массой m_1 поглощает безмассовую частицу с энергией E . Чему равна масса m_2 вновь возникшей частицы? (*Ответ:*

$$m_2 = \sqrt{m_1 \left(m_1 + \frac{2E}{c^2} \right)}.)$$

- 7.4.8. Во сколько раз релятивистская масса протона больше релятивистской массы электрона, если обе частицы имеют одинаковую кинетическую энергию 1 ГэВ? (*Ответ:* \approx в 1,94 раза.)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 7

- Постулаты теории относительности Эйнштейна:

1) *все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета;*

2) *скорость света в вакууме для всех инерциальных систем остается одинаковой; она не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости приемника.*

- *Масса релятивистской частицы:*

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

- *Релятивистский импульс тела:*

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

- *Закон релятивистской динамики записывается в той же форме, что и второй закон Ньютона:*

$$\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

- *Связь между массой и энергией тела:*

$$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$


















- $E_0 = m_0c^2$ называется *энергией покоя*, а m_0 – *массой покоя*.

Глава 8



АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  классифицировать источники и виды излучений;
-  описывать принцип действия спектральных аппаратов и область их применения;
-  различать электромагнитные излучения по природе их возникновения и взаимодействию с веществом;
-  применять законы Стефана – Больцмана, Вина и формулу Планка для описания теплового излучения абсолютно черного тела и обоснования ультрафиолетовой катастрофы;
-  объяснять природу фотоэффекта и приводить примеры его применения;
-  использовать законы фотоэффекта и уравнение Эйнштейна при решении задач;
-  объяснять природу светового давления на основе квантовой теории света;
-  описывать химическое действие света на примере фотосинтеза и процессов в фотографии;
-  сравнивать компьютерную и магнитно-резонансную томографии;
-  приводить доказательные примеры проявления корпускулярной и волновой природы электромагнитного излучения;
-  высказывать суждения об историческом ходе научного познания законов природы на примере изучения свойств света;
-  обосновать планетарную модель атома на основе опыта Резерфорда по рассеянию альфа-частиц;
-  объяснять условия устойчивого существования атома с помощью постулатов Бора;
-  объяснять природу линейчатых спектров на основе энергетической структуры атома водорода;
-  объяснять устройство и принцип действия лазера;
-  обсуждать перспективы развития голографии;
-  приводить примеры проявления и использования на практике волновой природы элементарных частиц;
-  использовать формулу длины волны де Бройля при решении задач;
-  объяснять гипотезу де Бройля.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
сәуле шығару	излучение	emission, radiation
люминесценция	люминесценция	luminescence
жылулық сәулелену	тепловое излучение	thermal radiation
электрмагниттік толқындар шкаласы	шкала электромагнитных волн	the scale of electromagnetic waves
инфрақызыл сәулелену	инфракрасное излучение	infrared radiation
ультракүлгін сәуле шығару	ультрафиолетовое излучение	ultraviolet radiation
спектроскопия	спектроскопия	spectroscopy
сәуле шығарудың спектрлік тығыздығы	спектральная плотность излучения	spectral radiation density
спектрлік талдау	спектральный анализ	spectral analysis
үздіксіз спектр	сплошной спектр	continuous spectrum
сызықтық спектр	линейчатый спектр	line spectrum
жолақ спектр	полосатый спектр	band spectrum
жұтылу спектрі	спектр поглощения	absorption spectrum
ультракүлгін апаты	ультрафиолетовая катастрофа	ultraviolet catastrophe
абсолюттік қара дене	абсолютно черное тело	absolute black body
фотон	фотон	photon
корпускулалы-толқындық дуализм	корпускулярно-волновой дуализм	wave-corpucle dualism
фотоэффект	фотоэффект	photoeffect

фотоэлемент	фотоэлемент	photocell
күн батареялары	солнечные батареи	solar batteries
лазер	лазер	laser

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «излучение», «люминесценция», «тепловое излучение», «шкала электромагнитных волн», «инфракрасное излучение», «ультрафиолетовое излучение», «спектроскопия», «спектральная плотность излучения», «спектральный анализ», «сплошной спектр», «линейчатый спектр», «полосатый спектр», «спектр поглощения», «ультрафиолетовая катастрофа», «абсолютно черное тело», «фотон», «корпускулярно-волновой дуализм», «фотоэффект», «фотоэлемент», «солнечные батареи», «лазер».

§ 8.1

Виды излучений

1. В повседневной жизни мы часто сталкиваемся с понятием излучения. Нередко этот термин вызывает ассоциацию с опасностью, угрозой здоровью. Однако все зависит от энергии и вида излучения.

Излучением называется процесс испускания и распространения энергии в виде электромагнитных волн и частиц.

Основным источником излучения является атом. Для того чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать определенную энергию. Излучая, атом теряет полученную энергию, и для непрерывного свечения вещества необходимо атому сообщать энергию извне.

Обычно атомы при излучении испускают электромагнитные волны, которые создаются при ускоренном движении заряженных частиц. Эти заряженные частицы входят в состав атомов, из которых состоит вещество.

Излучения классифицируют по *источнику* излучения и *энергии* излучения.

Классификация излучений на *тепловое* и *нетепловое* излучения сложилась исторически. Все виды излучения относятся к электромагнитным излучениям. Электромагнитные излучения ($E = h\nu$), которые изменяются в зависимости от частоты, делятся на несколько видов. Эти виды от радиоволны до гамма-лучей составляют непрерывную школу электромагнитных волн, которые были рассмотрены в девятом классе, а также в четвертой главе настоящего учебника.

По *источнику излучения* различают *естественные* и *искусственные* источники электромагнитных излучений.

Естественные источники электромагнитных излучений:

- электрические и магнитные поля Земли;
- атмосферное электричество и радиоизлучение Солнца и Галактики.

Искусственные (антропогенные) источники электромагнитных излучений:

- антенные системы;
- генераторы СВЧ-энергии;
- высокочастотные трансформаторы;
- конденсаторы;
- линии электропередачи высокого напряжения;
- лазерные установки;
- микроволновые печи;
- мониторы компьютеров и других экранных приборов.

2. Распространенным видом излучения по источнику является **тепловое излучение**.

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, обусловленной хаотическим (тепловым) движением и взаимодействием частиц вещества (молекул, атомов, ионов и электронов).

Чем выше температура тела, тем быстрее движутся в нем частицы. При столкновении быстрых атомов (или молекул) друг с другом часть их кинетической энергии идет на возбуждение атомов, которые затем излучают свет и переходят в невозбужденное состояние.

Тепловыми источниками излучения являются, например, Солнце и обычная лампа накаливания (рис. 8.1.1). Лампа – очень удобный, но малоэкономичный источник света. Лишь около 12% всей энергии, выделяемой в нити лампы электрическим током, преобразуется в энергию света. Также тепловым источником считается пламя (рис. 8.1.1, в).

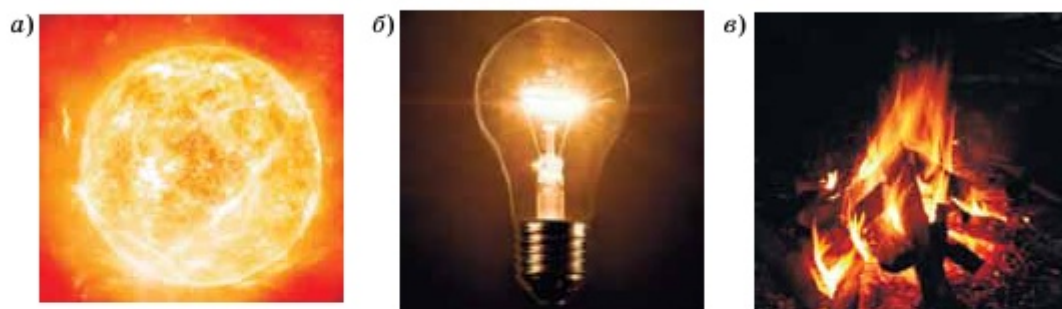


Рис. 8.1.1. Источники теплового излучения: а) Солнце; б) лампа накаливания; в) пламя огня

3. К нетепловому излучению относятся все виды **люминесценции**.

Люминесценцией называется нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения веществом дополнительной энергии.

В зависимости от источника энергии люминесценции разделяют на следующие виды.



Рис. 8.1.2



Рис. 8.1.3



Сергей Иванович Вавилов (1891–1951) – советский физик, государственный и общественный деятель, президент АН СССР в 1945–1951 гг. Основные научные труды посвящены физической оптике и, в первую очередь, фотолюминесценции. Под его руководством была разработана технология изготовления ламп дневного света и развит метод люминесцентного анализа химического состава веществ. Под его руководством П. А. Черенков открыл в 1934 г. излучение света электронами, движущимися в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде.

Электролюминесценция. Энергия, необходимая атомам для излучения света, может поступать и из нетепловых источников. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию. Быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами среды; при этом часть кинетической энергии электронов идет на возбуждение атомов. Возбужденные атомы отдают лишнюю энергию в виде световых волн. В результате этого разряд в газе сопровождается свечением.

Северное сияние тоже проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Они возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоев атмосферы, из-за чего эти слои светятся. Явление электролюминесценции используется в трубках для рекламных надписей.

Катодолюминесценция. Свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами, вырванными сильным электрическим полем между катодом и анодом, называют **катодолюминесценцией**.

Хемилюминесценция. При некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть этой энергии непосредственно расходуется на излучение света. Источник света остается холодным (он имеет температуру окружающей среды). Это явление называется **хемилюминесценцией**. Например, такое явление, как свечение светлячка, поддается объяснению с помощью явления хемилюминесценции. Свойством светиться обладают и другие живые организмы: бактерии, насекомые, многие рыбы, обитающие на большой глубине (рис. 8.1.2). Нередко светятся в темноте химические реактивы (рис. 8.1.3).

Фотолюминесценция. Падающий на вещество свет частично отражается и частично поглощается. Энергия поглощаемого света в большинстве случаев вызывает лишь нагревание тел. Однако некоторые тела сами начинают светиться непосредственно под действием падающего на них излучения. Это и есть **фотолюминесценция**. Свет возбуждает атомы вещества (увеличивает их внутреннюю энергию), и после этого они высвечиваются сами. Например, светящиеся краски, которыми покрывают елочные игрушки, излучают свет после их облучения. Применение фотолюминесценции изучал

советский физик С. И. Вавилов. Излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, большую длину волны, чем свет, возбуждающий свечение. Это можно наблюдать экспериментально. Если направить на сосуд с флюоресцеином (органический краситель) световой пучок, пропущенный через фиолетовый светофильтр, то эта жидкость начинает светиться зелено-желтым светом, т.е. светом с большей длиной волны, чем у фиолетового света.



Дополнительный материал

Видимый свет является лишь частью электромагнитного спектра, который видят наши глаза. В отличие от ламп накаливания, светодиодные лампы излучают только видимый свет. Именно поэтому светодиодные лампы являются наиболее экономичными.



Вопросы

1. Какой процесс называется излучением? Каковы необходимые условия излучения?
2. По каким признакам классифицируются излучения? Приведите примеры.
3. Какое излучение называется тепловым? Каковы источники теплового излучения? Как они характеризуются?
4. Какой процесс называется люминесценцией? Как объясняется процесс люминесценции?
5. Как можно объяснить, что излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, большую длину волны, чем свет, возбуждающий свечение?



Задание (теоретический анализ)

1. Объясните механизм возбуждения катодолюминесценции.
2. Подготовьте презентацию на тему «Применение люминесценции в технике».
3. Подготовьте краткое сообщение на одну из следующих тем: 1) Естественные источники излучения – магнитное поле Земли, атмосферное электричество и радиоизлучение Солнца; 2) Радиоизлучение Галактики; 3) Высокочастотные трансформаторы и конденсаторы; 4) Микроволновое излучение и мониторы компьютеров.
Рекомендация: классу следует разделиться на четыре группы. От каждой группы выступает один ученик. Учитель и его ассистенты определяют лучшее выступление.

§ 8.2

Спектры. Спектральные аппараты

1. Как мы знаем, свет является электромагнитным излучением, которое лежит в видимом интервале, называемом шкалой электромагнитных волн. Свет является сложным электромагнитным излучением, состоящим из отдельных монохроматических составляющих. Однако до Ньютона еще никому не удалось изобрести такой инструмент, который бы показал, что свет состоит из отдельных излучений, каждое из которых имеет строго определенную конкретную длину волны или частоту.

Исследование оптических спектров было начато Исааком Ньютоном, который в своем труде «Оптика», вышедшем в 1704 году, опубликовал результаты своих опытов разложения белого света с помощью призмы на отдельные компоненты различной цветности и преломляемости, то есть получил спектры солнечного излучения. Он объяснил их природу, показав, что цвет есть собственное свойство света, а не вносится призмой, как утверждал Роджер Бэкон в XIII веке. Так, например, свет, проходящий через призму, разлагается на его составляющие (рис. 8.2.1). Таким образом И. Ньютон заложил основы *оптической спектроскопии*. В «Оптике» он описал все три используемых поныне метода разложения света – преломление, интерференцию и дифракцию, а его призма с коллиматором, щелью и линзой была первым *спектроскопом*, позволившим получить спектр солнечного света (рис. 8.2.1).

Спектром называется совокупность отдельных гармонических (т.е. монохроматических) излучений, на которые может быть разложена данная сложная электромагнитная волна.

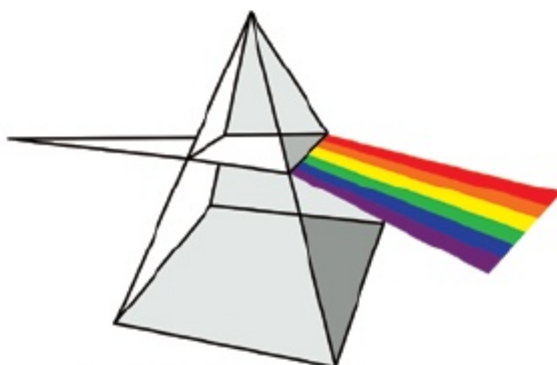


Рис. 8.2.1. Разложение белого света

2. Энергия, которую несет с собой световая волна, распределена в пространстве по длинам волн или по частотам. Чтобы охарактеризовать эту энергию, были введены такие величины, как *интенсивность излучения* и *спектральная плотность потока излучения*.

Интенсивностью излучения называется полный поток энергии излучения, проходящий за единицу времени через единичную площадку в направлении нормали к ней и рассчитанный на единичный телесный угол.

Спектральной плотностью излучения называется отношение интенсивности излучения в узком частотном интервале, содержащем данную длину волны λ (или частоту ν), к ширине этого интервала $d\lambda$ (или $d\nu$).

Спектральная плотность потока излучения определяется экспериментально. Сначала нужно через призму получить спектр излучения от определенного источника, затем можно измерить энергию, приходящуюся на отдельный интервал. На глаз это определить очень трудно, зато можно воспользоваться свойством абсолютно черного тела поглощать излучения. Излучение вызывает нагрев тела, а по температуре тела нетрудно рассчитать энергию.

3. Для исследования спектров нужны спектральные аппараты, которые отвечают требованиям четкого разделения спектра и не допускают перекрытия спектров.

В таких аппаратах используются *дифракционная решетка* или чаще *призма*. На рис. 8.2.2 показана схема такого аппарата, в котором ход лучей с одинаковой длиной волны показан одинаковыми цветами (красным, зеленым и голубым).

Действие призмы основано на явлении *дисперсии*, то есть зависимости показателя преломления n вещества от длины волны света λ .

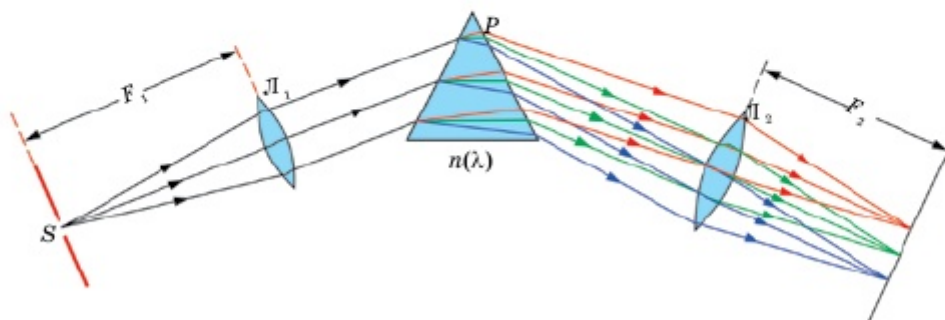


Рис. 8.2.2. Ход лучей в спектральном аппарате

Щель S , на которую падает исследуемое излучение, находится в фокальной плоскости линзы L_1 . Эта часть прибора называется *коллиматором*. Выходящий из линзы параллельный пучок света падает на призму P под разными углами. В фокальной плоскости линзы L_2 располагается экран или фотопластинка, на которой фокусируется излучение. В результате на экране возникает изображение спектра в виде цветных полос разных длин волн. У всех прозрачных твердых веществ (стекло, кварц), из которых изготавливаются призмы, показатель преломления n в диапазоне видимого света убывает с увеличением длины волны λ , поэтому призма наиболее сильно отклоняет от первоначального направления синие и фиолетовые лучи и наименее – красные.

Монотонно убывающая зависимость показателя преломления тела от длины волны $n(\lambda)$ падающего света называется *нормальной дисперсией*.



Вопросы

1. Почему белый свет разлагается в спектр, проходя через призму? Какое физическое явление лежит в основе этого явления? Что называется спектром?
2. Какая величина называется интенсивностью излучения? Какая величина называется спектральной плотностью излучения? Как определяют экспериментально спектральную плотность излучения?
3. На чем основано действие спектральных аппаратов? Какая зависимость называется нормальной дисперсией?



Задание (практическое исследование)

Подготовьте реферат на тему «Спектральные приборы». Охарактеризуйте виды спектральных приборов, их основное назначение, структуру и принцип действия.

§ 8.3

Спектральный анализ

1. Спектральный состав излучения атомов различных веществ весьма разнообразен. Тем не менее все спектры делятся на три сильно отличающихся друг от друга типа, которые называются *сплошным*, *линейчатым* и *полосатым* спектрами.

Непрерывные (сплошные) спектры. В непрерывном спектре излучения (рис. 8.3.1) представлены волны всех длин. В спектре нет разрывов, и на экране спектрографа можно видеть сплошную разноцветную полосу с плавным переходом от одного цвета к другому. Непрерывные (или сплошные) спектры дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Непрерывный спектр дает также высокотемпературная плазма.

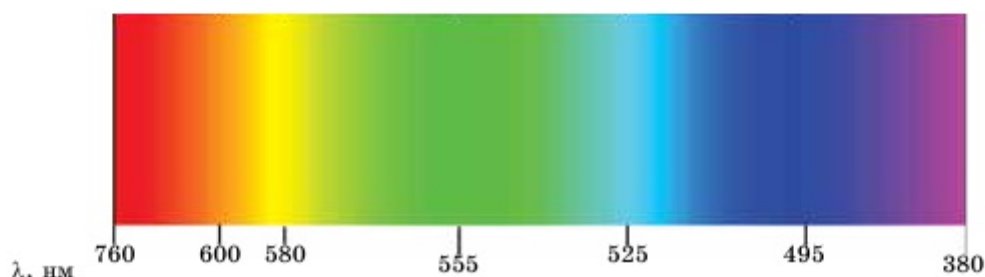


Рис. 8.3.1. Сплошной (непрерывный) спектр

Линейчатые спектры делятся на спектры испускания и поглощения (рис. 8.3.2). Линейчатые спектры испускания (рис. 8.3.2, б; рис. 8.3.4, три верхних ряда) представляют собой набор цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не в молекулярном) состоянии. Природа линейчатых спектров объясняется тем, что у атомов конкретного вещества существуют только ему свойственные стационарные состояния со своим набором энергетических уровней. Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

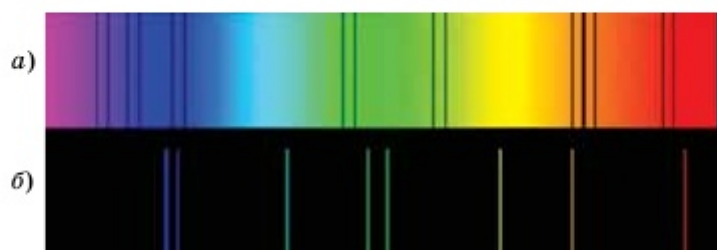


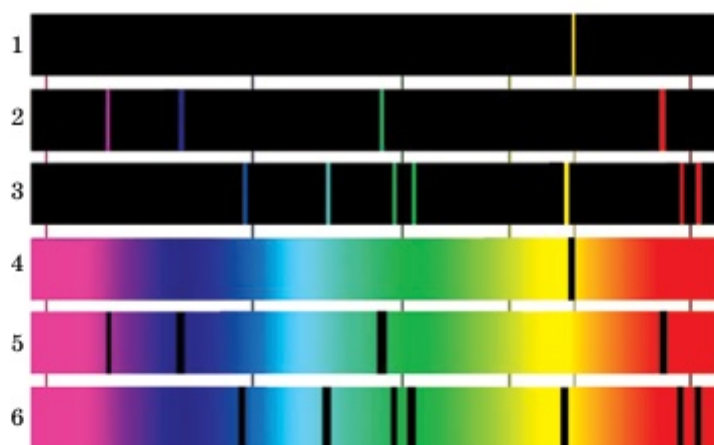
Рис. 8.3.2. Линейчатые спектры: а) спектр поглощения; б) спектр испускания

Полосатые спектры. Полосатые спектры состоят из отдельных полос, разделенных темными промежутками (рис. 8.3.3). Полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.



Рис. 8.3.3. Полосатые спектры

Спектры поглощения. Если будем пропускать белый свет через холодный неизлучающий газ, то в непрерывном спектре появятся темные линии, которые соответствуют поглощению. Холодный газ поглощает активно поступившие извне световые излучения как раз в той области, в которой он начинает испускать свои излучения в сильно нагретом состоянии. По этой причине возникают линейчатые спектры поглощения (рис. 8.3.2, а; рис. 8.3.4, три нижних ряда).



Спектры излучения: 1 – натрия; 2 – водорода; 3 – гелия.
Спектры поглощения: 4 – натрия; 5 – водорода; 6 – гелия

Рис. 8.3.4

2. В основе спектрального анализа лежит изучение *линейчатых спектров*, потому что их структура прямо связана со строением атома. Поэтому по виду линейчатых спектров определяют химический состав вещества. Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов.

Спектральным анализом называют метод определения химического состава вещества по его спектру.

С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества. Благодаря универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии.

В астрофизике под спектральным анализом понимают не только определение химического состава звезд, газовых облаков и т.д., но и нахождение по спектрам многих других физических характеристик этих объектов: температуры, давления, скорости движения, магнитной индукции.

Кроме астрофизики, спектральный анализ широко применяют в криминалистике для расследования улик, найденных на месте преступления. Также спектральный анализ в криминалистике хорошо помогает определять орудие убийства и вообще раскрывать скрытые детали преступления.

Еще шире спектральный анализ используют в медицине. Здесь его применение весьма велико. Его можно использовать для диагностирования, а также для того, чтобы определять инородные вещества в организме человека.



Вопросы

1. По какой характеристике различаются между собой непрерывные, линейчатые, полосатые спектры? Какие вещества дают непрерывный, линейчатый, полосатый спектры?
2. Что такое спектры поглощения? В какой области спектра происходит поглощение?
3. В чем заключается основная функция спектрального анализа? Какой спектр лежит в его основе? Почему?
4. Где применяют спектральный анализ?
5. Какого типа спектр получим от следующих источников: пламени свечи, пламени костра, спирали электроплитки, пламени электрической дуги, неоновой лампы, лампы дневного света?



Задание (практическое исследование)

1. Подготовьте презентацию по применению спектрального анализа в металлургии, машиностроении, атомной промышленности, криминалистике, астрофизике.
2. Нарисуйте спектры испускания и поглощения аргона, неона, криптона. Проанализируйте, в чем их отличие друг от друга. Отличаются ли спектры испускания аргона, неона и криптона от спектров водорода и гелия?

§ 8.4

Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения

1. В 1800 году английский ученый В. Гершель сделал наблюдение, что в невидимой части солнечного спектра повышается температура термометра. Позднее советским физиком А. А. Глаголевой-Аркадьевой было доказано существование *инфракрасных волн*.

Инфракрасное (ИК) излучение невидимо для человеческого глаза, однако его испускают все жидкие и твердые вещества, даже когда они не светятся. Поэтому инфракрасное излучение относят к тепловому излучению.

Инфракрасным называют электромагнитное излучение, частота (длина волны) которого лежит в диапазоне от $3 \cdot 10^{11}$ Гц до $3,75 \cdot 10^{14}$ Гц (800 нм – 1 мм).

Инфракрасное излучение является естественным природным видом излучения. Каждый человек ежедневно подвергается его действию. Оно излучается атомами, которые обладают избыточной энергией, и ионами. Каждое тело с температурой выше нуля – это источник инфракрасного излучения. Солнце – известный природный источник ИК-лучей. Огромная часть энергии Солнца поступает на нашу планету именно в виде ИК-лучей. Батареи отопления в квартире также испускают инфракрасное излучение.

Длина волн в ИК-излучении зависит от температуры нагревания. Самая высокая температура у коротких волн с большой интенсивностью излучения. Диапазон инфракрасных лучей широк, к нему относятся:

короткие волны – температура выше 800 градусов по Цельсию;

средние волны – до 600 градусов по Цельсию;

длинные волны – до 300 градусов по Цельсию.

Инфракрасные лучи применяют во многих сферах. Например:

- в военном деле: приборы ночного видения, в ракетах, боеголовках;
- в термографии для изучения перегретых или переохлажденных местностей и для обнаружения небесных тел;
- в быту используются для инфракрасных обогревателей, функционирование которых направлено на нагрев предметов интерьера и стен;
- в дистанционном управлении: все существующие пульты для телевизоров, печей, кондиционеров;
- в медицине инфракрасными лучами проводят лечение и профилактику различных заболеваний.

2. Ультрафиолетовое излучение. Об ультрафиолетовых лучах впервые упоминалось в XIII веке в труде ученого Шри Мадхачарая, который описал атмосферу местности Бхутакаши, содержащей фиолетовые лучи, невидимые для глаз человека.

В ходе опытов в 1801 году группа ученых выяснила, что действие света имеет несколько отдельных компонентов: окислительное, тепловое (инфракрасный свет), осветительное (видимый свет) и восстановительное (ультрафиолет). В 1842 году ультрафиолетовое (УФ) излучение было официально открыто немецким физиком Иоганном Вильгельмом Риттером. Это излучение входило в состав отдельных компонентов света и играло роль восстановительного элемента.

Ультрафиолетовым называют электромагнитное излучение, частота (длины волны) которого лежит в диапазоне от $8 \cdot 10^{14}$ Гц до $3 \cdot 10^{16}$ Гц (10 – 375 нм).

Ультрафиолетовое излучение отличается высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотоэмульсия. Если спроецировать спектр в затемненном помещении на фотобумагу, после проявления бумага почернеет за фиолетовым концом спектра сильнее, чем в области видимого спектра.

Хотя ультрафиолетовые лучи невидимы, но они оказывают влияние на сетчатку глаз и кожу. Поэтому нужно беречься от ультрафиолетового излучения. Но в малых дозах ультрафиолетовое излучение полезно.

Свойствами ультрафиолетового излучения являются химическая активность, проникающая способность, невидимость, уничтожение микроорганизмов, благотворное влияние на организм человека (в небольших дозах) и отрицательное воздействие на человека (в больших дозах).

Естественные источники ультрафиолетового излучения – Солнце, звезды, туманности и другие космические объекты. Однако лишь длинноволновая часть ультрафиолетового излучения ($\lambda > 290$ нм) достигает земной поверхности. Более коротковолновое ультрафиолетовое излучение поглощается озоном, кислородом и другими компонентами атмосферы на высоте 30–200 км от поверхности Земли, что играет большую роль в атмосферных процессах. Ультрафиолетовое излучение звезд и других космических тел, кроме поглощения в земной атмосфере, в интервале 91,2–20 нм практически полностью поглощается межзвездным водородом. Излучение используют в процессе отбеливания тканей, синтезе конкретных веществ, получении витамина D, производстве кожи лакированной, а также в различных производственных манипуляциях. Важно учесть, что излучение имеет уникальные свойства, а именно возможность вызвать люминесценцию.

Многие вещи, которые видятся, например, розовыми в видимом свете, будут флуоресцировать розовым, однако розовый порошок Холи (краска, изготовленная на основе трав и натуральных красителей), например, флуоресцирует оранжевым/золотистым при воздействии УФ-света.

Изучение спектров испускания, поглощения и отражения в УФ-области позволяет определять электронную структуру атомов, ионов, молекул, а также твердых тел. УФ-спектры Солнца, звезд и др. несут информацию о физических процессах, происходящих в горячих областях этих космических объектов. На фотоэффекте, вызываемом ультрафиолетовым излучением, основана *фотоэлектронная спектроскопия*. Ультрафиолетовое излучение может нарушать химические связи в молекулах, в результате чего могут происходить различные химические реакции (окисление, восстановление, разложение, полимеризация). Люминесценция под действием ультрафиолетового излучения используется при создании люминесцентных ламп, светящихся красок, в люминесцентном анализе и люминесцентной

дефектоскопии. Ультрафиолетовое излучение применяется в криминалистике для установления идентичности красителей, подлинности документов и т.п. В искусствоведении ультрафиолетовое излучение позволяет обнаружить на картинах не видимые глазу следы реставраций. Способность многих веществ к избирательному поглощению ультрафиолетового излучения используется для обнаружения в атмосфере вредных примесей, а также в *ультрафиолетовой микроскопии*.



Дополнительный материал

Нередко ультрафиолетовое, инфракрасное и рентгеновское излучения используются для обнаружения живописных полотен старых мастеров, скрытых под более поздними картинами, написанными на том же полотне. Этот метод позволяет отыскивать утерянные полотна, дает возможность проследить процесс работы художника над картиной, а также служит для обнаружения различных подделок. Так, например, рентгеновский анализ помог разоблачить мошенничество известного фальсификатора Ханса ван Меегерена, который писал свои подражания известным мастерам на старых, не представляющих ценности полотнах, что придавало его подделкам больше подлинности.



Вопросы

1. Что является источником инфракрасного излучения? Приведите примеры.
2. Почему тепловую компоненту света называют инфракрасной, а восстановительную – ультрафиолетовой?
3. Где используют инфракрасное излучение?
4. Каковы основные свойства ультрафиолетового излучения?
5. Где используют ультрафиолетовое излучение?
6. Имеется ли в спектре электрической лампочки накаливания ультрафиолетовая часть?
7. Стекло непрозрачно для инфракрасного излучения. Почему же солнечные лучи, пройдя сквозь оконное стекло, греют?



Задание (теоретический анализ)

1. Объясните принцип фотографии на основе ультрафиолетового излучения.
2. Подготовьте презентацию на тему «Использование люминесценции под действием ультрафиолетового излучения».

§ 8.5

Тепловое излучение

1. Сведения о природе всех видов излучения могут быть получены путем изучения любого из его видов. Тем не менее мы будем рассматривать только излучение нагретых тел, так как исследования в этой области оказались особенно плодотворными для дальнейшего развития физики.

Понятие теплового излучения было установлено химиком Карлом Вильгельмом Шееле (1742–1786); первые эксперименты провел Марк Огюст Пикте (1752–1825). Пьер Прево (1751–1839) сделал из них следующий вывод: каждое тело излучает тепло независимо от окружающей его среды; сообщенное телу количество тепла представляет собой разность между теплом, которое оно получает от среды, и тем, которое оно излучает. В течение первой половины XIX столетия знали только единый спектр; тепловое и световое излучения часто путали.

В понимание механизма теплового излучения существенный вклад внес Густав Роберт Кирхгоф (1824–1887). Он показал, что в замкнутом пустом пространстве, непроницаемом для излучения и поддерживаемом при постоянной температуре, устанавливается универсальное излучение черного тела, зависящее только от температуры, но не от природы стенок. Интенсивность излучения любого тела может быть определена, исходя из излучения черного тела, если известны поглощение и показатель преломления данного тела (1859).

Поворотный момент в изучении теплового излучения наступил в 1898 году, когда Люммер и Принсгейм, а также другие исследователи получили на опыте экспериментальную кривую зависимости лучеиспускательной способности абсолютно черного тела ($r_{\nu,T}$) от частоты при фиксированной температуре. Эта кривая имеет резко выраженный максимум, а в области больших частот круто падает, тогда как, согласно классической теории, она должна была резко расти пропорционально квадрату частоты. Это противоречие заставило ученых искать решение возникшей проблемы.

В настоящее время известно, что все тела в той или иной степени излучают электромагнитные волны. Тела, нагретые до достаточно высоких температур, ярко светятся и испускают видимые излучения, а при обычных температурах являются источниками невидимого инфракрасного (ИК) излучения. Исходя из результатов современных исследований, можно дать краткое определение того, что представляет собой тепловое излучение и каковы его свойства.

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии.

К свойствам теплового излучения относятся:

- *сплошной спектр;*
- *положение максимума спектра зависит от температуры;*
- *температура высокая – излучение коротких электромагнитных волн (видимый свет, ультрафиолет);*

- температура малая – преимущественно длинные электромагнитные волны (инфракрасные);
- может быть равновесие, т.е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать: если излучает больше, чем поглощает, – остывает, если поглощает больше, чем излучает, – нагревается.

2. Рассмотрим, какими величинами характеризуется тепловое излучение. Интенсивность теплового излучения характеризуется величиной потока энергии W , измеряемой в *ваттах*, так как она представляет собой количество энергии в единицу времени, т.е. мощность. *Поток энергии, испускаемой единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям во всем интервале длин волн (частот), называется энергетической светимостью R :*

$$R = \frac{W}{S}, \quad (8.1)$$

где S – площадь излучающей поверхности.

Количественной характеристикой теплового излучения служит *спектральная плотность энергетической светимости $R_{\nu,T}$* (излучательности) тела – *мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины.*

Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить *интегральную энергетическую светимость* (интегральную излучательность) (ее называют *энергетической светимостью тела*), просуммировав по всем частотам:

$$R_T = R_{\nu,T} \nu. \quad (8.2)$$

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется *спектральной поглощательной способностью $A_{\nu,T}$* , показывающей, какая доля энергии, приносимой за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от ν до $\nu + d\nu$, поглощается телом. *Спектральная поглощательная способность – величина безразмерная.*

3. Количественную характеристику теплового излучения любого тела удобно получить в сравнении с так называемым *черным телом* и его *равновесным излучением.*

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то, как показывает опыт, такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. Тела обмениваются энергией только путем испускания и поглощения лучистой энергии. В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга, и в пространстве между телами плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел. *Подобное излучение, согласно выводам Кирхгофа, получило название **равновесного, или черного.***

Равновесным, или черным излучением называют излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру.

Если через малое отверстие заглянуть внутрь полости, в которой установилось термодинамическое равновесие между поглощенными телами и испускаемыми ими же излучениями, то глаз не различит очертаний тел и зафиксирует лишь однородное свечение всей полости в целом.

Абсолютно черным называется тело, способное поглощать всю падающую на него энергию.

При заданной температуре собственное тепловое излучение абсолютно черного тела, находящегося в состоянии теплового равновесия с излучением, должно иметь тот же спектральный состав, что и окружающее это тело равновесное излучение. В противном случае равновесие между абсолютно черным телом и окружающим его излучением не могло бы установиться.

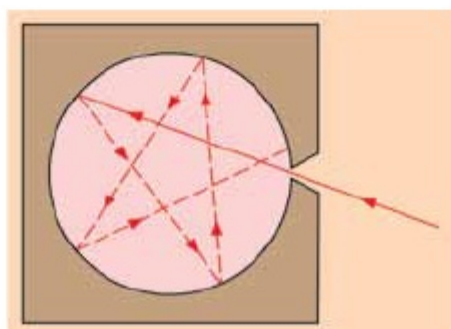


Рис. 8.5.1. Модель абсолютно черного тела

Абсолютно черных тел в природе не бывает. Хорошей моделью такого тела является небольшое отверстие в замкнутой полости (рис. 8.5.1). Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощен стенками, и снаружи отверстие будет казаться совершенно черным. Но если полость нагрета до определенной температуры T и внутри установилось тепловое равновесие, то собственное излучение полости, выходящее через отверстие, будет излучением абсолютно черного тела.

Именно таким образом во всех экспериментах по исследованию теплового излучения моделируется абсолютно черное тело.

С увеличением температуры внутри полости будет возрастать энергия выходящего из отверстия излучения и изменяться его спектральный состав.

4. Р. Кирхгоф, опираясь на второй закон термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе тел, установил количественную связь между *спектральной плотностью энергетической светимости* и *спектральной поглощательной способностью* тел. Эта связь, известная как **закон Кирхгофа**, формулируется следующим образом:

Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры:

$$\frac{R_{\nu, T}}{A_{\nu, T}} = r_{\nu, T}. \quad (8.3)$$

Универсальная функция Кирхгофа $r_{\nu,T}$ есть спектральная плотность энергетической светимости черного тела.

Действительно, из формулы (8.3) имеем:

$$R_{\nu,T} = A_{\nu,T} r_{\nu,T}, \quad (8.4)$$

или с учетом $A_{\nu,T} = 1$ для абсолютно черного тела получим:

$$R_e = r_{\nu,T} \nu. \quad (8.5)$$



Вопросы

1. Какое явление называется тепловым излучением? Какими свойствами оно обладает? Почему ученые обратили особое внимание на тепловое излучение?
2. Какими величинами характеризуется тепловое излучение? Как они формулируются?
3. Какое излучение называют равновесным, или черным? Какую идеальную модель называют абсолютно черным телом? Имеются ли природные объекты, удовлетворяющие условиям абсолютно черного тела?
4. Как формулируется закон Кирхгофа? Чему равна спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела?

§ 8.6

Законы Стефана – Больцмана и Вина. Ультрафиолетовая катастрофа

1. Нахождение универсальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела в зависимости от частоты и температуры является важной задачей теории теплового излучения. Над решением этой задачи трудились многие ученые. В их числе были и австрийские физики И. Стефан и Л. Больцман. Применяя термодинамический метод (1884), они решили эту задачу лишь частично, установив зависимость энергетической светимости R_e от температуры T . Результат этого решения, именуемый **законом Стефана – Больцмана**, формулируется следующим образом: *энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:*

$$R_e = \sigma T^4, \quad (8.6)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, ее экспериментальное значение равно $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴).

Закон Стефана – Больцмана определяет зависимость R_e от температуры, однако не дает ответа относительно спектрального состава в зависимости от частоты излучения черного тела. Зависимость спектральной плотности энергетической светимости черного тела от частоты при фиксированной температуре была получена экспериментальными исследованиями.



Людвиг Больцман (1844–1906) – австрийский физик-теоретик, основатель статистической механики и молекулярно-кинетической теории. Работы Больцмана касаются кинетической теории газов, термодинамики и теории излучения, оптики, математики, механики, теории упругости и т.д.



Йозеф Стефан (1835–1893) – австрийско-словенский физик и математик. Известен своими работами в различных областях физики: кинетической теорией газов, теорией теплового излучения, а также работами по оптике, акустике, электромагнетизму и др.

Из экспериментальных кривых зависимости функции $r_{\lambda,T}$ от длины волны λ (частоты ν) при различных фиксированных температурах (рис. 8.6.1,а) следует, что распределение энергии в спектре черного тела является неравномерным. Все кривые имеют явно выраженный максимум, который по мере повышения температуры смещается в сторону более коротких волн. Площадь, ограниченная кривой зависимости $r_{\lambda,T}$ от λ

и осью абсцисс, пропорциональна энергетической светимости R_e черного тела и, следовательно, по закону Стефана – Больцмана четвертой степени температуры.

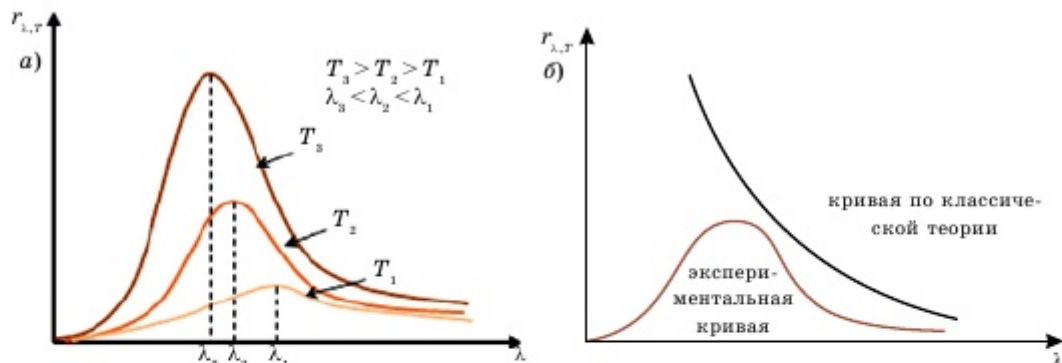


Рис. 8.6.1: а) экспериментальные кривые $r_{\lambda,T}$ зависимости черного тела; б) экспериментальная кривая зависимости $r_{\lambda,T}$ и кривая, построенная по классической теории

2. Немецкий физик В. Вин, опираясь на законы термо- и электродинамики, установил зависимость длины волны λ_{\max} , соответствующей максимуму функции $r_{\lambda,T}$, от температуры T . Эта зависимость известна под названием **закона смещения Вина**, который гласит: *длина волны λ_{\max} , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$*

черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (8.7)$$

где b – постоянная Вина; ее экспериментальное значение равно $2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$. **Закон смещения Вина** показывает смещение положения максимума функции $r_{\lambda,T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн.

На графике (рис. 8.6.1, а) положение максимума функции Кирхгофа ($r_{\nu,T}$) смещается согласно закону Вина с повышением температуры в область больших частот. Следовательно, при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (например, переход белого каления в красное при остывании металла). Площадь, охватываемая кривой, согласно соотношению (8.7) дает значение энергетической светимости абсолютно черного тела при данной температуре. Видно, что энергетическая светимость сильно возрастает с увеличением температуры, что соответствует закону Стефана – Больцмана. Полученные Вином теоретические результаты полностью согласовывались с результатами экспериментов.

3. Многие ученые долгое время работали над теоретическим нахождением универсальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела. Попытка теоретического вывода зависимости $r_{\nu,T}$ принадлежит английским ученым Д. Рэлею и Д. Джинсу, которые применили к тепловому излучению методы статистической физики; воспользовавшись классическим законом равномерного распределения энергии по степеням свободы, они получили выражение для спектральной плотности энергетической светимости черного тела, названное **формулой Рэлея – Джинса**:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT. \quad (8.8)$$

Подставив (8.8) в (8.5), получим

$$R_e = \frac{2\pi\nu^3}{c^2} kT. \quad (8.9)$$

Исходя из термодинамических подходов Вин также получил для спектральной плотности излучения черного тела формулу следующего вида:

$$r_{\nu,T} = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (8.10)$$

которая называется **законом Вина**.

Эти формулы, как видно из рис. 8.6.1, б, согласуются с экспериментальными данными лишь при малых частотах (больших длинах волн) и резко расходятся



Вильгельм Вин (1864–1928) – немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1911 года за открытия законов, управляющих тепловым излучением.

для больших частот (малых длин волн, рис. 8.6.1, б). С увеличением частоты энергетическая светимость стремится к бесконечности, тогда как экспериментальные данные показывают противоположную зависимость. Это противоречие между экспериментальными данными и классическими представлениями получило название *ультрафиолетовой катастрофы*.

Ультрафиолетовой катастрофой называется глубокое противоречие между опытными (экспериментальными) данными и неверными классическими представлениями, согласно которым энергетическая светимость любого тела по мере увеличения частоты должна расти сколь угодно долго.

Название этот феномен получил оттого, что по мере приближения длин волн к ультрафиолетовому краю шкалы электромагнитных волн формула Рэлея – Джинса становится абсурдной.

Расхождение формулы Рэлея – Джинса (8.8) и формулы (закона) Вина (8.10) с опытом указывало на существование какой-то другой закономерности, несовместимой с представлениями классической физики. Для ликвидации ультрафиолетовой катастрофы М. Планк в 1900 году выдвинул новую гипотезу, с которой началось бурное развитие современной *квантовой теории микромира*.



Вопросы

1. Чему равна энергетическая светимость черного тела по закону Стефана – Больцмана? В чем заключается физический смысл этого закона?
2. Каково экспериментальное распределение энергии в спектре черного тела?
3. В чем заключаются особенности экспериментальной кривой зависимости спектральной плотности излучения от его длины волны (частоты)?
4. Как формулируется закон Вина? В чем заключается физический смысл закона Вина?
5. Какова зависимость спектральной плотности излучения по формуле Рэлея – Джинса? Почему возникла ультрафиолетовая катастрофа? Каков физический смысл ультрафиолетовой катастрофы? Как она формулируется?



Задание (теоретический анализ)

Проанализируйте, почему закон Вина называют законом смещения, и приведите примеры того, каким образом в природе проявляется смещение положения максимума функции $r_{\lambda, T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно черного тела, для которого максимум испускательной способности приходится на длину волны 0,48 мкм. Найдите массу, теряемую Солнцем каждую секунду за счет этого излучения. Оцените время, за которое масса Солнца уменьшится на 1%.

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$\lambda = 0,48$ мкм	$0,48 \cdot 10^{-6}$ м	Найдем массу, теряемую Солнцем за 1 с.
$t = 1$ с		Энергия излучения Солнца, согласно формуле Эйнштейна, равна $W = \Delta mc^2$, где Δm – масса Солнца, теряемая за счет излучения. Энергетическая светимость Солнца равна $R_e = \frac{W}{tS}$, откуда
$\Delta M = 0,01 M_c$		$W = R_e tS$.
$\Delta m - ?$		
$t_1 - ?$		

Тогда $\Delta m = \frac{W}{c^2} = \frac{R_e tS}{c^2}$. Согласно закону Стефана – Больцмана, $R_e = \sigma T^4$. Поэтому $\Delta m = \frac{\sigma T^4 tS}{c^2}$. Согласно закону смещения Вина, $T = \frac{b}{\lambda}$, $\Delta m = \frac{\sigma b^4 tS}{\lambda^4 c^2}$. Так как площадь поверхности Солнца равна $S = 4\pi R^2$, где $R = 6,95 \cdot 10^8$ м, то выражение придет к виду $\Delta m = \frac{\sigma b^4 t 4\pi R^2}{\lambda^4 c^2} \approx 5 \cdot 10^9$ (кг).

Оценим время, за которое масса Солнца ($M_c = 1,98 \cdot 10^{30}$ кг) уменьшается на 1%. Для этого случая формула светимости Солнца имеет вид: $R_e = W/t_1 S = \Delta M c^2 / t_1 S$.

Аналогично $t = \frac{\Delta m c^2}{R_e S} \Rightarrow R_e S = \frac{\Delta m c^2}{t}$, откуда $t_1 = \frac{\Delta M c^2}{R_e S} = \frac{\Delta M t}{\Delta m} = \frac{0,01 M_c t}{\Delta m} = 1,2 \cdot 10^{11}$ (лет).

О т в е т: $\Delta m \approx 5 \cdot 10^9$ (кг); $t_1 = 1,2 \cdot 10^{11}$ (лет).

Задача 2. Максимум в спектре излучения абсолютно черного тела сместился с длины волны 0,4 мкм до 0,6 мкм. На сколько изменится мощность теплового излучения с 1 см² поверхности излучателя?

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$S = 1$ см ²	10^{-4} м ²	Поток энергии Φ (мощность теплового излучения) определяется как произведение энергетической светимости тела на площадь измеряемой поверхности, то есть $\Phi = R_e S$, где S – площадь поверхности, R_e – энергетическая светимость (излучательность).
$\lambda_{1\max} = 4 \cdot 10^{-7}$ м		
$\lambda_{2\max} = 6 \cdot 10^{-7}$ м		
$\Delta \Phi - ?$		

Излучательность тела определяется согласно закону Стефана – Больцмана:

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

Исходя из этого, определим мощность излучения при температурах T_1 и T_2 :

$$\Phi_1 = S\sigma T_1^4, \quad \Phi_2 = S\sigma T_2^4.$$

Изменение мощности получим из выражения:

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = S\sigma(T_1^4 - T_2^4).$$

Для определения изменения мощности излучения необходимо определить значения T_1 и T_2 , которые можно найти, используя закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

$$b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

$$T_1 = \frac{b}{\lambda_{1\max}}, \quad T_2 = \frac{b}{\lambda_{2\max}}.$$

Подставив выражения T_1 и T_2 , определим изменение мощности теплового излучения:

$$\Delta\Phi = S\sigma b^4 \left(\frac{1}{\lambda_{1\max}^4} - \frac{1}{\lambda_{2\max}^4} \right) = 10^{-4} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2,89^4 \cdot 10^{-12} \left(\frac{1}{(4 \cdot 10^{-7})^4} - \frac{1}{(6 \cdot 10^{-7})^4} \right) \approx 1,24 \cdot 10^4 \text{ (Вт)}.$$

О т в е т: $\Delta\Phi \approx 1,24 \cdot 10^4$ (Вт).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴); постоянная Вина $b = 2,89 \cdot 10^{-3}$ м · К; радиус Солнца $R_c = 7 \cdot 10^8$ м.

Уровень А

- 8.6.1. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны 500 нм. Принимая Солнце за абсолютно черное тело, определите:
- 1) энергетическую светимость Солнца;
 - 2) поток энергии, излучаемой Солнцем.
- (Ответ: 1) 63 МВт/м²; 2) $3,89 \cdot 10^{26}$ Вт.)

- 8.6.2. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ($\lambda_{1\max} = 780$ нм) на фиолетовую ($\lambda_{2\max} = 390$ нм)? (Ответ: увеличится в 16 раз.)

Уровень В

- 8.6.3. При увеличении температуры абсолютно черного тела в два раза длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности тела, сместилась на 400 нм. Найдите начальную и конечную температуры тела. (Ответ: 3612,5 К; 7225 К.)
- 8.6.4. Найдите мощность электрической лампочки, если температура нити равна 2650 К, площадь поверхности лампочки – 47 мм², а отношение энергетической светимости нити лампочки к энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре равно 0,31. (Ответ: 40,74 Вт.)
- 8.6.5. Поток энергии, излучаемый из смотрового окошка плавильной печи, равен 34 Вт. Определите температуру печи, если площадь отверстия составляет 6 см². (Ответ: 1000 К.)
- 8.6.6. Принимая коэффициент теплового излучения угля при температуре 600 К равным 0,8, определите: 1) энергетическую светимость угля; 2) энергию, излучаемую с поверхности угля с площадью 5 см² за 10 мин. (Ответ: 1) 5,9 кВт · м⁻²; 2) 1,76 кДж.)
- 8.6.7. На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{\max}$ абсолютно черного тела при температуре 0°C? (Ответ: $1,06 \cdot 10^{-5}$ м.)
- 8.6.8. Температура верхних слоев Солнца равна 5,3 кК. Считая Солнце абсолютно черным телом, определите длину волны, которой соответствует максималь-

ная спектральная плотность энергетической светимости $(r_{\lambda,T})_{\max}$ Солнца. (Ответ: 545 нм.)

Уровень С

- 8.6.9. Считая, что атмосфера поглощает 10% лучистой энергии, излучаемой Солнцем, найдите мощность излучения N , получаемую от Солнца горизонтальным участком Земли площадью 0,5 га. Высота Солнца над горизонтом $\varphi = 30^\circ$. Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела. Учтем, что температура поверхности Солнца $T = 5762$ К. (Ответ: $3,33 \cdot 10^6$ Вт.)
- 8.6.10. Найдите солнечную постоянную k , т.е. количество лучистой энергии, посылаемой Солнцем в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к солнечным лучам и находящуюся на таком же расстоянии от него, как и Земля ($1,5 \cdot 10^{11}$ м). (Ответ: $1,36$ кВт/м².)

§ 8.7

Формула Планка. Фотоны

1. Начало XX века связывают с революцией в физике, стартовым аккордом которой стала гипотеза Планка о квантах энергии. Как известно, гипотезе всегда предшествует некая проблема. Этой огромной проблемой оказалась попытка объяснения распределения энергии в спектрах теплового излучения, связанного с ультрафиолетовой катастрофой. Даже законы электромагнетизма Максвелла, раскрывшие электромагнитную волновую природу света и точно определившие скорость его распространения, оказались несостоятельными объяснить, почему экспериментальная кривая функции $r_{\lambda,T}$ в области коротких длин световых волн резко идет к минимуму (рис. 8.6.1). Исчерпывающий ответ на этот вопрос дал М. Планк.

14 декабря 1900 г. Макс Планк в докладе на заседании Берлинского физического общества выдвинул революционную гипотезу. Эта гипотеза, названная позже гипотезой Планка, формулируется следующим образом: *излучение света веществом происходит не непрерывно, как это утверждает классическая физика, а порциями.*

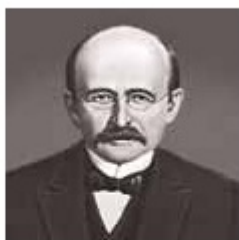
Самую наименьшую порцию энергии электромагнитной волны, в том числе и света, М. Планк назвал *квантом* и показал, что такая порция энергии определяется формулой:

$$E = h\nu, \quad (8.11)$$

где h – постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, которая является одной из фундаментальных постоянных Вселенной.

2. После выдвижения Планком гипотезы о квантах энергии ему удалось найти вид функции $r_{\nu,T}$:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{e^{kT} - 1}, \quad (8.12)$$



Макс Карл Эрст Людвиг Планк (1858–1947) – немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1918) и других наград, член Прусской академии наук (1894), ряда иностранных научных обществ и академий наук. На протяжении многих лет являлся одним из руководителей немецкой науки.

где $\Delta\varepsilon$ – энергия осциллятора; ν – частота излучения; c и k – постоянные (скорость света и постоянная Больцмана соответственно); T – температура источника излучения (осциллятора).

Энергия осциллятора $\Delta\varepsilon$, согласно смелой гипотезе Планка, дискретна, т.е. энергия не меняется непрерывно, только порциями: $\Delta\varepsilon$; $2\Delta\varepsilon$; $3\Delta\varepsilon$; $\Delta\varepsilon$ – величина, отличная от нуля.

Если разность энергии стремится к нулю $\Delta\varepsilon \rightarrow 0$ (т.е. энергия изменяется непрерывно, как в классической физике), то второй множитель в формуле (8.12) принимает значение kT :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}} - 1} = kT.$$

В этом случае формула (8.12) переходит в формулу Рэлея – Джинса (8.8).

А если энергия изменяется только порциями $\Delta\varepsilon = h\nu$, то формула (8.12) принимает следующий вид:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (8.13)$$

Это выражение получило название **закона Планка**.

График зависимости $r_{\nu,T}$, построенный по формуле Планка (8.13), точно совпадает с экспериментальными данными (рис. 8.6.1).

Таким образом, было доказано и экспериментально, и теоретически, что энергия излучения изменяется не непрерывно, как это утверждает классическая физика, а только дискретно, минимальная порция которой равна одному кванту: $E = h\nu$.

В области малых частот $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$ формула Планка (8.13) переходит в формулу Рэлея – Джинса. Это говорит о том, что в области малых частот формула Планка не противоречит классической теории. Таким образом, формула Планка дает исчерпывающее описание равновесного теплового излучения.

3. Как известно еще из классической физики, свет проявляет **дуалистическое** (двойное) свойство: в одних случаях, раскрывая корпускулярное свойство, ведет себя как частица, в других – как электромагнитная волна.

Фотон называется элементарная частица, не имеющая массы покоя и электрического заряда, но являющаяся переносчиком электромагнитного взаимодействия, квантом электромагнитного поля.

Так как энергия фотона равна $E = h\nu$, а энергия связана с массой соотношением $E = mc^2$, то масса движущегося фотона равна $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

Отметим вкратце следующие свойства фотона:

- У фотона нет массы в состоянии покоя.
- Масса движущегося фотона равна $m = \frac{h\nu}{c^2}$.
- Скорость фотона равна скорости света c .
- Импульс фотона равен $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
- Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча.



Вопросы

1. Почему классическая теория не смогла объяснить экспериментальную кривую зависимости спектральной плотности излучения черного тела от частоты?
2. Как формулируется гипотеза Планка? Что такое квант излучения? Какой формулой определяется его величина?
3. Какой вид имеет функция $r_{\nu, T}$, представляющая спектральную плотность черного тела по Планку? Как записывается формула Планка для этой функции? При каких условиях формула Планка переходит в формулу Рэля – Джинса?
4. Что такое фотон? Какими свойствами он обладает?



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Уровень А

- 8.7.1. Выразите энергию фотона красного света $2,7 \cdot 10^{-19}$ Дж и энергию фотона фиолетового света $5 \cdot 10^{-19}$ Дж в электрон-вольтах. (Ответ: 1,7 эВ; 3,1 эВ.)
- 8.7.2. Какова длина волны света, соответствующая фотонам с энергией $5 \cdot 10^{-19}$ Дж? (Ответ: ≈ 400 нм.)
- 8.7.3. Какова длина электромагнитной волны фотона с энергией 3 эВ? К какому типу электромагнитных волн следует отнести данное излучение? (Ответ: 414 нм, видимое излучение.)

Уровень В

- 8.7.4. Сколько фотонов испускает в 1 с электрическая лампочка мощностью 100 Вт, если средняя длина волны излучения составляет 600 нм, а световая отдача лампы – 3,3%? (Ответ: 10^{19} .)
- 8.7.5. Чувствительность сетчатки глаза к желтому свету ($\lambda = 600$ нм) составляет $1,7 \cdot 10^{-18}$ Вт. Сколько фотонов должно падать каждую секунду на сетчатку, чтобы свет был воспринят? (Ответ: 5 фотонов.)

8.7.6. Источник света мощностью 100 Вт испускает $5 \cdot 10^{22}$ квантов за 4 с. Найдите среднюю длину волны излучения. (Ответ: 25 мкм.)

Уровень С

8.7.7. Два излучателя мощностью по 100 Вт каждый создают однородное излучение с частотами $\nu_1 = 3,9 \cdot 10^{14}$ Гц и $\nu_2 = 25 \cdot 10^{18}$ Гц. Какова энергия фотона от каждого источника? Сколько фотонов в 1 с излучает каждый источник? В каком излучении отчетливее проявляются волновые свойства, а в каком – квантовые? (Ответ: Ответ: 1,62 эВ; 0,1 МэВ; $3,9 \cdot 10^{20}$; $6 \cdot 10^{15}$.)

8.7.8. На поверхность металла падает поток излучения с длиной волны 0,36 мкм, мощность которого равна 5 мкВт. Определите силу фототока насыщения, если $1/20$ часть всех падающих фотонов выбивает из металла электроны. (Ответ: 72,4 нА.)

§ 8.8

Фотоэффект. Применение фотоэффекта



Александр

Григорьевич Столетов (1839–1896) – русский физик, заслуженный профессор Московского университета. Получил кривую намагничивания железа (1872), систематически исследовал внешний фотоэффект (1888–1890), открыл первый закон фотоэффекта. Исследовал газовый разряд, критическое состояние и другие явления. Основал физическую лабораторию в Московском университете.

1. Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу теплового излучения черного тела, получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении явления фотоэффекта, открытие и исследование которого сыграли важную роль в становлении квантовой теории.

Фотоэффект обнаружен (1887) Г. Герцем, наблюдавшим усиление процесса разряда при облучении искрового промежутка ультрафиолетовым излучением.

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым А. Г. Столетовым.

Фотоэффектом называется явление вырывания электронов из вещества под действием света.

Действительно, если зарядить цинковую пластину (рис. 8.8.1, б), присоединенную к электрометру, отрицательно и освещать ее электрической дугой, то электрометр быстро разрядится (рис. 8.8.1, а).

Это означает, что электроны под действием света покидают поверхность цинковой пластины. А если пластину зарядить положительно, то показание электрометра остается неизменным.

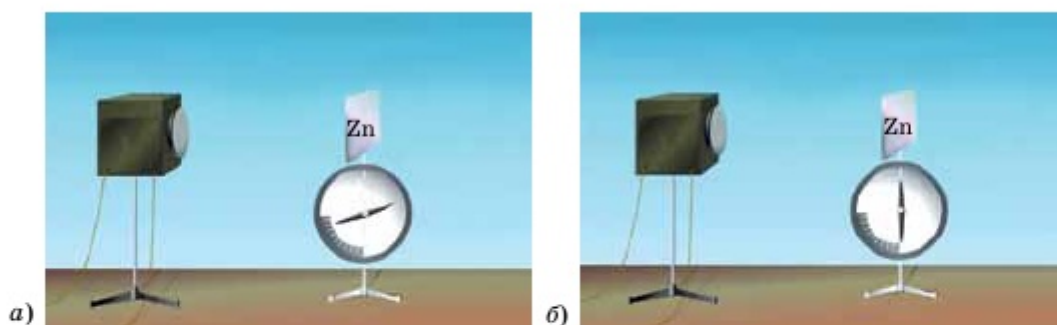


Рис. 8.8.1. Отрицательно заряженная пластина быстро теряет электроны, когда она освещается электрической дугой

Происходящее явление объясняется следующим образом: при положительном заряде пластины электроны также могут вырываться из пластины пучком света, но начинают обратно притягиваться к ней вследствие того, что заряды разноименные. При отрицательном заряде пластины электроны покидают ее поверхность под действием света, поэтому пластина быстро разряжается.

Если поставить стекло на пути пучка света, вырывающего электроны с поверхности пластины, то процесс испускания электронов прекратится. Значит, мы имеем дело с ультрафиолетовым излучением, поскольку стекло его задерживает. Следовательно, электроны вырываются под действием только ультрафиолетового составляющего света.

2. На *рис. 8.8.2* приведена схема установки для наблюдения и исследования явления фотоэффекта.

Два электрода (катод *K* из исследуемого металла и анод *A* – в схеме Столетова применялась металлическая сетка) в вакуумной трубке подключены к батарее так, что с помощью потенциометра *R* можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окошко), измеряется включенным в цепь миллиамперметром. Облучая катод светом различных длин волн, *Столетов установил следующие закономерности, не утратившие своего значения до нашего времени:*

1. **Наиболее эффективное действие для вырывания электронов оказывает ультрафиолетовое излучение.**
2. **Под действием света вещество теряет только отрицательные заряды.**
3. **Сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.**

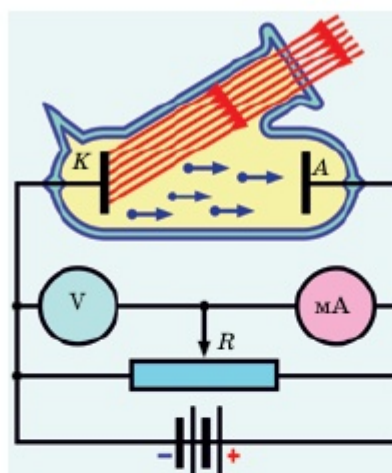


Рис. 8.8.2. Схема установки для наблюдения фотоэффекта

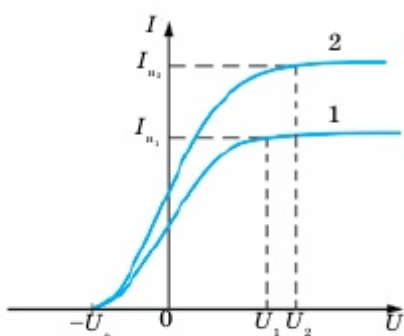


Рис. 8.8.3. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

характеристики фотоэлемента (рис. 8.8.3) что значение тока не меняется.

Из вольт-амперной характеристики следует, что при $U = 0$ фототок не исчезает. Следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой начальной скоростью v , а значит, и отличной от нуля кинетической энергией и могут достигнуть анода без внешнего поля. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить *задерживающее напряжение* U_s . При $U = U_s$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью v_{\max} , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Этот момент наступает, когда кинетическая энергия самых быстрых электронов становится равной работе электрического поля на участке с разностью потенциалов U_s . Следовательно,

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_s, \quad (8.14)$$

т.е., измерив задерживающее напряжение U_s , при котором фототок равен нулю (рис. 8.8.3), можно определить максимальные значения скорости и кинетической энергии фотоэлектронов.

При изучении вольт-амперных характеристик разнообразных материалов (важна чистота поверхности, поэтому измерения проводятся в вакууме и на свежих поверхностях) при различных частотах падающего на катод излучения и различных энергетических освещенностях катода и обобщения полученных данных были установлены следующие *три закона фотоэффекта*.

1. При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых с катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

2. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света, ниже которой фотоэффект невозможен.

При вырывании электрона из вещества фотон сообщает ему достаточную энергию, которая расходуется на совершение электроном работы выхода $A_{\text{вых}}$

3. С помощью схемы, приведенной на рис. 8.8.2, измеряли фототок и ток насыщения. Измерялось значение фототока в зависимости от приложенного напряжения между анодом и катодом. При увеличении фототока все больше электронов с катода достигало анода. Максимальное значение фототока I_{\max} – фототок насыщения определяется таким напряжением U , при котором все электроны достигают анода.

Фототок насыщения – это максимальное значение тока. Даже увеличивая дальше напряжение, можно увидеть из вольт-амперной

из металла и на сообщении вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv_{\max}^2}{2}$. Следовательно, согласно закону сохранения энергии, можно написать следующую формулу:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (8.15)$$

Уравнение (8.15) называется *уравнением Эйнштейна* для фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна позволяет объяснить два последних закона фотоэффекта, которые были приведены выше. Из (8.15) непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (т.е. от числа фотонов), так как ни $A_{\text{вых}}$, ни ν от интенсивности света не зависят (второй закон фотоэффекта). Так как с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A_{\text{вых}} = \text{const}$), то при некоторой достаточно малой частоте $\nu = \nu_0$ кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (третий закон фотоэффекта). Согласно изложенному из (8.15) получим:

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (8.16)$$

Эта формула определяет *красную границу фотоэффекта* для данного металла. Она зависит лишь от работы выхода электрона, т.е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Выражение (8.15) можно записать, используя (8.14) и (8.16), в виде:

$$eU_s = h(\nu - \nu_0). \quad (8.17)$$

4. Рассмотрим *применение фотоэффекта*.

На явлении фотоэффекта основано действие фотоэлектронных приборов, получивших разнообразное применение в различных областях науки и техники. В настоящее время практически невозможно указать отрасли производства, где бы не использовались фотоэлементы – приемники излучения, работающие на основе фотоэффекта и преобразующие энергию излучения в электрическую.

Простейшим фотоэлементом с внешним фотоэффектом является *вакуумный фотоэлемент* (рис. 8.8.4). Он представляет собой откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого (за исключением окошка для доступа излучения) покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещаемая в центре баллона. Фотоэлемент включается в цепь батареи, ЭДС которой выбирается такой, чтобы

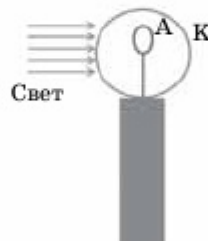


Рис. 8.8.4. Вакуумный фотоэлемент

обеспечить фототок насыщения. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьмяно-цезиевый.

При попадании света на катод элемента в цепи возникает электрический ток, который позволяет включать и выключать реле. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество автоматов, например, в метро. Он срабатывает при пересечении светового пучка, если предварительно не пропущена карточка. Также эти автоматы могут предотвращать аварии. На заводе фотоэлемент мгновенно останавливает мощный пресс, если рука человека оказывается в опасной зоне. С помощью фотоэлементов воспроизводится звук, записанный на пленке.

Следующий тип используемых фотоэлементов – это **полупроводниковые фотоэлементы**, или **фотосопротивления** (фоторезисторы), они обладают гораздо большей интегральной чувствительностью, чем вакуумные. Для их изготовления используются PbS, CdS, PbSe и некоторые другие полупроводники. Принцип действия полупроводниковых фотоэлементов следующий. Полупроводник имеет устойчивую структуру. Атомы прочно связаны ковалентной связью. Если энергии кванта хватает, чтобы разорвать связь электрона с атомом, электрон становится свободным. На его месте рождается дырка – положительный заряд, равный заряду электрона. Если приложить разность потенциалов, появится электрический ток.

Слабую проводимость чистых полупроводников увеличивают с помощью примесей других веществ, чтобы получить больше свободных положительно или отрицательно заряженных частиц. В зависимости от природы примесей полупроводники делятся на два типа, например:

- примеси, создающие избыток электронов, образуют полупроводник *n*-типа;
- примеси, создающие избыток дырок, – полупроводник *p*-типа.

Если соединить материал *n*-типа и *p*-типа, на границе произойдет перераспределение зарядов: дырки будут двигаться в *n*-область, а электроны – в *p*-область, пока на границе не возникнет двойной слой зарядов, называемый *p-n*-переходом, и электрическое поле, препятствующее их дальнейшему перераспределению (рис. 8.8.5).

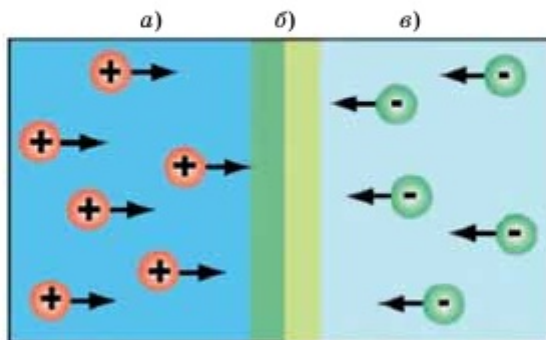


Рис. 8.8.5. Полупроводниковый фотоэлемент: а) материал *p*-типа; б) *p-n*-переход; в) материал *n*-типа

Если цепь с полупроводниковым фотоэлементом замкнуть, появится электрический ток, пропорциональный:

- интенсивности светового потока;
- площади полупроводника;
- времени действия света.

Использование полупроводниковых фотоэлементов имеет ряд преимуществ.

Если фотокатоды вакуумных фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей имеют красную границу фотоэффекта не выше 1,1 мкм, то применение фотосопротивлений позволяет производить измерения в далекой инфракрасной области спектра (3÷4 мкм), а также в областях рентгеновского и гамма-излучений. Кроме того, они малогабаритны и имеют низкое напряжение питания. Недостаток фотосопротивлений – их заметная инерционность, поэтому они непригодны для регистрации быстропеременных световых потоков.

Кремниевые и другие вентиляльные фотоэлементы применяются для создания солнечных батарей, непосредственно преобразующих световую энергию в электрическую. В настоящее время солнечные батареи являются альтернативными источниками энергии и используются во многих сферах жизни: космонавтике, самолетостроении, энергообеспечении зданий, для зарядки сотовых телефонов, для автомобилей, светофоров, садов и дач.

5. В настоящее время в Казахстане производством фотоэлектрических модулей на основе казахстанского кремния занимается компания Astana Solars, открытая в 2012 году при инициативе Первого Президента Н. А. Назарбаева. Кроме охвата многих сфер промышленности, солнечные батареи были установлены также во многих крестьянских хозяйствах. Благодаря батареям люди имеют возможность освещать свои дома, многие покупают дополнительно спутниковые антенны и смотрят до 50 телеканалов. Панели, которые в течение дня собирают солнечную энергию, вечером дают возможность не только освещать дома на горных зимовках и юрты на жайлау, но и смотреть телевизоры (рис. 8.8.6).



Рис. 8.8.6. Применение солнечных батарей в крестьянских хозяйствах

Рассмотрим *принцип действия солнечной батареи*. Солнечная энергия преобразуется в последовательно подключенных фотоэлементах. Основой фотоэлемента является кристалл кремния. Соединения кремния очень распространены в природе. Самый известный – это оксид кремния, или песок. На полученные пластины кремния нанесен с одной стороны слой бора, а с другой – фосфора. При попадании солнечного света на фотоэлементы батареи их поверхность бомбардируется фотонами, которые выбивают избыточные электроны на границе с фосфором, и те в свою очередь начинают движение к «дыркам» на границе с бором. Таким образом, возникает электрический ток, являющийся упорядоченным движением электронов. К фотоэлементу подводятся металлические дорожки, через которые проходит ток. В этом и заключается принцип работы кремниевого фотоэлемента.



Вопросы

1. Какое явление называется фотоэффектом? Объясните, нарисовав схему для наблюдения фотоэффекта.
2. Как формулируются закономерности фотоэффекта, открытые Столетовым?
3. Что такое фототок насыщения? Объясните, нарисовав кривую вольт-амперной характеристики фотоэлемента.
4. Как формулируются основные законы фотоэффекта?
5. Как записывается уравнение (формула) Эйнштейна для фотоэффекта? Как находят красную границу фотоэффекта для данного материала?
6. Где применяется фотоэффект?
7. Какие виды и типы фотоэлементов существуют?
8. Как устроен принцип действия солнечных батарей?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Поток фотонов выбивает из металла фотоэлектроны, максимальная кинетическая энергия которых равна 10 эВ. Энергия фотонов в 3 раза больше работы выхода фотоэлектронов. Какова энергия фотонов?

<p>Д а н о: $E_k = 10 \text{ эВ}$ $E_\phi = 3 A_{\text{вых}}$</p>	<p>Р е ш е н и е: Напишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:</p> $E_\phi = A_{\text{вых}} + E_k.$
<p>$E_\phi - ?$</p>	<p>Учитывая, что $E_\phi = 3A_{\text{вых}}$, $A_{\text{вых}} = \frac{E_\phi}{3}$, получили</p> $E_\phi = \frac{E_\phi}{3} + E_k, \quad \frac{2E_\phi}{3} = E_k, \quad E_\phi = \frac{3E_k}{2} = 15 \text{ (эВ)}.$

О т в е т: $E_\phi = 15 \text{ (эВ)}$.

Задача 2. Цезий освещается монохроматическим светом с длиной волны 340 нм. Определите наименьшее задерживающее напряжение, при котором фототок прекратится. Красная граница для цезия равна 658 нм.

<p>Д а н о: $\lambda = 340$ нм $\lambda_{\max} = 658$ нм $U_s - ?$</p>	<p>СИ $3,4 \cdot 10^{-7}$ м $6,58 \cdot 10^{-7}$ м</p>	<p>Р е ш е н и е: Задерживающее напряжение можно найти из условия</p> $eU_s = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (1)$
---	---	---

где e – заряд электрона.

Согласно уравнению Эйнштейна,

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (2)$$

где работа выхода

$$A = h\nu_0. \quad (3)$$

Вспользуемся тем, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, тогда

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}; \quad A = \frac{hc}{\lambda_{\max}}.$$

Подставив (3) в (2), найдем максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) = hc \frac{\lambda_{\max} - \lambda}{\lambda_{\max} \lambda}. \quad (4)$$

Учитывая выражение (4) и формулу (1), получаем

$$eU_s = hc \frac{\lambda_{\max} - \lambda}{\lambda_{\max} \lambda},$$

откуда задерживающее напряжение

$$U_s = hc \frac{\lambda_{\max} - \lambda}{e\lambda_{\max} \lambda} = 1,76 \text{ (В)}.$$

О т в е т: $U_s = 1,76$ (В).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Уровень А

- 8.8.1. Какую максимальную кинетическую энергию имеют электроны, вырванные из оксида бария, при облучении светом частотой 1 ПГц (петагерц)? Учтем, что работа выхода в оксиде бария равна 1,008 эВ. (Ответ: 3,136 эВ.)
- 8.8.2. Определите наибольшую скорость электрона, вылетевшего из цезия, при освещении его светом с длиной волны 400 нм. Учтем, что работа выхода электрона из цезия равна 2,08 эВ. (Ответ: 600 км/с.)

Уровень В

- 8.8.3. Красная граница фотоэффекта для металла равна $6,2 \cdot 10^{-5}$ см. Найдите величину запирающего напряжения для фотоэлектронов при освещении металла светом длиной волны 330 нм. (Ответ: 1,76 В.)

- 8.8.4. На рис. 8.8.7 показан график зависимости кинетической энергии E фотоэлектронов от частоты поглощенного света. 1) Какой точке на графике соответствует граничная частота фотоэффекта? 2) Как по графику определить работу выхода A и постоянную Планка h ? Обоснуйте ответ. (Ответ: 1) точка D ; 2) работа выхода равна произведению постоянной Планка, умноженной на значение частоты в точке D , а для того, чтобы определить постоянную Планка, нужно взять любую точку на графике. Абсцисса этой точки соответствует частоте, ордината – энергии. Разделив энергию, получим постоянную Планка). Докажите правильность ответов.

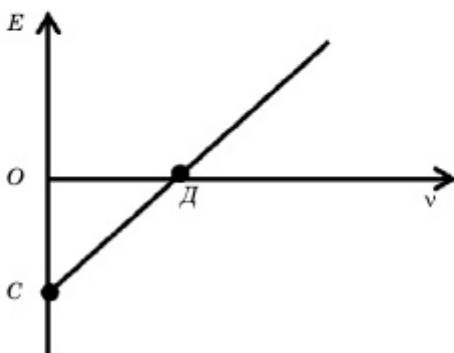


Рис. 8.8.7

- 8.8.5. Металл освещается монохроматическим излучением с длиной волны 40 нм. Определите красную границу фотоэффекта для металла, если напряжение, при котором прекратится фототок, равно 28,9 В. (Ответ: 571 нм.)
- 8.8.6. Рентгеновская трубка работает под напряжением 50 кВ. Какова наименьшая длина волны испускаемого ею излучения? (Ответ: $2,5 \cdot 10^{-11}$ м.)
- 8.8.7. На катод фотоэлемента падает монохроматический световой поток с энергией фотонов, превышающей работу выхода электронов в три раза. Длина волны света составляет 141 нм. Электроны, вылетевшие из катода, попадают в тормозящее электрическое поле. Найдите задерживающую разность потенциалов. (Ответ: 17,6 В.)

Уровень С

- 8.8.8. Фотоны с энергией 3 эВ вырывают фотоэлектроны из металла, для которого работа выхода составляет 2,48 эВ. Определите максимальный импульс, передаваемый поверхности этого металла при вылете электрона. (Ответ: $3,89 \cdot 10^{-25}$ кг · м/с.)
- 8.8.9. Катод фотоэлемента освещается светом с длиной волны 0,5 мкм и мощностью 1 Вт. Величина силы тока насыщения фотоэлемента равна 4 мА. Какое количество фотонов приходится на один электрон, выбиваемый из катода? (Ответ: 100.)
- 8.8.10. Фотокатод, покрытый кальцием ($A_{\text{вых}} = 4,42 \cdot 10^{-19}$ Дж), освещается светом, у которого длина волны составляет 300 нм. Вылетевшие из катода электроны попадают в однородное магнитное поле индукцией $8,3 \cdot 10^{-4}$ Тл перпендикулярно линиям индукции этого поля. Чему равен максимальный радиус окружности, по которой движутся электроны? Ответ выразите в мм. (Ответ: 4,77 мм.)

8.8.11. Фотоэлектроны, выбитые с поверхности плоского катода светом с длиной волны $2,5 \cdot 10^{-7}$ м, попадают в однородное магнитное поле с индукцией $3 \cdot 10^{-4}$ Тл, линии которого параллельны поверхности катода. Максимальный радиус полуокружности, по которой движутся электроны, вылетевшие по нормали к катоду, равен 2 см. Найдите длину волны, соответствующую красной границе фотоэффекта. (Ответ: 688 нм.)

§ 8.9

Давление света

1. Существование давления света предсказывали еще Иоганн Кеплер по появлению хвостов комет вблизи Солнца и Максвелл на основе электромагнитной теории света, предполагая, что под действием переменного электрического поля электромагнитной волны электроны в телах совершают колебания. При этом образуется электрический ток, направленный вдоль напряженности электрического поля. На упорядоченно движущиеся электроны действует сила Лоренца со стороны переменного магнитного поля, направленная в сторону распространения электромагнитной волны. Это и есть **сила светового давления**. Согласно квантовой теории, давление света на поверхность обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с поверхностью передает ей свой импульс.

Результаты экспериментов П. Н. Лебедева и более поздних исследователей полностью согласовывались с величиной светового давления, рассчитанной Максвеллом, что явилось еще одним подтверждением электромагнитной теории света. Измеренное давление солнечного света, как и рассчитанное Максвеллом, оказалось очень малым ($p = 4,3 \cdot 10^{-6}$ Н/м²).

Хотя давление света очень мало в обычных условиях, его действие тем не менее может оказаться существенным. В недрах звезд при температуре в несколько десятков миллионов кельвинов давление электромагнитного излучения, достигая громадных значений, противостоит не менее громадной силе тяготения звездной массы; благодаря этому звезды, не испытывая коллапса, существуют миллиарды лет. Силы светового давления наряду с гравитационными силами играют значительную роль во внутризвездных процессах. Световым давлением объясняется появление хвостов комет при приближении к Солнцу.

2. Давление света впервые экспериментально было обнаружено русским ученым П. Н. Лебедевым в 1901 году. В своих опытах он установил, что давление света зависит от *интенсивности света* и от *отражающей способности тела*. В опытах



Петр Николаевич Лебедев (1866–1912) – русский физик-экспериментатор, первым подтвердивший на опыте вывод Максвелла о наличии светового давления. Создатель первой в России научной физической школы, ординарный профессор Московского университета (1900–1911).

была использована вертушка, имевшая черные и зеркальные лепестки, помещенная в вакуумированную колбу (рис. 8.9.1), которая подвешена на тонкую стеклянную нить. Свет падает на крылышки, расположенные по одну сторону стерженька. О значении давления можно судить по углу закручивания нити.

П. Н. Лебедев мастерски сумел преодолеть немало трудностей при проведении весьма тонкого эксперимента. Так, например, трудность точного измерения давления света была связана с тем, что из сосуда невозможно было выкачать весь воздух. При проведении эксперимента начиналось движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда. Крылышки невозможно повесить абсолютно вертикально.

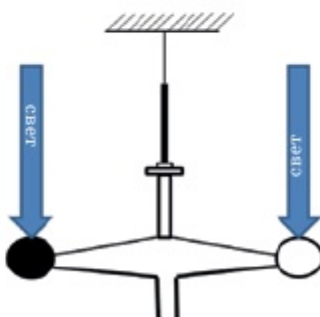


Рис. 8.9.1. Схема опыта П. Н. Лебедева

Нагретые потоки воздуха поднимаются вверх, действуют на крылышки, что приводит к возникновению дополнительных вращающих моментов.

Также на закручивание нити влияет неоднородный нагрев сторон крылышек. Сторона, обращенная к источнику света, нагревается больше, чем противоположная. Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс. Все эти трудности могли бы внести большие погрешности при определении истинного значения давления света.

3. Рассчитаем с точки зрения квантовой теории световое давление, оказываемое на поверхность тела потоком монохроматического излучения (частотой ν), падающего перпендикулярно поверхности. Если в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает N фотонов, то при коэффициенте отражения ρ света от поверхности тела ρN фотонов отразится, а $(1 - \rho)N$ поглотится. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс $p_\gamma = \frac{h\nu}{c}$, а каждый отраженный — $2p_\gamma = \frac{2h\nu}{c}$ (при отражении импульс фотона изменяется на $-p_\gamma$). Давление света на поверхность равно суммарному импульсу, который передают поверхности ρN отраженных и $(1 - \rho)N$ поглощенных фотонов за 1 с:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho)N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N, \quad (8.18)$$

$E = Nh\nu$ есть энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности

в единицу времени, а $w = \frac{E}{c}$ – объемная плотность энергии излучения. Из этого следует

$$p = \frac{E}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho), \quad (8.19)$$

где ρ – коэффициент отражения света (для зеркальной поверхности $\rho = 1$, для зачерненной поверхности $\rho = 0$).

Формула (8.19), выведенная на основе квантовых представлений, совпадает с выражением, получаемым из электромагнитной (волновой) теории Максвелла. Таким образом, давление света одинаково успешно объясняется и волновой, и квантовой теорией.



Вопросы

1. Как объяснить возникновение светового давления на основе волновой электромагнитной теории и астрономических явлений, наблюдаемых в движениях комет вокруг Солнца? Влияет ли световое давление на устойчивость звезд?
2. В чем заключается физическая сущность и экспериментальная трудность опыта Лебедева?
3. Как определяется давление света с позиции квантовой теории?



Задание (теоретическое исследование)

Письменно обоснуйте свои ответы на следующие вопросы.

1. Чему равно давление света в случае идеально отражающего зеркала; полностью поглощающей поверхности? В обоих случаях свет падает на поверхность нормально.
2. Для какой из поверхностей (идеально отражающей или идеально поглощающей) световое давление меньше?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Определите давление света на стенки электрической лампочки мощностью 150 Вт, принимая, что вся потребляемая мощность идет на излучение и стенки лампочки отражают 15% падающего на них света. Колба лампочки – сферический сосуд радиусом 4 см.

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$P = 150 \text{ Вт}$		Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность, равно
$\rho = 0,15$		
$R = 4 \text{ см}$	0,04 м	$p = \frac{E_c}{c}(1 + \rho),$
$p = ?$		где E_c – энергия всех фотонов (количество световой энергии, падающей на единицу площади поверхности лампы в единицу времени).

Так как мощность лампочки (световая энергия, приходящаяся на всю поверхность лампочки за единицу времени) известна, то

$$E_c = \frac{P}{S},$$

где $S = 4\pi R^2$ – поверхность лампочки. Тогда

$$p = \frac{P}{4\pi R^2 c} (1 + \rho) = 2,86 \cdot 10^{-5} \text{ (Па)}.$$

О т в е т: $p = 2,86 \cdot 10^{-5}$ (Па).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Уровень А

- 8.9.1. Перпендикулярно поверхности площадью 150 см^2 ежеминутно падает 81 Дж световой энергии. Определите световое давление на идеально отражающую плоскую поверхность; на зачерненную плоскую поверхность. (Ответ: $6 \cdot 10^{-7}$ Па; $3 \cdot 10^{-7}$ Па.)
- 8.9.2. На зачерненную поверхность площадью 10 см^2 за время 5 минут нормально падает монохроматический свет, энергия которого равна 12 Дж. Определите облученность поверхности (энергию, падающую на единицу площади поверхности); световое давление, оказываемое на поверхность. (Ответ: $12 \cdot 10^3$ Дж/м²; $1,33 \cdot 10^{-7}$ Па.)
- 8.9.3. Давление света на стенки электрической лампочки мощностью $P = 100$ Вт составляет $p = 0,12$ мкПа. Принимая, что вся потребляемая мощность идет на излучение, а стенки лампочки отражают 10% падающего на них света, определите радиус лампочки (лампочку считать сферическим сосудом). (Ответ: 0,493 м.)

Уровень В

- 8.9.4. Давление монохроматического света на поверхность, расположенную перпендикулярно падающему свету, равно 1,1 мкПа. Определите число фотонов, падающих ежесекундно на 1 м^2 поверхности. Длина волны падающего света равна 663 нм, коэффициент отражения поверхности составляет 0,1. (Ответ: 10^{21} .)
- 8.9.5. Энергия фотона в потоке монохроматического излучения составляет $4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Какова длина волны этого излучения в воде, если показатель преломления $4/3$? (Ответ: 339 нм.)
- 8.9.6. Угол падения света из воздуха в стекло равен 45° , а угол преломления – 30° . Длина волны света в стекле составляет 0,33 мкм. Определите энергию отдельного фотона. (Ответ: 2,66 эВ.)
- 8.9.7. Свет с длиной волны, равной 0,5 мкм, падает на зеркальную поверхность под углом 30° . Найдите величину импульса, получаемого поверхностью при отражении от нее одного фотона. (Ответ: $2,3 \cdot 10^{-27}$ кг · м/с.)
- 8.9.8. На поверхность площадью 100 см^2 нормально падает ежеминутно 63 Дж световой энергии. Найдите световое давление в случае, когда поверхность полностью поглощает все падающее излучение. (Ответ: $3,5 \cdot 10^{-7}$ Па.)

Уровень С

- 8.9.9. Излучение лазера мощностью 15 Вт и длительностью 0,1 с попадает на стоящий перпендикулярно направлению его распространения кусочек идеальной отражающей фольги массой 1 мг. Определите скорость кусочка фольги после отражения света. (Ответ: 0,01 мм/с.)

8.9.10. Источник мощностью 100 Вт дает параллельный пучок света, падающий перпендикулярно поверхности. Определите силу давления света, оказываемую пучком на поверхность, если 50% падающего на поверхность света отражается, а остальные 50% поглощаются. (Ответ: $5 \cdot 10^{-7}$ Н.)

§ 8.10

Химическое действие света

1. Отдельные молекулы поглощают световую энергию порциями – квантами $h\nu$. В случае видимого и ультрафиолетового излучений эта энергия достаточна для расщепления многих молекул. В этом проявляется химическое действие света.

Действие света нашло отражение в **законах фотохимии**:

- *Поглощенный веществом фотон может вызвать превращение только одной молекулы.*
- *Фотохимическая реакция возможна при условии, что энергия фотона достаточна для разрыва молекулярных связей, т.е. не меньше энергии диссоциации.*

Любое превращение молекул есть химический процесс. Часто после расщепления молекул светом начинается целая цепочка химических превращений. Выцветание тканей на солнце и образование загара – это примеры химического действия света.

Важнейшие химические реакции под действием света происходят в зеленых листьях деревьев и траве, в иглах хвой, во многих микроорганизмах. В зеленом листе под действием солнечного света осуществляются процессы, необходимые для жизни на Земле. Они дают нам не только пищу, но и кислород для дыхания.

Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород.

Происходит это, как установил русский биолог Климент Аркадьевич Тимирязев, в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Пристраивая к углеродной цепочке атомы других элементов, извлекаемых корнями из земли, растения строят молекулы белков, жиров и углеводов.

Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. Причем здесь особенно важна не только сама энергия, но и та форма, в которой она поступает. Фотосинтез (так называют этот процесс) может протекать только под действием света определенного спектрального состава.

Механизм фотосинтеза еще не выяснен до конца. Когда это произойдет, для человечества, возможно, наступит новая эра. Белки и другие сложные органические вещества можно будет получать на фабриках под голубым небосводом.

2. Химическое действие света лежит в основе *фотографии (НЕ ЦИФРОВОЙ!)*. Чувствительный слой фотопластинки состоит из маленьких кристалликов бромида серебра (AgBr), вкрапленных в желатин. Если силуэтом, вырезанным из черной бумаги или фольги, частично закрыть светочувствительную бумагу и направить на нее дневной свет или свет от мощного источника, то освещенная часть фото-

графической бумаги потемнеет, силуэт на ней получится светлым. Потемнение бумаги можно ускорить, предварительно смочив ее проявителем. Схема процессов получения негативного и позитивного изображений на черно-белом фотоматериале представлена на *рис. 8.10.1*.

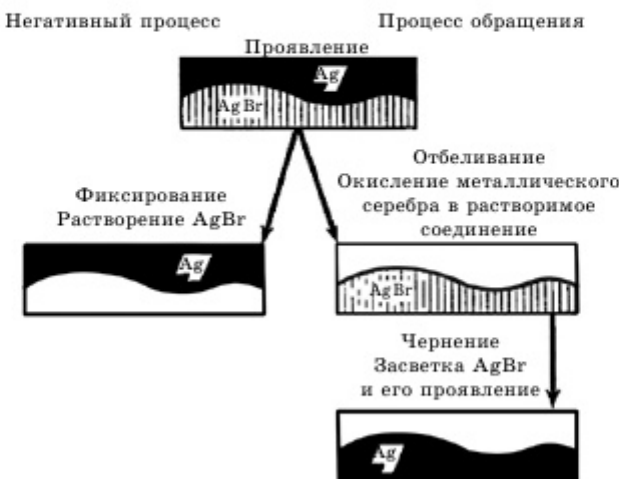


Рис. 8.10.1. Схема получения фотографических изображений



Вопросы

1. В чем состоит химическое действие света? На каких свойствах света основаны законы фотохимии? Как эти законы формулируются?
2. Какие превращения энергии происходят в цепи реакций фотосинтеза? Почему фотосинтез – основа жизни на Земле? Почему фотосинтез не происходит ночью, хотя на листья падают инфракрасные лучи?
3. Какой физико-химический процесс лежит в основе черно-белой фотографии?



Задание (практическое исследование)

Подготовьте презентацию об истории изобретения фотографии и процессе эволюции фотографической техники.

§ 8.11

Рентгеновское излучение

1. История открытия рентгеновского излучения относится к 1895 г., когда немецкий физик В. Рентген при бомбардировке металлических мишеней электронами, ускоренными электрическим полем, обнаружил новый вид излучения, названный им X-лучами. Впоследствии это излучение было названо рентгеновским.

Рентгеновские лучи возникают при резком торможении сильно ускоренных электронов либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов.

Оба эффекта, приводящие к испусканию рентгеновского луча, используются в так называемых рентгеновских трубках (рис. 8.11.1, а). Основными конструктивными элементами таких трубок являются металлические катод и анод. В рентгеновских трубках электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом. Вырванные с поверхности катода электроны, ускоренные электрическим полем в вакуумированной трубке, при торможении ударившись об анод, излучают *сплошное (непрерывное) рентгеновское излучение*, которое называется *тормозным рентгеновским излучением* (рис. 8.11.1, б). Такое излучение с более короткой длиной волны называется *жестким рентгеновским излучением*.

С другой стороны, ускоренные электроны, столкнувшись с атомами вещества анода, провоцируют высокоэнергетические переходы в их электронных оболочках, сопровождаемые испусканием рентгеновского излучения с характерным линейчатым спектром атомов данного вещества. Такое излучение называется *характеристическим рентгеновским излучением*. Характеристическое излучение, линейчатые спектры которого расположены на длинноволновой части спектра (рис. 8.11.1, б), является относительно *мягким рентгеновским излучением*.

По сравнению с видимым светом невидимое рентгеновское излучение беспрепятственно проходит через любое вещество.



Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923) – немецкий физик, работавший в Вюрцбургском университете.

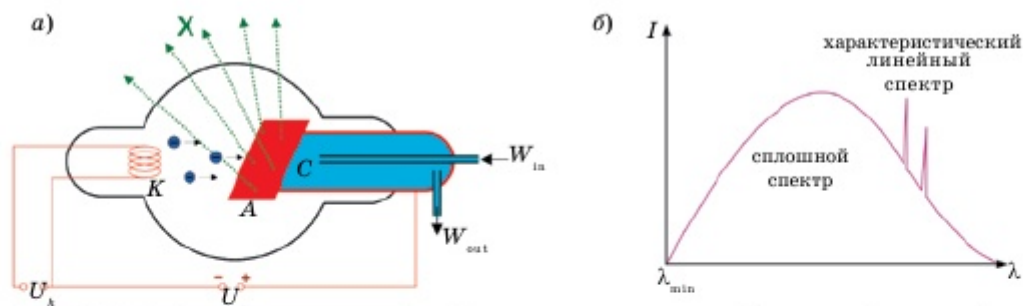


Рис. 8.11.1: а) рентгеновская трубка: X – рентгеновские лучи; K – катод; A – анод; C – теплоотвод; U_k – напряжение накала катода; U_a – ускоряющее напряжение; W_{in} – впуск водяного охлаждения; W_{out} – выпуск водяного охлаждения; б) спектр рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, у которых длины волн лежат в интервале примерно 10^{-12} – 10^{-8} м.

Рентгеновское излучение по-разному поглощается веществом, а потому различают *мягкое* рентгеновское излучение – оно сильно поглощается – и *жесткое* – мало поглощается (условно рентгеновское излучение с $\lambda > 2 \cdot 10^{-10}$ м считается мягким, с $\lambda < 2 \cdot 10^{-10}$ м – жестким).

2. Волновая природа рентгеновского излучения подтверждается наблюдаемой дифракцией рентгеновского излучения (1912) – явления, присущего всем видам волн. Известно, что для наблюдения дифракционной картины необходимо, чтобы постоянная решетки была того же порядка, что и длина волны падающего излучения. Это условие, по предположению немецкого физика М. Лауэ, выполняется для рентгеновского излучения при дифракции на кристаллах, так как периоды кристаллических решеток соизмеримы с длинами волн рентгеновского излучения. Действительно, если пучок рентгеновского излучения, выделенный с помощью двух диафрагм, направить на монокристалл, то на экране за монокристаллом наблюдается дифракционная картина в виде отдельных пятен, правильно расположенных вокруг центрального пятна. При дифракции на поликристаллах дифракционная картина рентгеновского излучения возникает в виде симметрично расположенных концентрических колец.

Появление рентгеновского аппарата стало настоящей революцией в диагностике: врачи получили возможность увидеть изображение внутренних органов, оценить их состояние. Однако этот метод имеет ряд недостатков: в частности, двумерный рентген приводит к тому, что изображения одних органов могут «накладываться» на изображения других, и в результате только от опыта и искусства врача, расшифровывающего рентгенограмму, зависит правильность постановки диагноза. Кроме того, из-за особенностей обследования на рентгенограмме нельзя увидеть ряд образований, например, грыжи или воспаления.

3. Все это способствовало разработке новых видов диагностики, среди которых особое место занимают *компьютерная и магнитно-резонансная томографии*. *Томография* как особый метод обеспечивает послойное исследование объекта и последующее формирование его трехмерного изображения.

Компьютерная томография – это обследование, которое проводится с помощью рентгеновских лучей. Но если при обычном рентгене лучи проходят сквозь тело и фокусируются на пленке или пластине, давая двумерное изображение, то при выполнении компьютерной томографии изображение получается объемным. Дело в устройстве аппарата: источником рентгеновских лучей служит кольцеобразный контур, внутри которого расположена специальная кушетка (стол) для пациента. Таким образом, выполняется целая серия рентгеновских снимков органов, полученных с разных точек и под разным углом. С помощью компьютера все изображения обрабатываются, и в итоге моделируется трехмерное изображение органа.

Магнитно-резонансная томография не нуждается в рентгеновских лучах, что является ее особым свойством. Данный вид томографии основан на явлении ядерного магнитного резонанса – способности протонов атома водорода (которых очень много в теле человека, более чем наполовину состоящем из воды) менять свою ориентацию в пространстве под воздействием сильного электромагнитного поля. Другими словами, магнитно-резонансную томографию можно проходить сколь угодно часто без риска превысить допустимую дозу радиации.

Исследования компьютерной и магнитно-резонансной томографий позволяют изучить структуру и состав тканей нужного органа, быстро выявить патологию и назначить верное лечение. В принципе, и тот, и другой вид диагностики может быть использован для изучения любой из систем человеческого тела. Однако каждый из методов обладает максимальной эффективностью лишь при исследовании определенного перечня органов, приведенных в *таблице 8.11.1*.

Таблица 8.11.1

*Применение компьютерной и магнитно-резонансной томографий
в исследовании человеческих органов*

Компьютерная томография	Магнитно-резонансная томография
<p>Наибольшей диагностической точностью КТ обладает при исследовании:</p> <ul style="list-style-type: none"> • костных структур; • сосудов, в том числе внутричерепных; • мочевыделительной системы; • легких; • органов грудной клетки; • лор-органов; • органов брюшной полости; • травмированных тканей при подозрении на кровоизлияние; • плотных новообразований 	<p>МРТ-обследования отличаются высокой информативностью при изучении:</p> <ul style="list-style-type: none"> • мягких тканей; • головного мозга; • спинного мозга; • органов малого таза; • позвоночного столба и межпозвоночных дисков; • суставов, связок; • трахеи, аорты, пищевода; • других органов с высоким содержанием жидкости



Дополнительный материал

За открытие X-лучей В. Рентген первым из физиков получил в 1901 году Нобелевскую премию.



Вопросы

1. Каков механизм возникновения рентгеновского излучения? На какие виды делится рентгеновское излучение?
2. Каковы основные свойства рентгеновского излучения? На чем основан принцип работы рентгеновской трубки?
3. Каковы преимущества и особенности компьютерной и магнитно-резонансной томографии?



Задание (практическое исследование)

Изучите вопрос, почему для определения качества сварных швов их просвечивают рентгеновским излучением, а за изделием помещают рентгеновскую пленку. Как после проявления пленки определяют качество шва? Ответ обсудите во время презентации.

§ 8.12

Единство корпускулярно-волновой природы света

1. В начале XVIII века стали активно проводиться исследования природы света. В это время конкурировали две альтернативные теории света – корпускулярная и волновая. Вопрос стоял так: свет – либо волна, либо поток частиц. В XIX в. после работ Юнга, Френеля и Максвелла по интерференции, дифракции и поляризации света проблема казалась решенной окончательно: свет – это электромагнитная волна. Однако в начале XX в. после работ Эйнштейна, Комптона и других ученых по излучению черного тела, фотоэффекту, эффекту Комптона было доказано, что свет – это поток фотонов – релятивистских частиц, несущих энергию и импульс.

В результате последующих исследований было окончательно установлено, что корпускулярно-волновая двойственность света является его неотъемлемым свойством. Свету присущи как непрерывные (волновые) свойства, так и дискретные (квантовые) свойства.

Таким образом, свет обладает двойственной неразделимой корпускулярно-волновой природой. Единство корпускулярно-волновой природы света называется вкратце «дуализмом» света.

Впервые к представлениям о корпускулярно-волновой двойственности свойств света пришел А. Эйнштейн при изучении флуктуаций энергии в единице объема излучения абсолютно черного тела и флуктуаций светового давления. Эти величины пропорциональны друг другу, и их флуктуации должны выражаться сходными формулами. Используя законы излучения абсолютно черного тела и методы статистической физики, Эйнштейн вычислил значения флуктуаций давлений и плотности энергии и получил формулы, содержащие сумму двух членов. Первый член (квантовый) соответствует представлению о свете как о потоке дискретных частиц – фотонов. Второй, член (волновой) описывает флуктуации в распространяющейся электромагнитной волне. Существенно, что только сумма двух этих членов дает правильные значения флуктуаций энергии и светового давления. При этом при больших частотах главную роль играет квантовый член, а при малых частотах – волновой.

Когда нами регистрируются усредненные результаты воздействия достаточно мощных световых потоков в течение сравнительно больших (в масштабах микромира) промежутков времени, то дискретность светового потока не играет роли и мы наблюдаем непрерывную волновую картину. Это аналогично тому, что в макромире мы не регистрируем дискретную структуру вещества, например, в гидродинамике жидкость рассматривают как непрерывную среду, не обращая внимания на то, что она состоит из молекул или атомов.

Если же мы регистрируем индивидуальные акты взаимодействия излучения с микрочастицами, например, с отдельными атомами, молекулами или электронами, то здесь дискретная структура излучения проявляется весьма наглядно –

отдельный фотон взаимодействует с одной частицей вещества. Здесь уместна аналогия с броуновским движением, когда проявляются отдельные акты взаимодействия броуновской частицы с отдельными молекулами.

Таким образом, электромагнитное излучение обнаруживает удивительное единство, казалось бы, *взаимоисключающих свойств – непрерывных* (волны) и *дискретных* (фотоны), которые взаимно дополняют друг друга.

2. Основные уравнения, связывающие корпускулярные свойства электромагнитного излучения (энергия и импульс фотона) с его волновыми свойствами (частота или длина волны), представлены следующими формулами:

$$\varepsilon_{\gamma} = h\nu, \quad (8.20)$$

$$p_{\gamma} = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (8.21)$$

Свойства непрерывности, характерные для электромагнитного поля световой волны, не следует противопоставлять свойствам дискретности, характерным для фотонов. Свет, обладая одновременно и корпускулярными, и волновыми свойствами, обнаруживает определенные закономерности в их проявлении. Так, *волновые свойства света проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные – в процессах взаимодействия света с веществом.*

Как видно из вышеприведенных формул, чем больше длина волны, тем меньше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются квантовые свойства света (с этим связано, например, существование красной границы фотоэффекта). Наоборот, чем меньше длина волны, тем больше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются волновые свойства излучения. Так, например, волновые свойства (дифракция) рентгеновского излучения обнаружены лишь после применения в качестве дифракционной решетки кристаллов, а волновые свойства света были обнаружены намного раньше, так как длина волны света на три порядка больше, чем рентгеновских излучений.

В *таблице 8.12.1* приведены явления, избирательно демонстрирующие либо волновые, либо корпускулярные свойства излучения.

Таблица 8.12.1

Явления, свидетельствующие о волновых и корпускулярных свойствах света

Явления	Волновая теория	Корпускулярная теория
Дифракция	+	–
Отражение	+	+
Преломление	+	+
Интерференция	+	–
Фотоэффект	–	+

**Вопросы**

1. Каковы основные положения и выводы волновой теории света?
2. Каковы основные положения и выводы корпускулярной теории света?
3. Почему возникло представление о двойственной корпускулярно-волновой природе света? Что понимается под определением «корпускулярно-волновой дуализм»?
4. Какими формулами характеризуется единство волновой и квантовой природы света?

**Задание (практическое исследование)**

Подготовьте доклад об историческом ходе развития научного познания законов природы на примере изучения свойств света.

§ 8.13**Модели атома. Опыт Резерфорда**

1. Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества («атомос» – неразложимый) возникло еще в античные времена (Демокрит, Эпикур, Лукреций). К началу XVIII в. атомистическая теория приобретает



все большую популярность, т.к. к этому времени в работах А. Лавуазье, М. В. Ломоносова и Д. Дальтона была доказана реальность существования атомов.

Эрнест Резерфорд (1871–1937) – британский физик новозеландского происхождения. Известен как «отец» ядерной физики. Лауреат Нобелевской премии. В 1911 году своим знаменитым опытом рассеяния альфа-частиц доказал существование в атомах положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов вокруг него. На основе результатов опыта создал планетарную модель атома.

Большую роль в развитии атомистической теории сыграл Д. И. Менделеев, разработавший в 1869 г. периодическую систему элементов, в которой впервые на научной основе был поставлен вопрос о единой природе атомов. Во второй половине XIX в. экспериментально было доказано, что электрон является одной из основных составных частей любого вещества. Эти выводы, а также многочисленные экспериментальные данные привели к тому, что в начале XX в. серьезно встал вопрос о строении атома.

Первая попытка создания на основе накопленных экспериментальных данных модели атома принадлежит Дж. Дж. Томсону (1903). Согласно этой модели, атом представляет собой положительно заряженный шар с равномерно распределенным зарядом радиусом порядка 10^{-10} м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны; суммарный отрицательный заряд

электронов равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом нейтрален. Через несколько лет представление о равномерно распределенном внутри атома положительном заряде было опровергнуто.

2. В 1906 году Эрнест Резерфорд предложил бомбардировать тяжелые элементы с помощью α -частиц. На то время уже было известно, что такие частицы испускаются в процессе радиоактивного распада радия. Масса этих частиц в тысячи раз превышает массу электрона. Также α -частицы обладают положительным зарядом, который по модулю вдвое больше заряда электрона. Наконец, альфа-частицы движутся с очень большими скоростями (примерно 20 000 км/с). Очевидно, что электроны не могут существенно изменить траекторию движения таких частиц. Поэтому **рассеяние** (то есть заметное изменение направления движения) **альфа-частиц может вызвать только положительная часть атома**. Резерфорд в целях экспериментальной проверки модели атома по Томсону на основе вышеизложенного суждения предложил своим ученикам Гейгеру и Марсдену провести опыты по бомбардировке α -частицами тонкой металлической фольги.

Установка, примененная на опыте, состояла из свинцового цилиндра с узким отверстием, в который помещался радий (рис. 8.13.1). Далее располагалась фольга из золота, а за ней – экран. За экраном можно было наблюдать с помощью микроскопа. Вся эта установка располагалась в специальном сосуде, из которого был откачан воздух.

Итак, в процессе распада радий испускал α -частицы, которые при прохождении через фольгу рассеивались. При попадании каждой α -частицы на экран в микроскоп можно было наблюдать вспышку света (такая вспышка называется **сцинтилляцией**). Было обнаружено, что если убрать фольгу, то сцинтилляции, возникающие на экране, образуют светлый кружок. Но при наличии фольги площадь этого кружка увеличивалась. Это свидетельствовало о рассеянии α -частиц при прохождении через фольгу.

3. Э. Резерфорд модифицировал исходную установку с целью выяснить, могут ли α -частицы отклоняться на еще большие углы. Для этого он окружил фольгу сцинтилляционными экранами и повторил опыт.

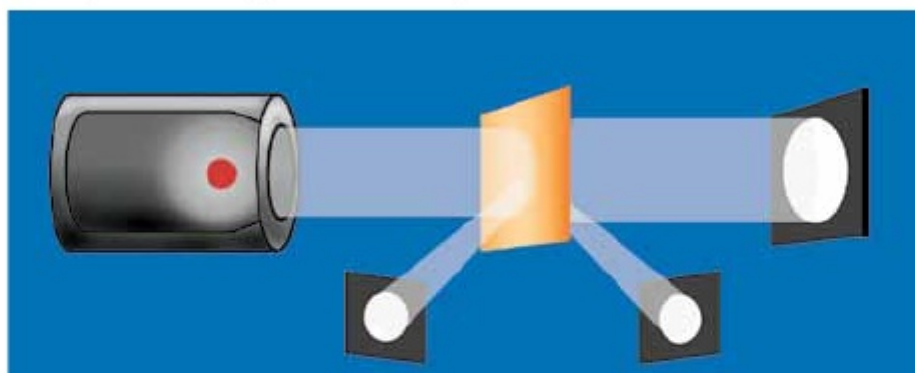


Рис. 8.13.1. Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц

К его великому удивлению, некоторые частицы отклонились на углы, превышающие 90° (рис. 8.13.1). То есть фактически **небольшое число частиц было отброшено назад**. Действительно, такой результат предвидеть было очень и очень

сложно, поскольку расчеты говорили о том, что электрическое поле положительного заряда, распределенного по всему атому, согласно модели Томсона, не может быть достаточно сильным, чтобы отбросить α -частицу назад. Напомним, что силу отталкивания можно определить, исходя из закона Кулона:

$$F_{\text{max}} = k \frac{q_{\alpha} q}{R^2}.$$

В данной формуле k – коэффициент пропорциональности, q_{α} – заряд α -частицы, q – положительный заряд атома и R – его радиус.

Напряженность заряженного шара по модели Томсона убывает по мере приближения к центру шара и максимальна на поверхности шара. Однако результаты эксперимента навели Резерфорда на мысли о том, что **положительный заряд сконцентрирован в очень малой области пространства атома, а не равномерно распределен по всему атому**. В связи с этим было введено понятие **атомного ядра**. Легко понять, что чем ближе к ядру атома пролетают α -частицы, тем больше их отклонение.

Атомное ядро – это микроскопическое тело очень малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.

Резерфорд подсчитал число частиц, рассеянных на различные углы, и, исходя из полученных данных, оценил размер ядра. Выяснилось, что диаметр ядра составляет порядка 10^{-14} – 10^{-15} м, в то время как диаметр атома составляет порядка 10^{-10} м. Из этого можно заключить, что **размеры атомного ядра в сотни тысяч раз меньше размеров самого атома**. Позднее был вычислен и заряд ядра, который можно узнать из таблицы Менделеева. Приняв модуль заряда электрона за единицу, можно определить заряд ядра любого химического элемента по формуле $q_{\text{я}} = Z \cdot e$, где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – абсолютное значение заряда электрона.

Эрнест Резерфорд, основываясь на результатах экспериментальных исследований, в 1911 году создал **планетарную модель атома**. Согласно этой модели, **в центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны**.

Поскольку атом электрически нейтрален, число электронов в атоме также равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, т.е. числу положительно заряженных протонов в ядре.



Рис. 8.13.2. Атом водорода

Разумеется, электроны не могут покоиться внутри атома. Они непрерывно движутся вокруг ядра подобно тому, как планеты вращаются вокруг Солнца (именно поэтому модель Резерфорда получила название планетарной модели атома).

Наиболее простым атомом является атом водорода: вокруг его ядра вращается всего один электрон (рис. 8.13.2).

Из этого можно заключить, что **ядро атома водорода имеет положительный заряд, численно равный заряду электрона**. Резерфорд предположил, что ядра всех атомов содержат ядро атома водорода.

Это предположение было обусловлено тем, что масса ядра любого химического элемента кратна массе ядра водорода. Поэтому ядро водорода стало рассматриваться как *элементарная частица*. Такую частицу назвали *протоном*.

Вопросы

1. Какова модель атома по Томсону?
2. Какие результаты дали опыты Резерфорда? Объясните, начертив схему опыта Резерфорда.
3. Как оценивались размеры атома и атомного ядра? Почему предложенную Резерфордом модель атома назвали планетарной моделью?

§ 8.14

Линейчатый спектр атома водорода. Постулаты Бора. Опыты Франка – Герца

1. Спектры излучения атомов, отражающих их важнейшие характеристики, являются линейчатыми, поскольку состоят из отдельных спектральных линий или групп близко расположенных линий. Каждому элементу присущ свой, характерный только для него спектр.

Наиболее изученным является спектр излучения атома водорода (рис. 8.14.1). Опытным путем установлено, что спектр атома водорода состоит из серий линий, частоты которых описываются формулами, представленными в таблице 8.14.1, в которых $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ называется *постоянной Ридберга*.

Таблица 8.14.1

Область спектра	Формула	Название серии
Ультрафиолетовая	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), (n = 2, 3, 4, \dots)$	Серия Лаймана
Видимая	$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), (n = 3, 4, 5, \dots)$	Серия Бальмера
Инфракрасная	$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), (n = 4, 5, 6, \dots)$	Серия Пашена
	$\nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), (n = 5, 6, 7, \dots)$	Серия Брэкета
	$\nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), (n = 6, 7, 8, \dots)$	Серия Пфунда
	$\nu = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right), (n = 7, 8, 9, \dots)$	Серия Хэмфри

Все приведенные выше экспериментальные серии в спектре атома водорода могут быть описаны *обобщенной формулой Бальмера*:

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (8.22)$$

где m в каждой данной серии имеет постоянное значение ($m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) и *определяет серию*; n принимает целочисленные значения ($n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots$) и *определяет отдельные линии данной серии*. С увеличением n линии серии сближаются, как показано на *рис. 8.14.1*; значение $n = \infty$ определяет границу серии, к которой со стороны больших частот *прижимает сплошной спектр*.



Рис. 8.14.1. Спектр атома водорода

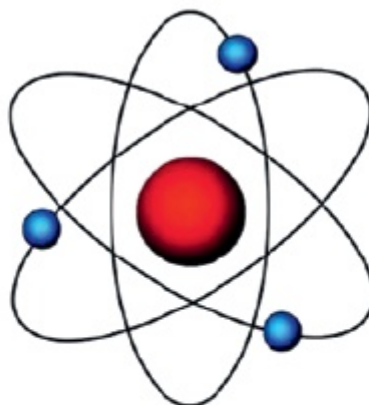


Рис. 8.14.2. Электроны вращаются вокруг ядра атома

2. Классическая теория на основе планетарной модели была *не в состоянии объяснить устойчивость атома*. Электроны двигаются по определенным орбитам с достаточно большими скоростями (*рис. 8.14.2*). Известно, что любое криволинейное

движение является ускоренным, следовательно, электроны должны непрерывно испускать электромагнитные волны, причем с частотой, равной частоте обращения вокруг ядра. Излучая электромагнитные волны, электроны должны терять энергию, следовательно, они начали бы приближаться к ядру из-за снижения скорости. Если выполнить соответствующие расчеты, основываясь на классической механике Ньютона, то можно убедиться, что за время порядка 0,01 мкс электрон должен упасть в ядро. Это приведет к тому, что атом попросту прекратит свое существование. Тем не менее, известно, что ничего подобного не происходит. Большинство атомов устойчиво и может существовать сколь угодно долго. При этом, конечно, не наблюдается излучение каких-либо электромагнитных волн.

Все это свидетельствует о том, что *к атомным явлениям классическая механика неприменима*. Только теория *квантовой физики*, которая стала развиваться с первой четверти XX века, могла объяснить и устойчивость атома, и механизм испускания им излучений с разными длинами волн.

3. Первую попытку в этом направлении в 1913 году предпринял Нильс Бор. Теория Бора принимает планетарную модель атома Резерфорда и дискретность излучаемой (или поглощаемой) энергии, установленной Планком. Он *сформулировал основные положения новой теории атома в виде трех постулатов*, которые сыграли существенную роль в становлении квантовой физики микромира.

Первый постулат Бора (называемый постулатом стационарных состояний) гласит: *существуют особые, стационарные состояния атома, находясь в которых, атом не излучает энергию, при этом электроны в атоме движутся с ускорением*.

По второму постулату такими стационарными орбитами будут те, для которых момент импульса электрона mvr равен целому кратному $h/2\pi$:

$$m v_n r_n = n h / 2\pi,$$

где h – постоянная Планка, n – целое число, названное **квантовым числом** ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$).

Третий постулат Бора (называемый правилом частот) гласит: *излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией*.

Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний. Здесь необходимо отметить, что данный постулат распространяется не только на видимый свет. То есть атом может излучать энергию и в инфракрасной области спектра, и в ультрафиолетовой.

Третий постулат Бора описывается следующей формулой, которая подтверждает дискретность (порциальность) излучаемой энергии, установленной Планком:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n, \quad (8.24)$$



Нильс Хенрик Давид Бор (1885–1962) – датский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике (1922). Бор известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики. Он также внес значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой.

где E_k и E_n – энергии атома в стационарных состояниях k и n ; ν_{kn} – частота излучения, соответствующая переходу атома из стационарного состояния k в стационарное состояние n ; h – постоянная Планка.

Из формулы (8.24) получим выражение, с помощью которого можно вычислить частоту излучения атома:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (8.25)$$

Таким образом, первый постулат Бора гласит, что атом может находиться в особых стационарных состояниях сколь угодно долго, не излучая при этом электромагнитные волны. То есть *существуют определенные электронные орбиты, каждая из которых соответствует определенному энергетическому уровню*. Излучение $h\nu_{kn} = E_k - E_n$ происходит только тогда, когда электрон переходит с одного энергетического уровня (из одной орбиты) на другой энергетический уровень (на другую орбиту), как это видно на *рис. 8.14.1*. При поглощении кванта энергии происходит обратный процесс: атом переходит с низшего энергетического уровня на более высокий уровень. Следует обратить внимание, что в атомной физике энергия измеряется в эВ (электрон-вольтах).

4. В 1913 году Дж. Франком и Г. Герцем был поставлен опыт, явившийся экспериментальным доказательством постулатов Бора, и гипотезы Планка о дискретном излучении или поглощении атомами энергии. На *рис. 8.14.3* приведена схема опыта. К катоду K и сетке C_1 электровакуумной трубки, наполненной парами Hg (ртути), прикладывается разность потенциалов U , ускоряющая электроны, и снимается вольт-амперная характеристика. К сетке C_2 и аноду A прикладывается замедляющая разность потенциалов.

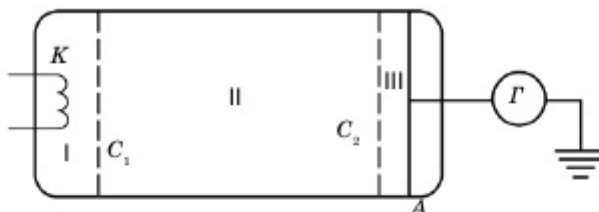


Рис. 8.14.3. Схема опыта Франка и Герца

Ускоренные в области I электроны испытывают соударения с атомами ртути Hg в области II. Если энергия электронов после соударения достаточна для преодоления замедляющего потенциала в области III, то они попадут на анод. Следовательно, показания гальванометра Γ зависят от потери электронами энергии при ударе.

В опыте наблюдался монотонный рост тока I при увеличении ускоряющего напряжения вплоть до 4,86 В, т. е. электроны с энергией $E < 4,86$ эВ испытывали упругие соударения с атомами Hg (*без поглощения*) и внутренняя энергия атомов не менялась (*рис. 8.14.4*). При значении $U = 4,86$ В (и кратных ему значениях 9,72 В, 14,58 В) появлялись резкие спады тока. Это определенным образом указывало на то, что при этих значениях U соударения электронов с атомами носят неупругий характер, т. е. часть энергии достаточно ускоренных электронов была затрачена (поглощена)

для возбуждения атомов Hg. При кратных 4,86 эВ значениях энергии электроны могут испытывать неупругие столкновения несколько раз.

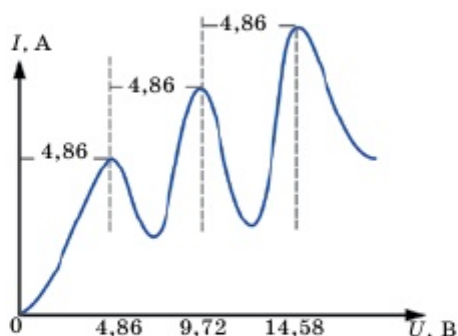


Рис. 8.14.4

Из опыта следует, что при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,86 В анодный ток возрастает монотонно, его значение проходит через максимум (4,86 В), затем резко уменьшается и возрастает вновь.

Таким образом, опыт Франка – Герца показал, что спектр поглощаемой атомом энергии не непрерывен, а дискретен, минимальная порция (квант электромагнитного поля), которую может поглотить атом Hg, равна 4,86 эВ. Экспериментально найденное значение длины волны $\lambda = 253,7$ нм свечения паров Hg, возникавшее при $U > 4,86$ В, оказалось в соответствии со вторым постулатом Бора

$$E_1 - E_0 = \frac{h}{\lambda},$$

где E_0 и E_1 – энергии основного и возбужденного уровней энергии.

В опыте Франка – Герца разность соседних энергетических уровней атомов ртути, как видно из рис. 8.14.4, оказалась равной: $E_1 - E_0 = 4,86$ эВ.



Вопросы

1. Какими сериями характеризуются спектральные линии атома водорода? Как пишется обобщенная формула спектральных линий водорода?
2. Каков физический смысл чисел n и m в обобщенной формуле Бальмера?
3. Почему из различных серий спектральных линий атома водорода первой была изучена серия Бальмера?
4. В чем заключается недостаток классической теории в объяснении излучения на основе планетарной модели атома?
5. В чем заключается смысл постулатов Бора? Как формулируются эти постулаты?
6. Пусть E_n и E_m – соответственно энергии атома в стационарных состояниях до и после излучения (поглощения). Каково соотношение между E_n и E_m ($>$, $=$, $<$), если происходит излучение фотона; поглощение фотона?
7. Каковы противоречия между постулатами Бора и законами классической физики?
8. Может ли атом при переходе из одного состояния в другое испускать или поглощать произвольную порцию энергии? Какой ответ дает на этот вопрос опыт Франка – Герца?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Определив энергию ионизации атома водорода, найдите (в электрон-вольтах) энергию фотона, соответствующего головной линии серии Лаймана.

Д а н о: $m = 1$ $E = ?$	Р е ш е н и е: Энергия ионизации атома водорода (энергия, необходимая для удаления электрона из атома, находящегося в основном состоянии):
--------------------------------	---

$$E_1 = h\nu_{\max}, \quad (1)$$

где ν_{\max} можно определить из обобщенной формулы Бальмера:

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

приняв $m = 1$ и $n = \infty$;

$$\nu_{\max} = R, \quad (3)$$

где $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Учитывая (3), формулу (1) можно записать в виде

$$E_1 = hR. \quad (4)$$

Головная линия (соответствует наименьшей частоте (наибольшей длине волны) из всех линий данной серии) *серии Лаймана* (рис. 8.14.1) соответствует переходу электрона со второго энергетического уровня на первый (основной), т.е. искомая энергия $E = E_{2 \rightarrow 1}$.

$$E_{2 \rightarrow 1} = h\nu_{2 \rightarrow 1} = hR \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} hR. \quad (5)$$

Учти, что в формуле Бальмера (2) $m = 1$ и $n = 2$.

Подставив в выражение (5) формулу (4), получаем искомую энергию фотона, соответствующего головной серии Лаймана:

$$E = E_{2 \rightarrow 1} = \frac{3}{4} E_1.$$

Произведем вычисления:

$$E_1 = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,26 \cdot 10^{15} = 21,8 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}.$$

Учитывая, что $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, получим $E_1 = 13,6 \text{ эВ}$.

Тогда $E = \frac{3}{4} E_1 = 10,2 \text{ (эВ)}$.

О т в е т: $E = 10,2 \text{ (эВ)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$; скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; постоянная Ридберга $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$; электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Уровень А

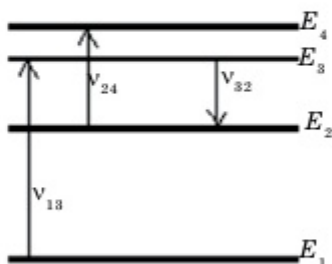
- 8.14.1. Определите в электрон-вольтах энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода со второго энергетического уровня на первый. (*Ответ: 10,225 эВ.*)
- 8.14.2. Определите длины волн, соответствующие границе серии Бальмера и границе серии Пашена. (*Ответ: 364 нм; 820 нм.*)
- 8.14.3. Определите в электрон-вольтах максимальную и минимальную энергию фотона в видимой серии спектра водорода (серии Бальмера). (*Ответ: 3,41 эВ; 1,89 эВ.*)

Уровень В

- 8.14.4. Определив энергию ионизации атома водорода, найдите (в электрон-вольтах) энергию фотона, соответствующую головной линии серии Бальмера. (*Ответ: 1,89 эВ.*)
- 8.14.5. Наибольшая длина волны излучения в видимой части спектра водорода равна 0,66 мкм. Найдите длины волн ближайших трех линий в видимой части спектра водорода. (*Ответ: 656 нм; 486 нм; 434 нм.*)
- 8.14.6. Во сколько раз увеличится угловая скорость вращения электрона в атоме водорода, если при переходе атома из одного стационарного состояния в другое радиус орбиты электрона уменьшается в 4 раза? (*Ответ: в 8 раз.*)

Уровень С

- 8.14.7. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны $1,2 \cdot 10^{-6}$ см. Определите радиус орбиты электрона в возбужденном состоянии. (*Ответ: $1,91 \cdot 10^{-10}$ м.*)
- 8.14.8. При переходе атома водорода из второго и третьего возбужденного состояния в первое (основное) излучаются фотоны, соответствующие длинам волн: $\lambda_{21} = 0,12$ мкм, $\lambda_{31} = 0,102$ мкм. Определите длину волны излучения атома водорода при переходе его из третьего возбужденного состояния во второе. (*Ответ: 0,68 мкм.*)
- 8.14.9. На *рис. 8.14.5* представлено несколько энергетических уровней электронных оболочек атомов и указаны частоты света, излучаемого и поглощаемого при переходах между этими уровнями. Какова частота ν_{13} , если $\nu_{24} = 4 \cdot 10^{14}$ Гц, $\nu_{32} = 3 \cdot 10^{14}$ Гц, а при переходе с уровня E_4 на уровень E_1 излучается свет с длиной волны 360 нм? (*Ответ: $7,3 \cdot 10^{14}$ Гц.*)

**Рис. 8.14.5**

Лабораторная работа № 6.

Наблюдение сплошного и линейчатого спектров излучения

Цель работы: наблюдать сплошной спектр излучения электрической лампы и линейчатые спектры излучения ионизированных газов.

Необходимое оборудование: спектроскоп прямого зрения или спектроскоп двухтрубный; набор спектральных трубок; выпрямитель или аккумуляторная батарея напряжением 6 В; прибор для зажигания спектральных трубок, лампа накаливания на подставке; люминесцентная лампа; ключ; реостат; соединительные провода; штатив; набор цветных карандашей; таблицы со спектрами излучения газов, находящихся в спектральных трубках.

Краткая теория. Спектр – это совокупность цветовых полос, получающихся при прохождении светового луча через преломляющую среду.

Различают *спектр испускания* (это спектр, получаемый при разложении света, излученного самосветящимися телами) и *спектр поглощения*, который получают, пропуская свет от источника со сплошным спектром через вещество, атомы и молекулы которого находятся в невозбужденном состоянии.

Спектры испускания разделяют на три сильно отличающихся друг от друга типа, которые определяются состоянием светящегося объекта. Это *сплошные*, или *непрерывные спектры*, которые излучаются раскаленными твердыми и жидкими веществами, а также газами под большим давлением. *Линейчатые спектры*, которые получают от светящихся атомарных газов. И *полосатые спектры*, которые излучаются молекулярным газом.

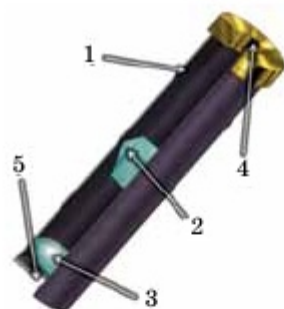


Рис. 8.14.6



Рис. 8.14.7

Рассмотрим устройство спектроскопа прямого зрения (рис. 8.14.6) и спектроскопа двухтрубного (рис. 8.14.7).

а) Спектроскоп прямого зрения состоит из металлической трубки, в которой помещена призма, собирающей линзы, закрепленной в подвижном держателе с винтом, коллиматорной щели и крышки с окулярным отверстием. При наблюдении спектров спектроскоп направляют коллиматорной щелью на источник света и смотрят в окулярное отверстие. Резкость изображения спектра регулируют передвижением линзы за головку винта вдоль небольшой прорези в трубке:

- 1) металлическая трубка;
- 2) призма;
- 3) собирающая линза;
- 4) коллиматорная щель;
- 5) крышка с окулярным отверстием.

б) Спектроскоп двухтрубный состоит из окуляра, зрительной трубы, объективов, коллиматора, щели и микрометрического винта. При наблюдении спектров щель направляют на источник света и с помощью

объективов и окуляра добиваются появления четкого изображения. Вращением винта меняют видимую часть спектра:

- 1) окуляр;
- 2) зрительная труба;
- 3) объектив;
- 4) призма;
- 5) коллиматор;
- 6) щель;
- 7) микрометрический винт.

Порядок работы:

1. Укрепите спектроскоп в штативе таким образом, чтобы щель его коллиматора была расположена вертикально. Перед щелью на расстоянии нескольких сантиметров установите электрическую лампочку на подставке так, чтобы ее нить накаливания была на высоте щели, и подключите лампу через реостат к источнику тока.
2. Включите лампу и при полном накале наблюдайте сплошной спектр излучения нити.
3. Постепенно уменьшая накал нити, наблюдайте ослабление яркости спектра и постепенное исчезновение спектральных цветов, начиная с фиолетового.
4. Зарисуйте цветными карандашами картину спектра, наблюдаемого вами.
5. Направьте коллиматор спектроскопа на светящуюся люминесцентную лампу, установленную на столе учителя или висящую на потолке. Рассмотрите ее спектр и зарисуйте его в тетради. Опишите, чем спектр люминесцентной лампы отличается от спектра лампы накаливания.
6. Переходим к рассмотрению спектров различных газов. Для этого необходимо вставить трубку с исследуемым газом, например с гелием, в держатель прибора для зажигания спектральных трубок и подключить прибор к источнику напряжения.
7. Затем зажгите спектральную трубку и рассмотрите в спектроскоп линейчатый спектр излучения гелия. После чего зарисуйте его цветными карандашами и опишите основные цвета в наблюдаемой последовательности.
8. Повторите наблюдение со спектральной трубкой, наполненной другим газом (например, водородом, неоном, аргоном или криптоном), и зарисуйте его спектр излучения.
9. После проделанной работы сравните полученные линейчатые спектры излучения с табличными спектрами соответствующих газов и сделайте вывод.
10. Для осмысления проведенного опыта ответьте на указанные ниже вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 6

1. Опишите принцип работы спектроскопа прямого зрения.
2. Опишите устройство двухтрубного спектроскопа.
3. Какие вещества дают сплошной спектр?
4. Какие вещества дают линейчатый спектр?

5. Объясните, почему отличаются линейчатые спектры различных газов.
6. Почему отверстие коллиматора имеет вид узкой щели? Изменится ли вид наблюдаемого спектра (если да, то как?), если отверстие сделать, например, в форме треугольника?

§ 8.15

Понятие о нелинейной оптике. Лазеры

1. Нелинейная оптика – раздел физики, который изучает явления взаимодействия света и вещества, которые протекают по-разному в зависимости от интенсивности света.

Низший энергетический уровень – это основное состояние атома, а все остальные состояния называются возбужденными.

В возбужденном состоянии атом переходит из *основного состояния* в состояние с большей энергией (на один из вышележащих *уровней энергии*). Атом в состоянии возбуждения может находиться очень недолго ($\sim 10^{-8}$ с). После этого он переходит в основное состояние, и этот переход сопровождается **испусканием фотона**. Для перехода атома в возбужденное состояние ему сообщают извне энергию. Такой процесс осуществляется, в частности, путем взаимодействия атома с фотонами внешнего излучения. При этом атом, *поглотив фотон* внешнего излучения, переходит в возбужденное состояние. Так называемые спонтанные излучения, самостоятельно испускаемые отдельными атомами без воздействия внешнего источника, обладают ничтожно малой энергией. Для концентрации энергии излучения многих атомов требуется так называемое **вынужденное индуцированное излучение**.

Еще в 1917 году Альберт Эйнштейн предсказал возможность такого излучения и доказал, что при попадании фотона достаточно высокой энергии в атом, этот атом излучает два абсолютно идентичных фотона. Такое излучение назвали индуцированным.

Индукцированное излучение – это излучение возбужденных под действием падающего на них света атомов.

Возникающая при этом излучении испущенная световая волна обладает той же **частотой, фазой и поляризацией**, что и падающая на атом волна. Это говорит нам о том, что **падающая и излученная волны когерентны**.

2. Если в атом попадает фотон такой энергии, какая может быть излучена самим атомом при переходе из возбужденного состояния в основное, то этот фотон атомом не поглощается. Более того, атомом испускается еще один фотон, который абсолютно идентичен первому. То есть эти два фотона являются полностью когерентными. Такие фотоны поглощаются другими атомами и возбуждаются. Именно эта идея и положена в основу создания **лазера.**

Представим, что имеется активная среда с большим количеством атомов. Эта среда располагается между глухим и полупрозрачным зеркалами. Глухое зеркало

практически не пропускает свет, а полупрозрачное зеркало пропускает около 2% света. Именно такие зеркала нашли применение в устройствах лазеров (рис. 8.15.1).

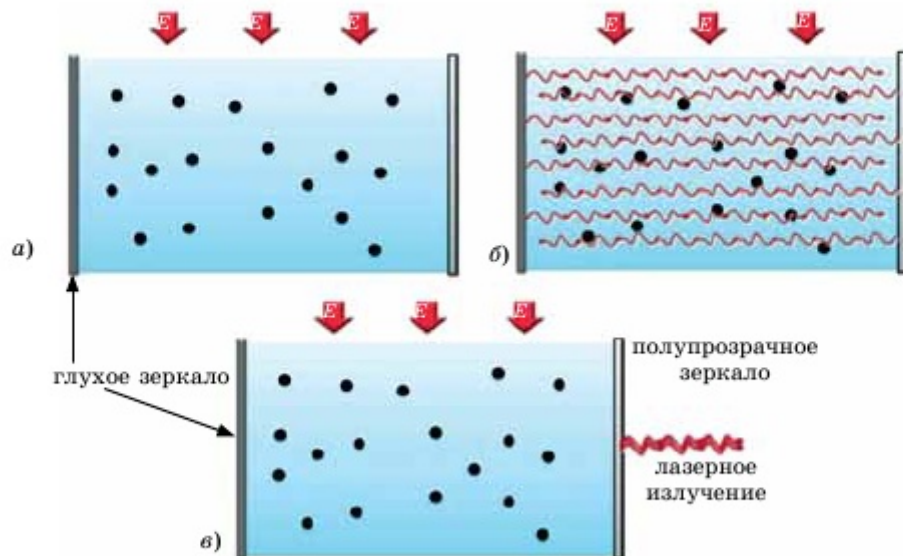


Рис. 8.15.1. Принцип работы лазера

В активную среду поступает энергия извне. Это может быть любая энергия: тепловая, световая, химическая или электрическая (рис. 8.15.1, а). Данная энергия приводит значительную часть атомов в возбужденное состояние. При переходе обратно в основное состояние атомы излучают фотоны, которые в свою очередь возбуждают соседние атомы. И в этом случае уже возникает явление индуцированного излучения: **каждый атом, на который упал фотон, испускает два идентичных фотона**. Так продолжается снова и снова, в результате чего все больше и больше атомов переходят в возбужденное состояние. Между зеркалами возникает среда, насыщенная и возбужденными атомами, и когерентными фотонами, которые отражаются то от одного, то от другого зеркала. При этом каждый фотон, сталкиваясь с невозбужденным атомом, стимулирует его испускать еще такой же фотон (рис. 8.15.1, б).

Когда же перенасыщенные в активной среде возбужденные атомы переходят в основное состояние, то из нее выходит множество когерентных фотонов, образуя **лазерный луч**. При этом фотоны находятся на очень близком расстоянии друг к другу, и направления их движения совпадают, поэтому лазерный луч практически не рассеивается (рис. 8.15.1, в).

Лазеры обладают следующими свойствами:

- 1) лазеры создают пучки света с очень маленьким углом расхождения (то есть луч практически не рассеивается);
- 2) фаза волны лазерного излучения не испытывает нерегулярных изменений (то есть атомы излучают свет согласованно);
- 3) лазеры обладают огромной мощностью.

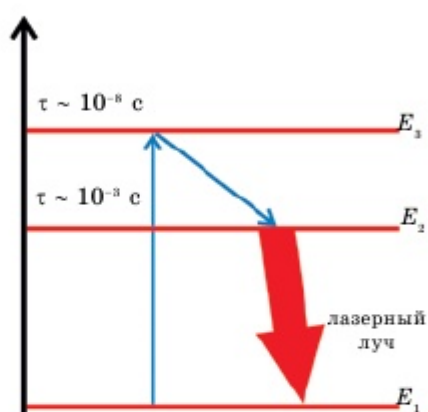


Рис. 8.15.2. Трехуровневая система

У лазеров высокая мощность достигается лишь в течение очень и очень малого промежутка времени ($\sim 10^{-13}$ с).

3. Исследование показало, что для получения мощного лазерного излучения *двух уровней* энергии было недостаточно (например, уровни с энергиями E_1 и E_2 на рис. 8.15.2), поскольку каким бы мощным ни был внешний источник энергии, число возбужденных атомов не превышало число невозбужденных. Но уже в 1960 году была создана так называемая **трехуровневая система**. Эта система и по сей день является **основой для создания лазеров**. Дело в том, что время, в течение которого атом может находиться на том или ином энергетическом уровне, неодинаково.

В двухуровневом лазере отсутствует энергетический уровень, обеспечивающий более длительное нахождение атома в возбужденном состоянии. Для создания более мощного лазера требуется создать третий энергетический уровень, где возбужденный атом мог бы находиться более длительное время, чем в двухуровневой системе. На сегодняшний день трехуровневая система с успехом используется в **рубиновых лазерах** (потому что в рубине имеются необходимые энергетические уровни). В рубине содержится *небольшая примесь атомов хрома*, которые и *подвергаются процессу индуцированного излучения*.

На рис. 8.15.2 изображены три состояния атома: основное состояние с энергией E_1 и два возбужденных состояния с энергиями E_2 и E_3 . Но на третьем энергетическом уровне атом может находиться порядка 10^{-8} с, в то время как на втором энергетическом уровне он может находиться порядка 10^{-3} с. Это, конечно, является существенной разницей, поэтому **на втором уровне оказывается избыток возбужденных насыщенных атомов**.

Итак, атомы переходят в возбужденное состояние, соответствующее энергии E_3 , но почти сразу из этого состояния они переходят на уровень E_2 , где находятся значительно дольше. Таким образом, почти все атомы хрома находятся в возбужденном состоянии. После того как они все переходят в обычное состояние, получается мощный лазерный луч (рис. 8.15.2).

4. Лазеры получили довольно широкое применение в науке и технике. В первую очередь **лазеры используются в экспериментах по оптике**. Лазеры используются для **хранения информации** (наверное, все слышали такое словосочетание, как «лазерный диск»). Огромная мощность лазерного излучения часто используется для **сварки и резки металлов или стимуляции испарения различных материалов**. Кроме этого, лазеры используются в **медицине**: ярким примером такого использования является **микрочirurgия глаза**. Лазеры находят широкое применение в голографии.

Голография – особый фотографический метод, при котором с помощью лазера регистрируются, а затем восстанавливаются изображения трехмерных объектов, в высшей степени похожие на реальные.

При освещении лазером голограмма формирует изображение, которое представляет собой точную копию исходного трехмерного объекта и обнаруживает все свойства таких объектов, например, изменение перспективы при перемещении наблюдателя. Метод голографии, применяемый в основном для регистрации информации, которую несет свет, отражающийся от некоего объекта или проходящий сквозь него, пригоден отнюдь не только для видимого света. Теоретически данный метод приложим ко всем другим волновым явлениям – звуковым волнам, сверхвысокочастотному, инфракрасному, рентгеновскому и электронному излучениям. Этим и объясняется тот интерес, который вызывает голография; однако из-за практических трудностей ее пока не удалось применить к электронам и в рентгеновской области спектра.

Перспективы применения голографических технологий огромны. В настоящее время разрабатываются 3D-шлемы, обеспечивающие создание проекций изучаемых объектов, процессов и явлений в режиме реального времени. Например:

- **в астрономии** (создание проекций галактик, процессов возникновения планетных систем, падение комет и астероидов на поверхность планет или звезд и т.д.);
- **в физике** (создание проекций микромира, демонстрация строения атома и атомного ядра, взрыва водородной бомбы и т.д.);
- **в химии** (создание демонстраций реакций окисления, процессов горения, демонстрация различий в органической и неорганической химии и т.д.);
- **в географии** (создание ландшафтных зон в труднодоступных местах на поверхности Земли, визуализация ландшафта на других планетах Солнечной системы и т.д.);
- **в медицине** (создание демонстраций внутреннего строения человека и животных и т.д.).

Данные технологии обеспечат более эффективную работу в соответствующих отраслях жизнедеятельности человека.



Вопросы

1. Какие состояния атома называются основным и возбужденным? Как создается возбужденное состояние атома?
2. Какие излучения называются спонтанными, вынужденными (индуцирование)?
3. Какая идея заложена в основу создания лазера? Как работает лазер с двумя энергетическими уровнями? Каков его недостаток?
4. Как работает лазер с тремя энергетическими уровнями? В чем заключается его преимущество?
5. Где применяются лазеры? Какова их перспектива?

**Задание (практическое исследование)**

1. Для двух энергетических состояний изобразите на рисунках переходы, соответствующие поглощению; вынужденному излучению; спонтанному излучению.
2. Покажите графически, зависит ли размер фокального пятна от расстояния между лазером и фокусирующей оптической системой и от угла расходимости лазерного излучения θ .

**Задание (теоретическое исследование)**

Луч достаточно мощного лазера поднимает и удерживает во взвешенном состоянии прозрачные стеклянные сферы радиусом около 20 мкм. Как свет может поднять такой шарик? Как достигается устойчивость при горизонтальных возмущениях?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Лазер мощностью 2 кВт в течение 2 с излучает 300 импульсов света. Длительность каждого импульса составляет 4 мкс. На излучение идет 0,3% потребляемой энергии. Найдите мощность P_2 и энергию E_2 одного импульса.

Д а н о:	СИ
$P_1 = 2 \text{ кВт}$	$2 \cdot 10^3 \text{ Вт}$
$t_1 = 2 \text{ с}$	
$N = 300$	
$t_2 = 4 \text{ мкс}$	$4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$
$\eta = 0,3\%$	
$P_2 = ?$	
$E_2 = ?$	

Р е ш е н и е:

КПД лазера равен отношению световой энергии E_1 , излучаемой им в течение времени t_1 , ко всей потребляемой лазером за это время энергии E_0 , выраженному

$$\text{в } \%: \quad \eta = \frac{E_1}{E_0} 100\%.$$

Отсюда энергия $E_1 = \frac{\eta E_0}{100\%}$, где $E_0 = P_1 t_1$, поэтому

$$E_1 = \frac{\eta P_1 t_1}{100\%}.$$

Разделив энергию E_1 на количество импульсов N , излученных за время t_1 , найдем энергию E_2 одного импульса: $E_2 = \frac{E_1}{N}$ или $E_2 = \frac{\eta P_1 t_1}{N \cdot 100\%}$.

Мощность P_2 одного импульса определим отношением его энергии E_2 ко времени излучения каждого импульса t_2 : $P_2 = \frac{E_2}{t_2}$.

Произведем вычисления:

$$E_2 = \frac{0,3 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 2}{300 \cdot 100} = 0,04 \text{ (Дж)};$$

$$P_2 = \frac{0,04}{4 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^4 = 10 \text{ (кВт)}.$$

О т в е т: $E_2 = 0,04 \text{ (Дж)}$; $P_2 = 10 \text{ (кВт)}$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с; скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Уровень А

- 8.15.1. Расходимость лазерного излучения составляет 1 мрад (миллирадиан). За один импульс продолжительностью 0,8 мкс лазер излучает 800 мДж световой энергии. Найдите плотность потока излучения на расстоянии 8 м от лазера. (Ответ: $2 \cdot 10^{10}$ Вт/м².)
- 8.15.2. Газовый лазер, работая в режиме непрерывного излучения, дает свет с длиной волны 500 нм. Найдите число фотонов, излучаемых им за 2 с, если мощность излучения составляет 50 мВт. (Ответ: $2,5 \cdot 10^{17}$.)

Уровень В

- 8.15.3. Лазер излучил в импульсе длительностью 0,13 мс пучок света с энергией 10 Дж. Найдите среднее давление такого светового импульса, если его сфокусировать в пятнышко диаметром 10 мкм на поверхность, перпендикулярную к пучку, с коэффициентом отражения, равным 0,5. (Ответ: 4,9 МПа.)
- 8.15.4. Терапевтический гелий-неоновый лазер, работающий в непрерывном режиме, дает излучение монохроматического света с длиной волны 630 нм, развивая мощность 40 мВт. Сколько фотонов излучает лазер за 1 с? (Ответ: $1,3 \cdot 10^{17}$.)

- 8.15.5. При удалении полипа хирургическим путем используется луч гелий-неонового лазера мощностью 10 мВт, сфокусированного на пятне диаметром 0,4 мм. Лазер дал вспышку продолжительностью 1 с. Определите энергию вспышки и плотность мощности (Вт/м²) на пятне. (Ответ: 0,01 Дж; 79,6 кВт/м².)

Уровень С

- 8.15.6. Лазер излучает в импульсе 10^{19} световых квантов. Средняя мощность импульса лазера составляет 1100 Вт при длительности вспышки $3 \cdot 10^{-8}$ с. Определите длину волны излучения лазера. Ответ выразите в микрометрах. (Ответ: 0,6 мкм.)
- 8.15.7. Лазер, работающий в импульсном режиме, потребляет мощность 1 кВт. Длительность одного импульса составляет 5 мкс, а число импульсов в 1 с равно 200. Найдите излучаемую энергию и мощность одного импульса, если на излучение идет 0,1% потребляемой мощности. (Ответ: 5 мДж; 1 кВт.)
- 8.15.8. Пучок лазерного излучения мощностью 100 Вт падает на пластинку под углом 60°. Пластинка пропускает 40% падающей энергии, а остальную зеркально отражает. Найдите абсолютную величину силы, действующей на пластинку со стороны света. (Ответ: $2 \cdot 10^{-7}$ Н.)

§ 8.16

Трудности теории Бора. Волновые свойства частиц.
Волны де Бройля

Луи де Бройль (1892–1987) – французский физик-теоретик, один из основоположников квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике за 1929 год.

1. Нильс Бор в 1913 году своими постулатами предложил полуклассическую теорию атома, в которой за основу были взяты закон (гипотеза) Планка о дискретности измеряемой или поглощаемой энергии, а также планетарная модель атома, выдвинутая Резерфордом. С помощью этой теории была превосходно объяснена полученная в эксперименте дискретность энергетических состояний водородоподобных атомов. Эвристическое значение теории Бора состоит в смелом предположении о существовании стационарных состояний и скачкообразных переходов между ними. Эти положения позднее были распространены и на другие микросистемы.

Однако в теории были обнаружены и *недостатки*. Она не смогла объяснить интенсивность спектральных линий. Справедлива только для водородоподобных атомов и не работает для атомов, следующих за ним в таблице Менделеева, т.е. оказалась непригодной в объяснении спектральных экспериментальных данных более сложных атомов. Теория Бора логически противоречива: не

является ни классической, ни квантовой. В системе двух уравнений, лежащих в ее основе, одно – уравнение движения электрона – классическое (например, импульс электрона $p = mvr$), другое – уравнение квантования орбит – квантовое (например, полная энергия электрона на « n – квантовой» орбите обратно пропорциональна квадрату данного квантового числа $E \sim 1/n^2$).

Теория Бора являлась недостаточно последовательной и общей. Поэтому она в дальнейшем была заменена *современной квантовой механикой*, основанной на более общих и непротиворечивых исходных положениях. Сейчас известно, что постулаты Бора являются следствиями более общих квантовых законов. Однако постулаты Бора, как и гипотеза Планка, стали сильнейшим толчком к дальнейшему развитию квантовой механики.

2. В развитие квантовой теории значительный вклад внес один из лауреатов Нобелевской премии Луи де Бройль. Он утверждал, *что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами*.

С каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики через его энергию E и импульс p , а с другой – волновые – через частоту ν и длину волны λ . Количественные характеристики между этими величинами выражаются такими же формулами, как для фотонов:

$$E = h\nu,$$

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Смелость гипотезы де Бройля в том, что эти соотношения постулировались не только для фотонов, но и для других микрочастиц.

Любой частице, обладающей импульсом, сопоставляется волновой процесс с длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля нашло свое отражение в опытах Дэвиссона и Джермера. В указанных опытах доказано, что пучок электронов, рассеянный на пространственной дифракционной решетке – кристалле никеля, дает дифракционную картину. Дифракционные максимумы соответствовали формуле Вульфа – Брэгга (которая определяет условие максимума дифракции рентгеновского излучения: $\Delta l = n\lambda = 2d \sin \theta$; где d – расстояние между атомными плоскостями кристалла, θ – угол рассеяния излучения от атомных плоскостей), а брэгговская длина волны ($\lambda = 2d \sin \theta/n$) оказалась равной дебройлевской ($\lambda = h/p$). Впоследствии было доказано, что волновые свойства присущи не только потоку электронов, но и каждому электрону в отдельности. Дифракционная картина обнаружена также для нейтронов и протонов.

На частицы вещества переносится связь между полной энергией E частицы и частотой ν волн де Бройля:

$$E = h\nu,$$

т.е. это универсальное соотношение, справедливое как для фотонов, так и для любых других микрочастиц. Его справедливость подтверждается как опытными данными, так и результатами теоретических исследований, полученными в квантовой механике, атомной и ядерной физике.

В настоящее время доказано, что корпускулярно (квантово)-волновое дуалистическое поведение проявляют не только элементарные частицы и нуклоны, но и более крупные объекты – молекулы. В 1999 году была зарегистрирована дифракция фуллеренов, а в 2019 году – молекул, состоящих почти из 2000 атомов каждая.



Дополнительный материал

Эксперименты вскоре показали, что можно либо измерить свойства света как частиц, либо его свойства как волны, но одновременно это сделать нельзя. На основании этого Бор сформулировал свой **принцип дополнительности**: свет ведет себя как поток частиц, когда измеряют его энергию (например, при фотоэлектрическом эффекте), и как волна в экспериментах на дифракцию. Принцип дополнительности, включающий в себя также **принцип неопределенности Гейзенберга**, лег в основу копенгагенской интерпретации квантовой механики.

**Вопросы**

1. В чем заключается преимущество и трудность атомной теории Бора?
2. В чем заключается смелость гипотезы де Бройля? Как она формулируется? Как определяется длина волны де Бройля?
3. В каких опытах была экспериментально доказана гипотеза де Бройля?

**Задание (практическое исследование)**

Исследуйте вопрос о возможности создания прибора, который смог бы идентифицировать как личность человека, так и его болезни по длине волны или по другим параметрам испускаемой им тепловой лучистой энергии.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. При какой температуре T длина волны де Бройля атомарного водорода будет равной $\lambda = 8 \cdot 10^4$ фм?

<p>Д а н о: $\lambda = 8 \cdot 10^4$ фм $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К <hr style="width: 100%;"/> $T = ?$</p>	<p>СИ $8 \cdot 10^{-11}$ м</p>	<p>Р е ш е н и е: Длину волны де Бройля атома водорода определим по формуле: $\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1)$</p>
---	--	---

Здесь m – масса атома водорода, v – скорость атома, которую он приобрел при температуре T . При этом его средняя кинетическая энергия равна:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \text{ откуда } v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \quad (2)$$

здесь k – постоянная Больцмана.

Подставим (2) в (1): $\lambda = \frac{h}{m\sqrt{\frac{3kT}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{3kTm}}$. Отсюда $3kTm = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2$
 и $T = \frac{1}{3km} \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2$.

Произведем вычисления: $T = \frac{1}{3 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{8 \cdot 10^{-11}}\right)^2 = 990$ (К).

О т в е т: $T = 990$ (К).

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень В**

- 8.16.1. Определите длину волны де Бройля для электрона на первой бортовой орбите в атоме водорода. (*Ответ: 0,33 нм.*)
- 8.16.2. Найдите длину волны де Бройля для электрона, движущегося со скоростью: 20 км/с; 0,8 км/с. (*Ответ: 36,4 нм; 910,7 нм.*)
- 8.16.3. Скорость так называемых тепловых нейтронов, средняя кинетическая энергия которых близка к средней энергии атомов газа при комнатной температуре, равна 2,5 км/с. Найдите длину волны де Бройля для таких нейтронов. (*Ответ: 145 пм.*)
- 8.16.4. Вычислите длину волны де Бройля для протона с кинетической энергией 100 эВ. (*Ответ: 2,86 пм.*)
- 8.16.5. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов 510 кВ. Определите длину волны де Бройля, учитывая релятивистские эффекты. (*Ответ: 1,4 пм.*)
- 8.16.6. Первоначально неподвижный атом водорода испустил фотон с длиной волны 121,5 нм. Какую скорость приобрел атом водорода? Учтем, что масса атома водорода равна 1,00784 а. е. м. (*Ответ: 3,26 м/с.*)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 8

- **Излучение** – это процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц.
- **Тепловое излучение** – электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии.
- **Люминесценция** – это нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения веществом энергии.
- **Интенсивность излучения** – полный поток энергии, проходящий за единицу времени через единичную площадку в направлении к ней и рассчитанный на единицу телесного угла.
- **Спектральная плотность излучения** – отношение интенсивности излучения, взятой в бесконечно малом спектральном интервале, содержащем данную длину волны λ (или частоту ν), к ширине этого интервала $d\lambda$ (или $d\nu$).
- **Спектр** – совокупность отдельных гармонических (т.е. монохроматических) излучений, на которые может быть разложена данная сложная электромагнитная волна.

- **Спектральный анализ** – метод определения химического состава вещества по его спектру.
- **Абсолютно черным** называется тело, способное поглощать всю падающую на него энергию.
- **Ультрафиолетовая катастрофа** – глубокое противоречие, возникающее между экспериментальными данными и теориями классической физики, показавшими несостоятельность в объяснении происходящих явлений в ультрафиолетовой области спектра.
- **Закон Стефана – Больцмана**: $R_e = \sigma T^4$.
- **Закон смещения Вина**: $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$.
- Квант энергии (формула Планка): $E = h\nu$.
- **Формула (уравнение) Эйнштейна по фотоэффекту**: $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$.
- **Основные уравнения, связывающие корпускулярные свойства фотонов и других элементарных частиц с их волновыми свойствами**: $\varepsilon = h\nu$;
 $\rho = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
- **Обобщенная формула Бальмера**: $\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$, где $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ и определяет серию спектра водорода; n принимает целочисленные значения ($n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots$).










Глава 9



ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

ГЛАВА 9. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять на основе закона радиоактивного распада причины длительного сохранения заражения местности ядерными отходами;
-  применять формулу радиоактивного распада при решении задач;
-  вычислять энергию связи атомного ядра и объяснять зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа;
-  использовать законы сохранения массового и зарядового чисел при написании ядерных реакций;
-  понимать природу ядерного синтеза и естественного радиоактивного распада;
-  объяснять характер движения заряженных частиц в магнитном поле;
-  объяснять природу, свойства и биологическое действие α -, β - и γ -излучений;
-  описывать устройство и принцип работы ядерных реакторов;
-  обсуждать перспективы развития ядерной энергетики.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
табиғи радиоактивтілік	естественная радиоактивность	natural radioactivity
жасанды радиоактивтілік	искусственная радиоактивность	artificial radioactivity
ыдырау	распад	decay
ядро	ядро	nucleus
аналық ядро	материнское ядро	mother nucleus
туынды ядро	дочернее ядро	daughter nucleus
жартылай ыдырау периоды	период полураспада	half-life, decay period

нейтрон	нейтрон	neutron
байланыс энергиясы	энергия связи	binding energy
меншікті байланыс энергиясы	удельная энергия связи	specific bond energy
нуклон	нуклон	nucleon
массалар ақауы	дефект масс	mass defect
ядролық реакция	ядерная реакция	nuclear reaction
тізбектік реакция	цепная реакция	chain reaction
термоядролық реакциялар	термоядерные реакции	thermonuclear reactions
сәулеленудің жұтылған дозасы	поглощенная доза излучения	absorbed radiation dose

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «естественная радиоактивность», «искусственная радиоактивность», «распад», «ядро», «материнское ядро», «дочернее ядро», «период полураспада», «нейтрон», «энергия связи», «удельная энергия связи», «нуклон», «дефект масс», «ядерная реакция», «цепная реакция», «термоядерные реакции», «поглощенная доза излучения».

§ 9.1

Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада

1. В 1896 г. французский физик А. Беккерель при изучении люминесценции солей урана случайно обнаружил *самопроизвольное* испускание ими излучения неизвестной природы. Он подумал, что это излучение возникает под действием солнечного света на соли урана. В один из пасмурных дней ему не удалось провести эксперимент, и он положил фотопластинку с медным крестом, посыпанным солями урана, в шкаф. Позже, проявив пластинку, он обнаружил, что фотопластинка проявилась с очертанием креста. Это означало, что соли урана самопроизвольно без облучения солнечным светом испускают какое-то излучение. Это открытие побудило Беккереля к дальнейшему исследованию природы этого излучения.



Антуан Анри Беккерель (1852–1908) – французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике и один из первооткрывателей радиоактивности. Основные его исследования посвящены различиям спектров поглощения в кристаллах. В 1903 году он получил совместно с Пьером и Марией Кюри Нобелевскую премию по физике: «В знак признания его выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиоактивности».

Вскоре он обнаружил, что данное излучение не только действует на фотопластинку, но и ионизирует воздух, вызывает люминесценцию ряда веществ. Открытие Беккереля 1896 года, произошедшее вскоре после открытия рентгеновских лучей в 1895 году, послужило началом изучения состава и строения атома.

2. Продолжая исследование этого явления, супруги Кюри (Мария и Пьер) обнаружили, что беккерелевское излучение свойственно не только урану, но и многим другим тяжелым элементам, таким как торий и актиний. Они показали также, что урановая смоляная обманка (руда, из которой добывается металлический уран) испускает излучение, интенсивность которого во много раз превышает интенсивность излучения урана. Это означало, что ураносодержащая руда состоит также из других неизвестных элементов. Таким образом, в 1898 году им удалось выделить два новых элемента – носителя беккерелевского излучения: **полоний** ${}^{210}_{84}\text{Po}$ и **радий** ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. Элемент полоний был назван в честь родины Марии Склодовской-Кюри – Польши. После открытия радия наблюдаемое явление было названо **радиоактивностью**, а само излучение – **радиоактивным**.

Радий имеет относительную атомную массу, равную 226, порядковый номер 88. Радий является щелочно-земельным металлом.

Радиоактивность подразделяется на естественную (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и искусственную (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций). Принципиального различия между этими двумя типами радиоактивности нет, так как законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

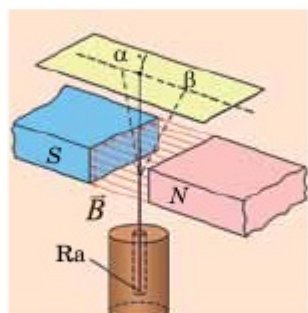


Рис. 9.1.1. Схема установки для изучения природы радиоактивных излучений

3. После открытия радиоактивного излучения началось интенсивное изучение его природы. Резерфорд уже в 1897 году нашел, что эти излучения состоят из различных компонентов, обладающих различной проникающей способностью. В 1899–1903 гг. были проведены классические опыты (рис 9.1.1) по выявлению природы каждого компонента радиоактивного излучения. На дно узкого канала в куске свинца помещался радий. Напротив канала располагалась фотопластинка. На пучок действовало магнитное поле. В отсутствие магнитного поля на фотопластинке было лишь темное

пятно. Действие же магнитного поля приводило к тому, что появлялось три пучка: один из них не отклонялся, а остальные два отклонялись в противоположные стороны.

Это говорило о противоположности их зарядов. При этом один из этих компонентов отклонялся магнитным полем сильнее, чем положительный, и получил название *β-излучение*, а другой, противоположный компонент, отклонившийся более слабо, назывался *α-излучением*; третьему нейтральному компоненту дано название *γ-излучение*. Последующие исследования позволили выяснить природу и основные свойства этих излучений.

Так, например, *α-излучение* отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм). В 1909 году Э. Резерфорд и Т. Ройдс убедительно показали, что *альфа-излучение представляет собой поток ядер гелия*; заряд *α-частицы* равен $+2e$, а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$. По отклонению *α-частиц* в электрическом и магнитном полях был определен их удельный заряд $\frac{q}{m_\alpha}$, значение которого подтвердило правильность представлений об их природе.

После выяснения природы *α-частицы* стало известно, что *β-излучение является потоком отрицательно заряженных частиц*. Бета-излучение отклоняется электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм), чем у *α-частиц*. *Бета-излучение представляет собой поток быстрых электронов* (это вытекает из определения их удельного заряда).

Поглощение потока электронов с одинаковыми скоростями в однородном веществе подчиняется экспоненциальному закону убывания согласно формуле $N = N_0 e^{-\mu x}$, где N_0 и N – число электронов на входе и выходе слоя вещества толщиной x ; μ – коэффициент поглощения. Бета-излучение сильно рассеивается в веществе, поэтому μ зависит не только от вещества, но и от размеров и формы тел, на которые *β-излучение* падает.

Гамма-излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью (например, проходит через слой свинца толщиной 5 см), при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию. *Гамма-излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение* с чрезвычайно малой длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м и вследствие этого – ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. является потоком частиц – *γ-квантов* (фотонов).

4. Возникает вопрос: что же происходит с веществом при радиоактивном излучении? Многочисленные опыты свидетельствуют о том, что интенсивность излучения радиоактивных веществ не меняется, причем на нее не влияют ни нагрев, ни изменение давления, ни химические реакции, в которые вступали вещества. Во-вторых, выяснилось, что при радиоактивном излучении выделяется

энергия. Например, 1 г радия за 1 час выделяет энергию, примерно равную 582 Дж. Все это навело ученых на мысль, что при радиоактивном излучении атомы претерпевают многочисленные цепочки превращений. Так, например, Резерфорд, исследуя активность тория, обнаружил, что наряду с α -частицами выделяется какой-то газ, активность которого уменьшается со временем. Этот газ оказался новым химическим элементом и был позже назван *радоном*.

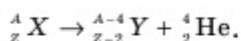
Таким образом, ученые пришли к выводу, что при радиоактивном излучении происходит видоизменение атомов, вещество превращается в другое, не сходное ни по химическим, ни по физическим свойствам. Позже выяснилось, что превращения испытывает само атомное ядро. Действительно, α -частиц нет в электронной оболочке атома, стало быть, они являются продуктом распада самого ядра. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется *материнским*, возникающее ядро нового химического элемента – *дочерним*.

Таким образом, *радиоактивностью называют способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц.*

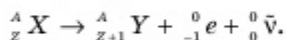
5. Для показания превращения ядер введем необходимые обозначения. Материнское ядро обозначим через X , дочернее – Y . Для того чтобы различить элементы, введем понятия зарядового числа Z и массового числа A . *Зарядовое число – это порядковый номер элемента в таблице Менделеева, т.е. количество протонов в ядре.* Меняется зарядовое число, меняется и ядро, то есть происходит превращение одного элемента в другой. *Массовое число – это сумма протонов и нейтронов в ядре.* Изменение только массового числа не ведет к изменению элемента, а дает его разномассовые изотопы. Любое материнское ядро обозначим знаком ${}^A_Z X$, или ${}_Z X^A$.

Испытываемые превращения ядра подчиняются *закону смещения Содди*. По этому закону определяется, в какое ядро будет видоизменено материнское ядро.

Например, *при α -распаде* ядро теряет положительный заряд $2e$, и его масса уменьшается на 4 атомные единицы. В результате материнское ядро, выпустив α -частицу, превращается в дочернее ядро, смещаясь примерно на 2 клетки к началу периодической системы:



При β -распаде ядро увеличивает свой заряд на единицу, но его масса практически остается неизменной. В результате β -распада после сложных взаимопревращений материнское ядро, выпустив электрон, превращается в дочернее ядро, смещаясь на 1 клетку к концу периодической системы:



При β -распаде вместе с электроном испускается еще одна частица *антинейтрино*, не имеющая ни массы, ни заряда, существование которой позволило объяснить многие закономерности при β -распаде, такие как *непрерывность энергетического спектра* выбрасываемых электронов.

Гамма-излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, оно испускается вместе с дочерним ядром при α - и β -распадах.

6. Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону. На *рис. 9.1.2* показана зависимость числа распадающихся ядер от времени. Как было сказано ранее, Резерфорд заметил, что активность радона убывает уже через минуту. И такая же закономерность наблюдается для многих радиоактивных элементов, только они будут отличаться по скорости убывания. **Время, в течение которого активность радиоактивного элемента уменьшается в два раза, называется периодом полураспада.**

Другими словами, **периодом полураспада называется время, в течение которого распадается половина первоначального числа атомов.**

Выведем математическую формулу периода полураспада (*рис. 9.1.2*). Пусть первоначальное число радиоактивных атомов равно N_0 . Спустя промежуток времени, равный полураспаду T , число нераспавшихся атомов станет равным $\frac{N_0}{2}$.

Еще через время $t = 2T$ количество нераспавшихся атомов будет равно $\frac{N_0}{2^2}$. Через

время $t = nT$ радиоактивных атомов останется $N = N_0 \cdot \frac{1}{2^n}$. Так как $n = \frac{t}{T}$, то:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (9.1)$$

Эта формула характеризует **основной закон радиоактивного распада**. По формуле (9.1) можно найти число нераспавшихся атомов в любой момент времени.

Применив математическое тождество $2 = e^{\ln 2}$, а также обозначив $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$, формулу (9.1) можно записать в виде

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (9.1')$$

Величина $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ называется **постоянной распада**. Период полураспада является основной характеристикой элемента. Чем меньше период полураспада, тем меньше живет ядро и тем быстрее распадается элемент. В *таблице 9.1.1* указаны периоды полураспада некоторых элементов.

Таблица 9.1.1

№	Элемент	Период полураспада
1	Полоний	138,4 сут
2	Радон	3,83 сут
3	Радий	1601 год

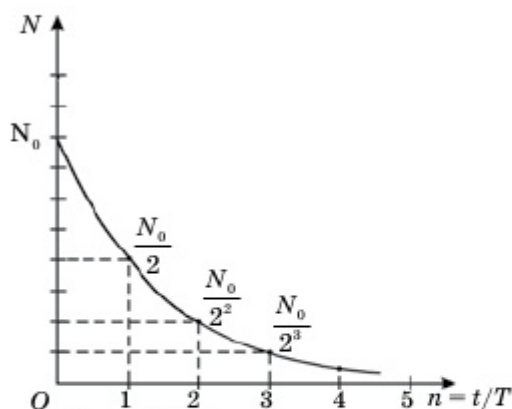


Рис. 9.1.2. Кривая зависимости радиоактивности от времени

Продолжение таблицы 9.1.1

4	Торий	$1,41 \cdot 10^{10}$ лет
5	Протактиний	$3,25 \cdot 10^4$ лет
6	Уран	$1,6 \cdot 10^5$ лет
7	Нептуний	$1,15 \cdot 10^5$ лет

7. Активностью радиоактивного источника называют число распадов в единицу времени.

Единицей активности является **1 Бк (беккерель)**.

Активность аналогично формуле (9.1) изменяется по следующему закону:

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (9.2)$$

Скорость распада у радиоактивных элементов не меняется. Для них не существует понятия возраста. Время существования отдельных ядер варьируется от миллионной доли секунды до миллиардов лет. Поэтому, если произошло радиоактивное заражение местности остатками радиоактивных веществ, с течением времени они распадаются. Однако время распада некоторых радиоактивных элементов составляет миллиарды лет. Таким образом, заражение местности ядерными отходами, в том числе от атомных электрических станций и других ядерных установок, может сохраняться на длительное время в зависимости от времени жизни отдельных радиоактивных ядер. Так, например, на Семипалатинском полигоне, расположенном на территории Республики Казахстан, с 1949 по 1989 год, было произведено не менее 468 ядерных испытаний, в которых было взорвано не менее 616 ядерных и термоядерных устройств, в том числе 125 атмосферных (26 наземных, 91 воздушное, 8 высотных); 343 испытательных ядерных взрыва под землей (из них 215 в штольнях и 128 в скважинах). В результате этих испытаний часть полигона была очень сильно заражена радиоактивными продуктами взрыва, радиационный фон сохранился на долгие годы, воздействуя на здоровье не одного поколения местных жителей. В Казахстане было организовано движение «Невада – Семипалатинск» по инициативе писателя Олжаса Сулейменова, призывавшего к приостановлению испытаний на полигоне. Последний взрыв на полигоне был осуществлен 19 октября 1989 года. 29 августа 1991 года Семипалатинский полигон был закрыт по указу Первого Президента страны Н. А. Назарбаева.



Дополнительный материал

24 декабря 2004 года Земля попала под самый сильный в истории выброс радиации. В тот день выброс от нейтронной звезды дошел до Земли, находящейся от нее на расстоянии 50 тысяч световых лет.

**Вопросы**

1. Какой процесс называется радиоактивностью? На какие виды делится радиоактивность?
2. Какие излучения называются радиоактивными излучениями? Как они были открыты? Каковы их свойства?
3. Как пишутся формулы альфа- и бета-распадов? Как происходит превращение химических элементов при радиоактивном распаде согласно закону Содди?
4. В чем заключается физический смысл периода полураспада? Какой формулой и кривой характеризуется закон радиоактивного распада? Как связаны между собой постоянная распада и период полураспада?
5. Что представляет собой активность радиоактивного источника? Какой формулой характеризуется активность? Какова единица ее измерения?
6. Почему радиоактивное заражение местности сохраняется на долгое время?

**Задание (практическое исследование)**

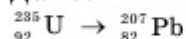
1. Постройте график зависимости активности радиоактивного распада от времени, используя в качестве модели набор из 128 канцелярских кнопок. Выпадение острия соответствует распаду, выпадение круглой шляпки – целому ядру. При каждом последующем опыте распавшиеся кнопки выпадают из списка. Каждый бросок считать за секунду.
2. Заполните таблицу.

Частица	Заряд	Зарядовое число	Массовое число
α -частица			
электрон			
нейтрон			

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Изотоп урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, испытав ряд радиоактивных превращений, превратился в свинец ${}_{82}^{207}\text{Pb}$. Сколько α - и β -распадов произошло при этом?

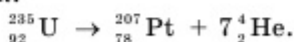
Дано:

 $N(\alpha) = ?$ $N(\beta) = ?$

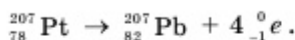
Решение:

При β -распаде массовое число элемента не меняется, а меняется только при α -распаде, так как при каждом таком распаде выделяется α -частица и, значит, массовое число уменьшается на 4. Согласно условию массовое число при превращении

урана в свинец уменьшилось на $235 - 207 = 28$. Значит, произошло $\frac{28}{4} = 7$ α -распадов. При этом зарядовое число уменьшилось на $7 \cdot 2 = 14$. Соответствующая реакция может протекать так:



Образовавшаяся платина ${}_{78}^{207}\text{Pt}$ должна превратиться в свинец ${}_{82}^{207}\text{Pb}$. Это возможно после 4β -распадов:



Таким образом, здесь имели место 7 α -распадов и 4 β -распада. Значит, всего 11 распадов.

О т в е т: 7 α -распадов и 4 β -распада.

Задача 2. Период полураспада радиоактивного изотопа полония ${}_{84}^{218}\text{Po}$ составляет 3,05 минуты. Определите время, за которое распадается $\frac{1}{3}$ начального количества ядер полония.

<p>Дано:</p> <p>$T = 3,05$ мин</p> <p>${}_{84}^{218}\text{Po}$</p> $\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{1}{3}$ <p>$t = ?$</p>	<p>СИ</p> <p>183 с</p>	<p>Решение:</p> <p>Согласно условию задачи, $\frac{1}{3}$ – доля распавшихся ядер за время t равна:</p> $\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0}, \quad (1)$ <p>где N_0 – начальное число нераспавшихся ядер (в момент времени $t = 0$); N – число нераспавшихся ядер в момент времени t. Согласно закону радиоактивного распада:</p> $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$
---	------------------------	--

где λ – постоянная радиоактивного распада. Подставив формулу (1) в выражение (2), получим:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T} \ln 2} \quad (\text{учли, что } T = \frac{\ln 2}{\lambda}).$$

По условию задачи $\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{1}{3}$, тогда

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} &= 1 - e^{-\frac{t}{T} \ln 2}; \quad e^{-\frac{t}{T} \ln 2} = \frac{2}{3}, \\ \frac{-t}{T} \ln 2 &= \ln \frac{2}{3}; \quad \frac{t}{T} \ln 2 = \ln \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

Искомое время

$$t = \frac{T \ln \frac{3}{2}}{\ln 2} = \frac{183 \cdot 0,405}{0,693} = 107 \text{ (с)}.$$

О т в е т: $t = 107$ (с).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

9.1.1. Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смещения, определите, в какой элемент превращается ${}_{92}^{238}\text{U}$ после шести α - и трех β -распадов.

- 9.1.2. Ядра радиоактивного изотопа тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ претерпевают последовательно α -распад, два β -распада и α -распад. Определите конечный продукт деления.
- 9.1.3. Определите, сколько β - и α -частиц выбрасывается при превращении ядра таллия ${}_{81}^{210}\text{Tl}$ в ядро свинца ${}_{82}^{206}\text{Pb}$.
- 9.1.4. Радиоактивный изотоп радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ претерпевает четыре α -распада и два β -распада. Определите для конечного ядра: 1) зарядовое число Z ; 2) массовое число A .
- Уровень В**
- 9.1.5. Определите начальную активность A_0 некоторого радиоактивного изотопа, если за время t , равное трети периода полураспада, активность этого изотопа A оказалась равной 50 Бк. (Ответ: 63 Бк.)
- 9.1.6. Определите период полураспада некоторого радиоактивного изотопа, если его активность за 5 суток уменьшилась в 2,2 раза. (Ответ: 4,4 сут.)
- 9.1.7. Определите период полураспада радиоактивного изотопа, если $n = \frac{5}{8}$ начального количества ядер этого изотопа распалось за 849 с. (Ответ: 600 с.)
- Уровень С**
- 9.1.8. Сколько атомов радона распадается за сутки из $N_0 = 1$ млн атомов? Период полураспада радона $T = 3,82$ сут. (Ответ: $\approx 166\ 000$ атомов.)
- 9.1.9. Активность радиоактивного препарата уменьшилась в четыре раза за 8 дней. Найдите период полураспада этого препарата. (Ответ: 4 сут.)
- 9.1.10. Определите, какая часть (в процентах) начального количества ядер радиоактивного изотопа останется нераспавшейся по истечении времени, равного трем средним продолжительностям жизни радиоактивного ядра. (Ответ: 12,5%.)

§ 9.2

Атомное ядро. Нуклонная модель ядра. Изотопы

1. Из главы 8 известно, что многие ученые неоднократно пытались построить модель атома. Однако эти модели не смогли объяснить наблюдаемые реальные свойства атома. По результатам своих опытов Э. Резерфорд предложил планетарную модель атома. Согласно его модели атом состоит из центрального положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны.

Атомное ядро состоит из элементарных частиц – **протонов** и **нейтронов**.

Термин «**протон**» был введен в начале 20-х гг. прошлого века Резерфордом, который предсказал существование в ядре кроме протона и нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона. Протон (p) имеет положительный заряд, равный заряду электрона, и массу покоя $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, где m_e – масса электрона.

Нейтрон был открыт в 1932 г. учеником Э. Резерфорда Д. Чедвигом при бомбардировке бериллия α -частицами. Возникающее при этом излучение обладало большой проникающей способностью, что объяснялось его электронейтральностью. Нейтрон (n) – нейтральная частица с массой покоя $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$. **Протоны и нейтроны называются нуклонами** (от лат. *nucleus* – ядро).

Нуклонная модель ядра была предложена советским физиком Д. Д. Иваненко, а впоследствии развита немецким физиком В. Гейзенбергом.

Атомное ядро – это центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, называемых нуклонами.

Размеры атомных ядер составляют примерно $10^{-14} - 10^{-15}$ м, т.е. на три-четыре порядка меньше, чем размеры самих атомов.

2. Общее число нуклонов в атомном ядре называется **массовым числом**, обозначается буквой A .

Атомное ядро характеризуется зарядом $q_x = Z \cdot e$, где Z – **зарядовое число** ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева; e – элементарный заряд как для электрона (с отрицательным знаком), так и для протона (с положительным знаком). Известные в настоящее время 118 элементов таблицы Менделеева имеют зарядовые числа ядер от $Z = 1$ до $Z = 118$.

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом: ${}_Z^A X$; где X – символ химического элемента, Z – атомный номер (число протонов в ядре); A – массовое число (число нуклонов в ядре).

Ядра с одинаковыми Z , но разными A (т.е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$) называются изотопами.

Например, водород ($Z = 1$) имеет три изотопа: ${}_1^1\text{H}$ – протий ($Z = 1, N = 0$); ${}_1^2\text{H}$ – дейтерий ($Z = 1, N = 1$); ${}_1^3\text{H}$ – тритий ($Z = 1, N = 2$); олово – десять и т.д. В подавляющем большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами, поэтому их практически невозможно различать с помощью известных физико-химических методов и отделять друг от друга. Изотопы одного и того же химического элемента разделяют по их массе с помощью прибора, называемого **масс-спектрометром**.

Кроме **изотопов**, ядра делятся на **изобары** и **изотоны**.

Ядра с одинаковыми A , но разными Z называются изобарами.

Ядра с одинаковым количеством нейтронов называются изотонами.



Вопросы

1. Из каких частиц состоит атомное ядро? Каковы их характеристики? Каково строение атома и какие элементарные частицы он содержит?
2. Как сложилась нуклонная модель ядра? Кто первоначально предсказал возможное сложное строение ядра? Что означают такие понятия, как массовое число и зарядовое число?
3. Какие ядра называются изотопами, изобарами и изотонами?

**Задание (практическое исследование)**

1. В таблице приведены примеры изотопов. Заполните таблицу, написав для них соответствующее число протонов и соответствующее число нейтронов.

Изотопы	Число протонов	Число нейтронов
${}^1_6\text{C}$		
${}^{15}_7\text{N}$		
${}^{16}_8\text{O}$		

2. Определите, пользуясь таблицей Менделеева, число протонов и нейтронов в ядре Be (бериллия); Tl (таллия); Au (золота); Po (полония).

**Задание (теоретическое исследование)**

Объясните, как можно определить размеры ядер в опытах по рассеянию нейтронов.

§ 9.3**Энергия связи нуклонов в ядре**

1. Атомное ядро является очень устойчивым. Долгое время ученые не могли объяснить, какая сила поддерживает такую устойчивость ядра. Эти силы нельзя отнести к электромагнитным, поскольку между протонами действуют силы отталкивания. Если бы это были гравитационные силы притяжения, то они слишком слабые по сравнению с силами отталкивания положительно заряженных протонов. Поэтому ученые пришли к выводу, что между нуклонами существуют силы особого рода, называемые *ядерными*. Их называют «гигантами с короткими руками». Выражение «с короткими руками» означает их короткодействие (10^{-16} м); любые частицы, находящиеся друг от друга на таком коротком расстоянии, будут удерживаться ядерными силами притяжения независимо от их заряда. Взаимодействия ядерных частиц называют *сильными взаимодействиями*.

2. Так как нуклоны в ядре удерживаются прочными связями, то для удаления их из ядра требуется совершить работу, то есть сообщить ядру значительную энергию.

Энергией связи ядра называют энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны.

Энергия связи ядра равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Для того чтобы рассчитать энергию связи, используем соотношение Эйнштейна: $E = mc^2$. Измерения масс показывают, что масса ядра всегда меньше суммарной массы частиц, из которых оно состоит:

$$M_x < Zm_p + Nm_n, \quad (9.3)$$

где $N = A - Z$ – число нейтронов в ядре.

Разница между массой ядра и суммарной массой слагающих его протонов и нейтронов называется дефектом массы.

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_x. \quad (9.4)$$

За счет уменьшения суммарной массы нуклонов на величину ΔM при образовании ядра выделяется энергия, которая называется *энергией связи*:

$$E_{св} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_x)c^2. \quad (9.5)$$

Как известно из физики 9 класса, в ядерной физике масса частицы измеряется в атомных единицах массы (а. е. м.). Следовательно, энергию связи в МэВ можно вычислить по следующей формуле:

$$E_{св} = 931 (Zm_p + Nm_n - M_x). \quad (9.6)$$

При образовании ядра между нуклонами начинают действовать гигантские ядерные силы. Под действием этих сил положительно заряженные протоны, а также нейтроны устремляются друг к другу с огромным ускорением, вследствие чего выделяются гамма-кванты электромагнитных волн, уносящие с собой энергию связи. Таким образом, масса ядра оказывается меньше, чем суммарная масса составляющих его частиц. При этом унесенный гамма-излучением дефект масс оказывается значительным. Так, например, при образовании 4 г гелия из отдельных атомов (ядер) водорода выделяется такая энергия, какая выделяется при сжигании 1,5–2 вагонов угля.

3. Кроме энергии связи, в физике часто используют понятие *удельной энергии связи*.

Удельной энергией связи называется энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон ядра.

$$E_{уд} = \frac{E_{св}}{A}. \quad (9.7)$$

Удельная энергия связи ядер химических элементов напрямую зависит от их массового числа (*рис. 9.3.1*). Для легких ядер удельная энергия связи круто возрастает при переходе от дейтерия с 1,1 МэВ до 7,1 МэВ у гелия. Затем начинает медленно расти и достигает своего максимального значения 8,7 МэВ/нуклон у элементов с массовым числом $A = 50 - 60$, а потом сравнительно медленно снижается у тяжелых элементов. У урана, например, удельная энергия связи равна 7,6 МэВ/нуклон.

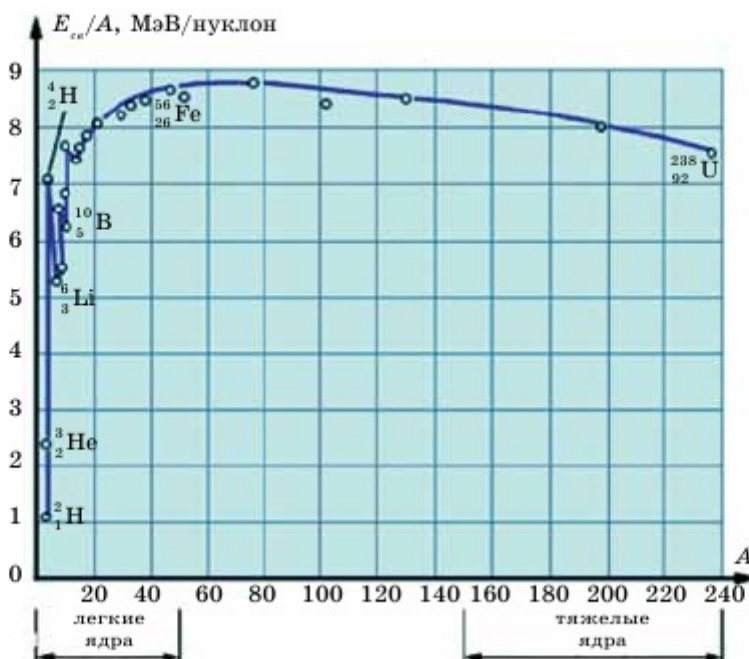


Рис. 9.3.1. График зависимости удельной энергии связи ядер от их массового числа

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет возрастающей с увеличением зарядового числа кулоновской силы отталкивания между протонами, которая стремится разорвать ядро. Поэтому ядра тяжелых химических элементов являются менее прочными; в этой связи некоторые ядра таких элементов испытывают произвольный распад, этим и объясняется естественная радиоактивность.



Дополнительный материал

Почти вся масса атома сосредоточена в его ядре, которое в сравнении с величиной самого атома очень мало. Если атом увеличить до размера футбольного поля, ядро его будет не больше перечного зерна.



Вопросы

1. Чем различаются между собой ядерные, электрические кулоновские и гравитационные силы? В чем заключается особенность ядерных сил?
2. Как соотносятся между собой масса ядра и суммарная масса частиц, из которых оно состоит? Почему возникает дефект масс при образовании ядра?
3. Как определяют энергию связи ядра? Какая энергия называется удельной энергией связи?
4. Какова особенность графика зависимости удельной энергии связи ядер от их массового числа? Как определяются устойчивые и неустойчивые ядра из графика?

**Задание (практическое исследование)**

Постройте график зависимости удельной энергии связи от массового числа для первых 10 элементов Периодической системы химических элементов Менделеева.

Название элемента	Химический символ	Число протонов	Число нейтронов	Удельная энергия связи

**Задание (теоретическое исследование)**

Объясните, почему радиоактивные свойства элементов обусловлены только структурой их ядер.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Определите удельную энергию связи для ядра ${}^{17}_8\text{O}$. Ответ выразите в электрон-вольтах.

Дано:



$$M_x = 16,99913 \text{ а. е. м.}$$

$$E_{\text{уд}} = ?$$

Решение:

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n - M_x),$$

где m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона; M_x – масса ядра, Z – зарядовое число (число протонов в ядре); N – число нейтронов в ядре.

Искомая удельная энергия связи (энергия связи, отнесенная к одному нуклону)

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{931(Zm_p + Nm_n - M_x)}{A},$$

где A – массовое число (число нуклонов в ядре).

Возьмем из таблиц в Приложении значения массы протона и нейтрона:

$$m_p = 1,007265 \text{ а. е. м.}, \quad m_n = 1,0086649 \text{ а. е. м.}$$

Учитывая, что $Z = 8$; $A = 17$; $N = A - Z = 9$, произведем вычисление:

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{931(8 \cdot 1,007265 + 9 \cdot 1,0086649 - 16,99913)}{17} = 7,5 \text{ МэВ/нуклон.}$$

О т в е т: $E_{\text{уд}} = 7,5 \text{ МэВ/нуклон.}$

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

При решении задач данного параграфа учтем, что скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; масса нейтрона $m_n = 1,0086649 \text{ а. е. м.}$; масса протона $m_p = 1,0072765 \text{ а. е. м.}$; масса электрона $m_e = 0,0005486 \text{ а. е. м.}$

Уровень А

9.3.1. Удельная энергия связи для ${}^{238}_{92}\text{U}$ составляет 7,6 МэВ/нуклон. Оцените энергию связи. (Ответ: 1808,8 МэВ.)

9.3.2. Вычислите дефект массы ядра бора ${}^{11}_5\text{B}$. (Ответ: 0,079 а. е. м.)

9.3.3. Найдите удельную энергию связи для алюминия ${}_{13}^{27}\text{Al}$. (Ответ: $\approx 8,08$ МэВ/нуклон.)

Уровень В

9.3.4. Определите массу изотопа ${}_{7}^{16}\text{N}$, если изменение (т.е. дефект) массы при образовании ядра ${}_{7}^{16}\text{N}$ составляет $0,2058 \cdot 10^{-27}$ кг. (Ответ: $24,9 \cdot 10^{-27}$ кг.)

9.3.5. При отрыве нейтрона от ядра гелия ${}_{2}^{4}\text{He}$ образуется ядро ${}_{2}^{3}\text{He}$. Определите энергию связи, которую необходимо для этого затратить. Массы нейтральных атомов ${}_{2}^{4}\text{He}$ и ${}_{2}^{3}\text{He}$ соответственно равны $6,6467 \cdot 10^{-27}$ кг и $5,0084 \cdot 10^{-27}$ кг. (Ответ: 20,59 МэВ.)

9.3.6. Энергия связи ядра, состоящего из трех протонов и четырех нейтронов, равна 39,3 МэВ. Определите массу нейтрального атома, обладающего этим ядром. (Ответ: $\approx 1,17 \cdot 10^{-26}$ кг.)

9.3.7. Определите, какая энергия необходима, чтобы разделить ядро ${}_{6}^{12}\text{C}$ на три α -частицы. Массы нейтральных атомов гелия и углерода соответственно равны $6,6467 \cdot 10^{-27}$ кг и $19,9272 \cdot 10^{-27}$ кг. (Ответ: 726 МэВ.)

9.3.8. Какое минимальное количество энергии требуется сообщить ядру изотопа ${}_{20}^{40}\text{Ca}$, чтобы расщепить его на отдельные, не взаимодействующие между собой нуклоны, если масса ядра равна 39,97542 а.е.м.? (Ответ: 319,5 МэВ.)

9.3.9. Какая минимальная энергия необходима для расщепления азота ${}_{7}^{14}\text{N}$ на протоны и нейтроны? (Ответ: 100,96 МэВ.)

§ 9.4

Ядерные реакции. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции

1. Ядерные реакции – это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где левая часть реакции представляет собой материнское ядро и бомбардирующую частицу, а правая часть – дочернее ядро и новорожденную частицу.

При любой ядерной реакции бомбардирующую частицу следует вплотную приближать к ядру; особенно это тяжело, если частица является положительно заряженной. Так как между положительно заряженными частицей и ядром действуют силы кулоновского отталкивания. Поэтому для преодоления этих сил частицам нужно сообщить огромную энергию, которая передается с помощью *ускорителей* частиц. Это энергия порядка 10^6 МэВ.

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

1) по *роду участвующих в них частиц* – реакции под действием нейтронов;

реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

2) *по энергии вызывающих их частиц* – реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;

3) *по роду участвующих в них ядер* – реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);



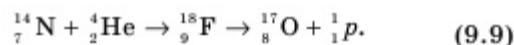
Рис. 9.4.1. Ядерная реакция на быстрых протонах



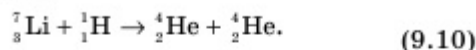
Энрико Ферми (1901–1954) – итальянский физик, наиболее известный благодаря созданию первого в мире ядерного реактора, внесший большой вклад в развитие ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой и статистической механики. Считается одним из «отцов атомной бомбы». Лауреат Нобелевской премии по физике 1938 года «за доказательство существования новых радиоактивных элементов, полученных при облучении нейтронами, и связанное с этим открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами». Э. Ферми был одним из физиков, преуспевших во многих областях физики.

4) *по характеру происходящих ядерных превращений* – реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько γ -квантов).

2. Первая в истории ядерная реакция была осуществлена в 1911 году Э. Резерфордом при бомбардировке атомов азота α -частицами:



Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 году (рис. 9.4.1):



На рис. 9.4.1 показано, как разлетаются ядра гелия, образованные в результате ядерной реакции при бомбардировке ядра лития протонами.

В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел. Эти законы формулируются следующим образом: **сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.**

В ядерных реакциях выполняются также законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

Примером ядерной реакции на нейтронах является следующая реакция:



Законы сохранения зарядового и массового чисел, как видно из этой реакции, строго соблюдаются. Действительно, сумма зарядовых чисел в левой части этой реакции ($13 + 0 = 13$) равна сумме зарядовых чисел в правой части реакции ($11 + 2 = 13$). Убеждаемся в том, что и сумма массовых чисел частиц до и после реакции также остается постоянной: ($27 + 1$) = ($24 + 4$).

3. Первым реакцию на нейтронах начал изучать итальянский физик Энрико Ферми. Он обнаружил, что ядерные превращения более интенсивно происходят на медленных, чем на быстрых нейтронах. Поэтому было предложено замедлять быстрые нейтроны в воде. Этот метод обусловлен быстрой потерей энергии нейтронов после их столкновения с ядрами водорода, так как и нейтрон, и ядро водорода имеют приблизительно одинаковую массу.

В отличие от радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как *экзотермическими* (с выделением энергии), так и *эндотермическими* (с поглощением энергии). Эти виды характеризуются так называемым *энергетическим выходом* ядерной реакции.

Энергетическим выходом ядерной реакции называется разница энергии покоя ядер и частиц до реакции и после нее.

Если суммарная кинетическая энергия ядер и частиц до реакции больше, чем после реакции, то реакция идет с выделением энергии, то есть является *экзотермической*. В обратном случае в ходе реакции энергия поглощается, и реакция является *эндотермической*. Примером такой реакции и является бомбардировка азота α -частицами (9.9). При этом часть кинетической энергии переходит в изменение внутренней энергии вновь образовавшегося ядра.

4. Еще одним из видов ядерных реакций является **деление ядра тяжелых элементов**, таких как уран, плутоний, нептуний, при бомбардировке нейтронами.

Открытие деления урана (рис. 9.4.2) было осуществлено в 1938 году немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом. Впоследствии правильное истолкование было дано в 1939 году английским физиком О. Фришем и австрийским физиком Л. Мейтнер. При захвате нейтрона устойчивость ядра нарушается (рис. 9.4.2), ядро начинает делиться. Это происходит потому, что масса покоя тяжелого ядра, проглотившего лишней нейтрон, больше массы покоя осколков, на которые это ядро делится.



Рис. 9.4.2. Деление урана

Деление ядра также можно объяснить следующим образом. Удельная энергия связи ядра элементов в конце таблицы Менделеева меньше удельной энергии связи элементов в средней части. И когда ядро начинает делиться, то удельная энергия связи каждого осколка увеличивается примерно на 1 МэВ. Это является для них энергетически выгодным, так как дочерние ядра становятся более устойчивыми по сравнению с материнским ядром.

Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления. Например, нейтрон, вылетающий из первого ядра, при делении может вызвать деление соседнего ядра. В свою очередь, вылетающий при делении соседнего ядра нейтрон вызывает деление третьего, и так дальше этот процесс идет по цепочке.

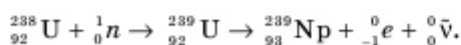
Цепная реакция деления – это ядерная реакция, в которой нейтроны, вызывающие цепочку реакций, образуются как продукты этой реакции.

Цепная реакция деления характеризуется *коэффициентом* размножения k нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении ($k = \Sigma n_{i+1} / \Sigma n_i$).

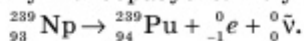
Необходимым условием для развития цепной реакции деления является **требование $k \geq 1$** . Но отметим, что для возникновения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов нужно поддерживать строго на уровне единицы, иначе произойдет взрыв.

Оказывается, что не все образующиеся вторичные нейтроны вызывают последующее деление ядер, что приводит к уменьшению коэффициента размножения. Во-первых, из-за конечных размеров активной зоны (пространство, где происходит цепная реакция) и большой проникающей способности нейтронов часть из них покинет активную зону раньше, чем будет захвачена каким-либо делящимся ядром. Во-вторых, часть нейтронов захватывается ядрами неделящихся примесей, всегда присутствующих в активной зоне.

5. Изотоп урана-238 составляет 97% мирового запаса урановых рудников. Однако эти изотопы не являются непосредственно делящимся материалом, поэтому непригодны для использования как ядерное топливо в атомных электрических станциях. В АЭС в качестве ядерного топлива используют изотоп урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, а также искусственный изотоп плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Урана-235 в природе очень мало (составляет около 3% всего урана), а плутоний-239 в природе не существует (давно распался). В этой связи большое значение имеет не вызывающий деления захват нейтрона изотопом урана ${}_{92}^{238}\text{U}$. В результате чего образуется крайне нестабильный радиоактивный изотоп урана-239, период полураспада которого равен 23 минутам. После его распада образуется нептуний – первый трансурановый элемент с периодом полураспада 2 дня:



Затем после распада нептуния образуется плутоний:



Плутоний является относительно стабильным элементом. Период его полураспада равен 24 000 лет. При воздействии на него медленными нейтронами, как в случае с изотопом урана-235, возможно осуществить цепную реакцию деления, при которой выделяется огромная энергия. Плутоний является потенциальным ядерным топливом для АЭС.



Дополнительный материал

По запасам урана Казахстан занимает второе место (13%) в мире после Австралии (29%). При этом наша республика занимает первое место в мире по производству урана, обеспечивая около 9% мирового рынка.



Вопросы

1. Какие реакции называются ядерными реакциями? По каким признакам классифицируются ядерные реакции?
2. Когда и кем были получены первые ядерные реакции? Как записываются ядерные реакции, полученные при бомбардировке α -частицами, протонами и нейтронами?
3. Какие ядерные реакции называются экзотермическими и эндотермическими? Какая величина называется энергетическим выходом ядерной реакции?
4. Какие реакции называются реакцией деления и цепной ядерной реакцией? Почему происходит деление тяжелых ядер? Каково необходимое условие для протекания цепной ядерной реакции?
5. Каким способом из неделящегося изотопа урана-238 получают делящееся ядерное топливо?



Задание (практическое исследование)

В результате захвата нейтрона ядром ${}_{12}^{23}\text{Mg}$ образуются неизвестный элемент и протон. Запишите эту реакцию и определите неизвестный элемент.



Задание (теоретическое исследование)

Дайте краткое объяснение тому факту, что при β -распаде из ядра вылетает электрон, но электрона в ядре нет. Откуда же он берется?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

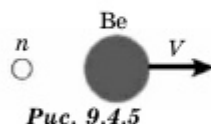
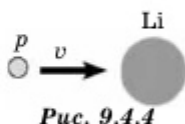
Задача. В ядерной реакции ${}_{3}^7\text{Li} + {}_{1}^1p \rightarrow {}_{4}^7\text{Be} + {}_{0}^1n$ протоны налетают на покоящиеся ядра лития. Если энергия налетающих протонов $E_p = 1,92$ МэВ, то нейтроны, образующиеся в реакции, покоятся. Оцените, какая энергия поглощается в данной реакции. При какой минимальной энергии налетающих протонов эта реакция может идти?

Дано:
 ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$
 $E_p = 1,92 \text{ МэВ}$
 $E_{\text{погл}} = ?$
 $E' = ?$

СИ
 $3,07 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$

Решение:
 Это первый пример ядерной реакции, в которой энергия поглощается ($E_{\text{погл}}$). В лабораторной системе отсчета имеем движущийся со скоростью v протон и покоящееся ядро лития (рис. 9.4.4).

После ядерной реакции нейтрон неподвижен, а ядро бериллия приобретает некоторую скорость V (рис. 9.4.5).



По закону сохранения импульса $m_p v = m_{\text{Be}} V$. Зная массовое число каждой частицы, находим $V = \left(\frac{1}{7}\right)v$. В лабораторной системе отсчета по закону сохранения энергии: $E_p = E_{\text{погл}} + E_{\text{Be}}$ или $\frac{m_p v^2}{2} = E_{\text{погл}} + \frac{m_{\text{Be}} V^2}{2}$, откуда $E_{\text{погл}} = \frac{6}{7} E_p$.

Теперь выясним, при какой минимальной энергии налетающих протонов E' эта реакция вообще может идти. В системе отсчета «центр масс системы протон – ядро лития», которая движется вправо с некоторой скоростью v' , их импульс $m_p(v - v') - m_{\text{Li}} v' = 0$, откуда $v' = \frac{1}{8}v$. Если протон обладает минимальной энергией E' , то в данной системе отсчета вся она поглощается и возникшие в реакции частицы не разлетаются:

$$\frac{m_p}{2} \left(\frac{7}{8}v\right)^2 + \frac{m_{\text{Li}}}{2} \left(\frac{1}{8}v\right)^2 = E_{\text{погл}}. \text{ Учитывая, что } m_{\text{Li}} \approx 7m_p, \text{ получим } \frac{7}{8} \left(\frac{m_p}{2} v^2\right) = E_{\text{погл}},$$

или $\frac{7}{8} E' = \frac{6}{7} E_p$, откуда $E' = \frac{48}{49} E_p$.

О т в е т: $E_{\text{погл}} = \frac{6}{7} E_p$; $E' = \frac{48}{49} E_p$.

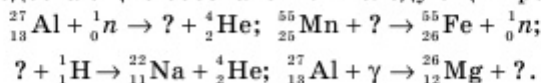


ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

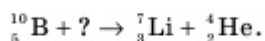
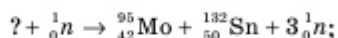
При решении задач данного параграфа учтем, что скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; масса нейтрона $m_n = 1,0086649 \text{ а. е. м.}$; масса протона $m_p = 1,0072765 \text{ а. е. м.}$; масса электрона $m_e = 0,0005486 \text{ а. е. м.}$; универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$.

Уровень А

9.4.1. Напишите недостающие обозначения в следующих реакциях:

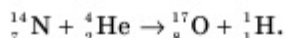


- 9.4.2. В результате захвата нейтрона ядром $^{12}_6\text{C}$ образуется неизвестный элемент и протон. Запишите эту реакцию и определите неизвестный элемент.
- 9.4.3. Определите неизвестные элементы ядерных реакций:



Уровень В

- 9.4.4. Толщина слоя половинного ослабления нейтронного излучения водой равна 3 см. Во сколько раз ослабит поток нейтронов слой воды толщиной 9 см? (Ответ: в 8 раз.)
- 9.4.5. Ядро радона $^{222}_{86}\text{Rn}$, находящееся в покое, испускает α -частицу, имеющую скорость 16 Мм/с. Зная, что масса дочернего ядра составляет $3,62 \cdot 10^{-26}$ кг, определите: 1) импульс α -частицы; 2) кинетическую энергию α -частицы; 3) импульс отдачи дочернего ядра; 4) кинетическую энергию отдачи дочернего ядра. (Ответ: 1) $1,07 \cdot 10^{-19}$ кг · м/с; 2) 5,356 МэВ; 3) $1,07 \cdot 10^{-19}$ кг · м/с; 4) 99 МэВ.)
- 9.4.6. Ядро бора $^{10}_5\text{B}$ может захватывать нейтрон, в результате чего происходит расщепление ядра бора на ядра лития и гелия. Напишите ядерную реакцию и определите энергию, освобождающуюся при этой реакции. (Ответ: $\approx 2,79$ МэВ.)
- 9.4.7. Определите энергетический выход ядерной реакции:



(Ответ: $-1,2$ МэВ.)

- 9.4.8. Найдите энергетический выход ядерной реакции: ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0n \rightarrow ? + {}^{14}_6\text{C}$, если энергия связи ядра ${}^{14}_7\text{N}$ равна 104,66 МэВ, а ядра ${}^{14}_6\text{C}$ – 105,29 МэВ. (Ответ: 0,63 МэВ.)

Уровень С

- 9.4.9. Определите, какую долю кинетической энергии теряет нейтрон при упругом столкновении с покоящимся ядром углерода $^{12}_6\text{C}$, если после столкновения частицы движутся вдоль одной прямой. Массу нейтрального углерода принять равной $19,9272 \cdot 10^{-27}$ кг. (Ответ: 0,286.)
- 9.4.10. При бомбардировке ${}^7_3\text{Li}$ протонами он превращается в гелий ${}^4_2\text{He}$. Определите объем гелия, образовавшегося из 1 г лития, если гелий в конце опыта имел температуру 30°C и давление 93 кПа. (Ответ: $7,8 \cdot 10^{-3}$ м³.)

§ 9.5

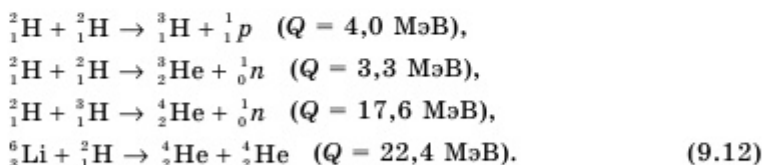
Термоядерные реакции

1. Существует два способа освобождения внутриядерной энергии атомов. По первому способу атомная энергия освобождается при бомбардировке тяжелых ядер нейтронами; такая ядерная реакция деления была рассмотрена в предыдущей теме. Согласно второму способу, внутриатомная энергия освобождается при слиянии ядер легких элементов. Действительно, как это видно из графика (рис. 9.3.1), по мере роста массового числа легких элементов растет их удельная энергия связи, тогда как у тяжелых элементов удельная энергия связи с ростом массового числа уменьшается. Поэтому с энергетической точки зрения выгодно делить тяжелое ядро, а легкие ядра, наоборот, выгоднее объединять. В этом случае и реакция деления тяжелых ядер, и реакция слияния легких ядер происходит в *экзотермическом* режиме с выделением внутриатомной энергии. В противном случае, т.е. если пытаемся объединить тяжелые ядра и делить легкое ядро, мы, затратив огромную энергию на такие *эндотермические* реакции, взамен ничего не получим. В этом случае энергия только поглощается атомами и внутренняя энергия не освобождается.

Для осуществления экзотермических ядерных реакций также требуется затратить извне немало энергии, но такая затрата многократно окупается. Например, для слияния легких ядер требуется их нагревать до десятков миллионов градусов. В случае слияния (синтеза) легких ядер выделяется огромная энергия.

Итак, **термоядерными называются реакции слияния легких ядер при очень большой температуре.**

Для протекания реакции синтеза атомных ядер необходима температура порядка 10^7 К. Это связано с тем, что при температурах, характерных для реакций синтеза атомных ядер, любое вещество находится в состоянии плазмы. В этом состоянии оголенные от своих электронов ядра, приобретая колоссальную тепловую скорость $\left(\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2\right)$, могут войти в зону действия ядерных сил, создавая более тяжелые ядра новых химических элементов. Ниже приводятся некоторые экзотермические реакции слияния (синтеза) легких ядер с указанием выделяемой при этом энергии:



Атомное ядро легкого элемента может и делиться, если сообщить ему извне энергию, превышающую его удельную энергию связи. Однако в этом случае

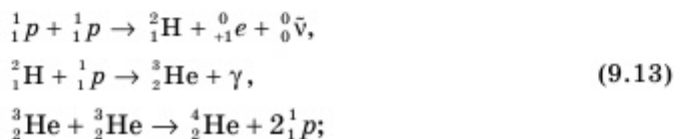
ядерная реакция приобретает эндотермический характер, т.е. энергия только поглощается и не выделяется.

Реакции синтеза атомных ядер обладают той особенностью, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно больше (примерно в 3–4 раза), чем в реакциях деления тяжелых ядер. В самом деле, если при делении ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ выделяется энергия примерно 200 МэВ, что составляет на один нуклон примерно 0,84 МэВ, то в реакции синтеза эта величина равна $\frac{17,6}{5}$ МэВ $\approx 3,5$ МэВ.

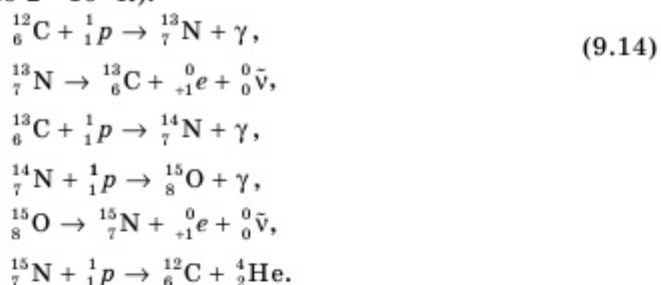
2. Термоядерные реакции играют большую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение. По современным представлениям на ранней стадии развития звезда в основном состоит из атомов (ядер) водорода. Внутри звезды протекают реакции слияния ядер водорода с образованием гелия.

Существует два предположения о возможных способах протекания термоядерных реакций на звездах, в том числе и на Солнце:

1) протонно-протонный, или водородный цикл, характерный для температур (примерно 10^7 К):



2) углеродно-азотный, или углеродный цикл, характерный для более высоких температур (примерно $2 \cdot 10^7$ К):



В результате этого цикла четыре протона превращаются в ядро гелия и выделяется энергия, равная 26,7 МэВ. Ядра же углерода, число которых остается неизменным, участвуют в реакции в роли катализатора.

Термоядерные реакции дают больший выход энергии на единицу массы «горючего», чем любые другие превращения, в том числе и деление тяжелых ядер. Например, количество дейтерия (${}^2_1\text{H}$) в стакане простой воды энергетически эквивалентно примерно 60 л бензина. Поэтому заманчива перспектива осуществления управляемых термоядерных реакций искусственным путем.

Впервые неуправляемая искусственная термоядерная реакция была осуществлена в СССР (1953), а затем (через полгода) в США в виде взрыва водородной (термоядерной) бомбы.

3. Для осуществления управляемой экзотермической ядерной реакции

необходимо решить три сложнейшие проблемы. Первая из них связана с нагревом плазмы до десятков миллионов градусов. Вторая – с удержанием сверхвысокотемпературной плазмы вдали от холодной поверхности. Третья проблема связана с доведением плотности частиц в плазме до оптимального уровня, позволяющего поддерживать экзотермическую термоядерную реакцию. Ученые в течение многих лет работают над теоретическим и практическим решением этих проблем. Проблемы оказались настолько сложными, что для их решения требуется консолидация усилий всего мирового сообщества. Именно поэтому в 1956 году И. В. Курчатов во время визита в Англию поднял вопрос о необходимости широкого международного сотрудничества в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Из указанных трех проблем остановимся лишь на второй проблеме, касающейся удержания высокотемпературной плазмы в изолированном состоянии от каких-либо холодных стен. Примером плазмы с температурой до десяти тысяч градусов служат *электрическая дуга* и *молния*. А в термоядерной плазме температура составляет несколько десятков миллионов градусов. Такая плазма состоит из положительно заряженных ядер легких элементов и отрицательно заряженных электронов. Для удержания заряженных частиц плазмы вдали от холодной стены используются *электрические и магнитные поля*.

В электрическом поле разноименно заряженные частицы вдоль силовых линий совершают упорядоченные противоположно направленные движения за счет работы электрического поля. При этом одновременно возникают электрический ток (т.е. направленное движение заряженных частиц), а вокруг тока – магнитное поле. Магнитное поле в свою очередь действует на заряженные частицы с силой Лоренца. Как известно, сила Лоренца не совершает работу над частицами, но способствует совершению ими кругового движения вокруг силовых линий поля. Таким образом, сила Лоренца как бы «привязывает» каждую заряженную частицу к силовым линиям электрического поля. К тому же сила Лоренца всегда направлена к центру кругового движения заряженных частиц. Следовательно, эта сила не только «привязывает» частицы, но и заставляет их прижиматься все теснее и теснее к силовым линиям электрического поля. Таким образом происходит отрыв горячей плазмы от холодной стены внешней среды. Этот способ удержания высокотемпературной плазмы применяют в современных **токамаках**.

Под руководством Л. А. Арцимовича коллектив ученых Института атомной энергии (ИАЭ) им. И. В. Курчатова осуществил ряд исследований, результатом которых стал пуск летом 1975 г. в ИАЭ крупнейшей в мире *термоядерной установки «Токамак-10»*.

В 2017 году отечественная установка токамак была запущена и в Казахстане в Национальном ядерном центре в городе Курчатове.

Однако вышеуказанные проблемы до сих пор не нашли своего окончательного решения. Когда решения будут найдены, управляемый термоядерный синтез откроет человечеству доступ к неисчерпаемой «кладовой» ядерной энергии, заключенной в легких элементах. Наиболее заманчивой в этом смысле является возможность извлечения энергии из дейтерия, содержащегося в обычной воде. В самом деле, количество дейтерия в Мировом океане

составляет примерно $4 \cdot 10^{13}$ т, чему соответствует энергетический запас 10^{17} МВт · год. Другими словами, эти ресурсы навечно могут обеспечить человечество необходимой энергией.



Вопросы

1. Почему при реакции синтеза легких ядер и при реакции деления тяжелых атомных ядер выделяется огромная энергия? В противном случае какие могут быть реакции?
2. Какие реакции называются термоядерными реакциями? Какие условия необходимы для протекания термоядерной реакции? Приведите примеры и напишите формулы некоторых экзотермических и эндотермических реакций с участием легких ядер.
3. Как протекают термоядерные реакции на звездах и Солнце?
4. Как характеризуются движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях? Каковы проблемы и перспективы использования термоядерной энергии?



Задание (теоретическое исследование)

Подготовьте презентацию на тему «Холодный ядерный синтез».

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Определите, сколько энергии «вырабатывает» красный гигант, в недрах которого каждую секунду в результате термоядерной реакции сливаются в синтезе 10^{34} ядер изотопа бериллия-8, гелия-4, образуя углерод. При этом 12,5% от энергии слияния идет на поддержание первой ступени самой реакции.

Дано:

$$N = 10^{34}$$

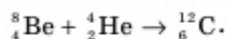


$$W_0 = 12,5\% \Delta W$$

$$W_{\text{сум}} = ?$$

Решение:

Для нахождения энергетического выхода термоядерной реакции напомним уравнение ядерной реакции:



Энергетический выход – разница суммарной энергии покоя начальных атомов и конечных: $\Delta W = W_1 - W_2$.

$$W = mc^2;$$

$$W_1 = (m_{\text{Be}} + m_{\text{He}})c^2 = 11190,06 \text{ МэВ}.$$

Отметим, что $1 \text{ а. е. м.} = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

$$W_2 = m_{\text{C}}c^2 = 11182,24 \text{ (МэВ)}. \quad \Delta W = W_1 - W_2 = 7,82 \text{ (МэВ)}.$$

Причем 12,5% этой энергии идет на поддержание первой ступени данной реакции, тогда $100 - 12,5 = 87,5\%$. Получается, что энергетический выход равен

$$W = 0,875 \Delta W = 6,8425 \text{ (МэВ)}.$$

$$W_{\text{сум}} = W \cdot N = 6,8425 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{34} = 1,09 \cdot 10^{22} \text{ (Дж)}.$$

О т в е т: $W_{\text{сум}} = 1,09 \cdot 10^{22} \text{ (Дж)}$.

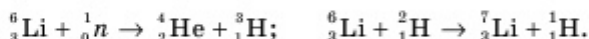
**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

При решении задач данного параграфа учтем, что скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Уровень А

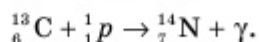
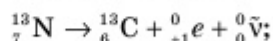
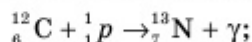
9.5.1. В результате термоядерной реакции соединения двух протонов образуется дейтрон и нейтрино. Какая еще появляется частица?

9.5.2. Найдите энергию, выделяющуюся при следующих термоядерных реакциях:



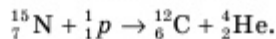
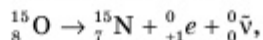
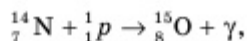
(Ответ: 4,02 МэВ; 17,58 МэВ; 4,79 МэВ; 5,02 МэВ.)

9.5.3. Найдите энергетический выход следующих реакций:



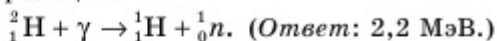
(Ответ: 1,43 МэВ; 1,71 МэВ; 7,04 МэВ.)

9.5.4. Найдите энергетический выход следующих реакций.

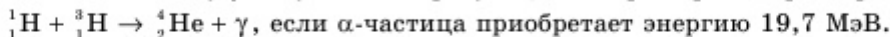


(Ответ: 6,78 МэВ; 2,24 МэВ; 4,46 МэВ.)

9.5.5. Найдите наименьшую энергию кванта, необходимую для осуществления реакции.

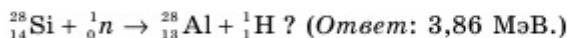
**Уровень В**

9.5.6. Найдите частоту γ -излучения, образующегося при термоядерной реакции:



(Ответ: $2,7 \cdot 10^{19}$ Гц.)

9.5.7. Какой минимальной кинетической энергией должен обладать нейтрон, чтобы он был в состоянии при столкновении с ядром кремния ${}^{28}_{14}\text{Si}$ вызвать ядерную реакцию:



9.5.8. При аннигиляции электрона и позитрона образовалось два одинаковых γ -кванта. Найдите длину волны, пренебрегая кинетической энергией частиц до реакции. (Ответ: 2,4 пм.)

Уровень С

9.5.9. Энергия излучения Солнца возникает вследствие цепочки ядерных реакций слияния, конечным результатом которых является превращение четырех

атомов водорода в один атом гелия. Определите, сколько воды можно было бы нагреть от 0°C до кипения за счет превращения в гелий 4 г водорода. Учтем, что удельная теплоемкость воды равна $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. (Ответ: $6 \cdot 10^6 \text{ кг}$.)

Лабораторная работа № 7.

Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям

Цель работы: научить учащихся исследовать треки заряженных частиц по их длине, толщине, искривлению в магнитном поле.

Необходимое оборудование: фотографии с треками заряженных частиц; калька; линейка; треугольники; циркуль.

Краткая теория. По трекам заряженных частиц в магнитном поле можно определить их удельный заряд $\frac{q}{m}$.

На частицу, движущуюся в магнитном поле, действуют одновременно сила Лоренца и центростремительная сила.

Из этого имеем

$$\frac{mv^2}{R} = qvB,$$

$$R = \frac{mv}{qB},$$

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}.$$

Отсюда следует, что удельный заряд частицы обратно пропорционален радиусу. Если известен радиус кривизны трека частицы с известным удельным зарядом (рис. 9.6.1), то можно написать соотношение:

$$\frac{\frac{q_1}{m_1}}{\frac{q_2}{m_2}} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (9.15)$$

На рис. 9.5.1 первый трек принадлежит протону, второй трек – неизвестной частице.

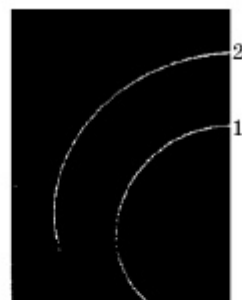


Рис. 9.5.1

Порядок работы:

1. На кальку нанесите треки частиц.

2. Измерение радиусов делается следующим образом: начертите две хорды кривой, затем из центра каждой хорды проведите перпендикуляры. Центр кривой будет располагаться в месте пересечения перпендикуляров (рис. 9.5.2).

3. Найдите удельный заряд неизвестной частицы по выражению (9.15), зная удельный заряд протона.



Рис. 9.5.2

4. По найденному удельному заряду определите частицу.

5. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения. Абсолютная погрешность $\Delta x_n = x_{cp} - x_n$, где x_{cp} – средняя величина, равная среднему арифметическому значению всех полученных значений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta E_x}{E_{cp}} \cdot 100\%$. Среднее значение абсолютной и относительной погрешностей определяют как среднее арифметическое всех величин.

6. Для осмысления проделанной работы ответьте на следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 7

1. Почему электрон движется по спиралевидной траектории?
2. Как меняется толщина трека по мере движения частиц? Что из этого следует?
3. Как возникают треки частиц в камере Вильсона, пузырьковой камере и фотоэмульсии?
4. Почему трек электрона гораздо длиннее треков α -частиц?

§ 9.6

Ядерный реактор. Критическая масса. Ядерная энергетика

1. Большое значение в ядерной энергетике приобретает не только осуществление цепной реакции деления, но и управление ею. Устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления, называются *ядерными реакторами*. Пуск первого реактора в мире осуществлен в Чикагском университете (1942) под руководством Э. Ферми, в России (и в Европе) – в Москве (1946) под руководством И. В. Курчатова.

Для того чтобы пояснить, как осуществляется управляемая ядерная реакция деления, рассмотрим принцип действия реактора на тепловых нейтронах. У любого ядерного реактора есть несколько частей: *активная зона с топливом и замедлителем, отражатель нейтронов, теплоноситель, система управления и защиты*. Активная зона представляет собой ядерное топливо в виде тепловыделяющих элементов с замедлителем – ТВЭЛов. Активная зона находится внутри своеобразной капсулы – отражателя нейтронов. Через активную зону протекает обычная вода (теплоноситель). Среди других теплоносителей реже используется «тяжелая вода» и жидкий графит. Поскольку в активной зоне очень высокий уровень радиоактивности, его окружает надежная радиационная защита. Система управления и защиты состоит из вводимых в рабочее пространство стержней из кадмия и бора – веществ, хорошо поглощающих нейтроны. В первой части *рис. 9.6.1* показан реактор. Хорошо видны стержни. Во второй части рисунка показана система, в которой происходит энергообеспечение с помощью реактора.

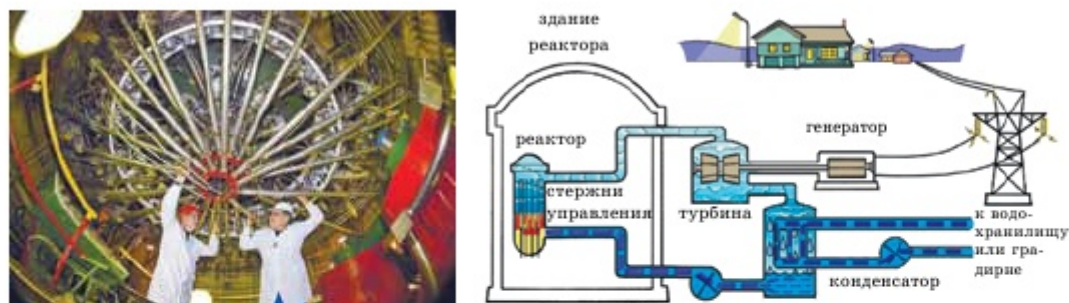


Рис. 9.6.1. Атомный реактор (слева) и общая схема АЭС

Реактор запускается, когда из его активной зоны извлекаются стержни, поглощающие нейтроны. Во время цепной реакции высвобождается большая тепловая энергия, циркулируя через активную зону реактора и омывая топливные элементы, ТВЭЛы, вода нагревается до 320° .

Проходя внутри теплообменных трубок парогенератора, вода первого контура отдает тепло воде второго контура, не соприкасаясь с ней, что исключает попадание радиоактивных веществ за пределы реакторного зала. А далее все как на обычной теплоэлектростанции. Вода второго контура превращается в пар. Пар с бешеной скоростью вращает турбину, а турбина приводит в движение электрогенератор, который и вырабатывает электрический ток.

2. Коэффициент размножения нейтронов зависит от природы делящегося вещества, а для данного изотопа – от его количества, а также от размеров и формы активной зоны.

Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной реакции, называются критическими размерами.

Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления цепной реакции, называется критической массой.

При выдвинутых из активной зоны стержнях $k > 1$, при вдвинутых $k < 1$, при этом можно приостановить развитие цепной реакции, вдвигая в любой момент стержни. Управление цепной реакцией является автоматизированным процессом.

Создание ядерных реакторов привело к промышленному применению ядерной энергии. Энергетические запасы ядерного горючего в рудах примерно на два порядка превышают запасы химических видов топлива. Поэтому раньше предполагалось, что если основная доля электроэнергии будет вырабатываться на АЭС, то это, с одной стороны, снизит стоимость электроэнергии, которая сравнима с вырабатываемой на тепловых электростанциях, а с другой – решит энергетическую проблему на несколько столетий и позволит использовать сжигаемые сейчас нефть и газ в качестве ценного сырья для химической промышленности. Такое предположение все еще остается в силе. Тем не менее поиски альтернативных источников энергии, не вредных для окружающей среды, становятся все актуальнее.

3. В СНГ кроме создания мощных АЭС (например, Нововоронежской общей мощностью примерно 1500 МВт, первой очереди Ленинградской с двумя реакторами по 1000 МВт) большое внимание уделяется созданию небольших АЭС (750–1500 кВт), удобных для эксплуатации в специфических условиях, а также решению задач малой ядерной энергетики. Так, построены первые в мире передвижные АЭС, создан первый в мире реактор («Ромашка»), в котором с помощью полупроводников происходит непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую (в активной зоне содержится 49 кг $^{235}_{92}\text{U}$, тепловая мощность реактора – 40 кВт, электрическая – 0,8 кВт).

В Казахстане имеется три ядерных реактора. Один из реакторов расположен в Алматы – в Институте ядерной физики. Исследовательский атомный реактор ВВР-К данного научного института был введен в эксплуатацию в 1967 году. На базе реактора проводятся фундаментальные ядерно-физические и материаловедческие исследования и внутриреакторные испытания, производство радиоизотопов для медицины и промышленности, γ -источников, нейтронное легирование кремния, а также нейтронно-активационный анализ. Другие два реактора расположены в Восточном Казахстане – в Национальном ядерном центре в Курчатове.

В Национальном ядерном центре Казахстана в городе Курчатове в рамках международной выставки EXPO в 2017 году произведен физический пуск отечественного материаловедческого термоядерного реактора токамак. С его запуском наша страна вошла в десятку стран мира, имеющих подобные высокотехнологические установки. Казахстанским термоядерным реактором уже заинтересовался ряд государств. Со многими из них подписано соглашение о совместном его использовании.

4. Огромные возможности для развития атомной энергетики открываются с созданием *реакторов-размножителей* на быстрых нейтронах (бридеров), в которых выработка энергии сопровождается производством вторичного горючего – плутония $^{242}_{94}\text{Pu}$, что позволит кардинально решить проблему обеспечения ядерным горючим. Как показывают оценки, 1 т гранита содержит примерно 3 г $^{238}_{92}\text{U}$ и 12 г $^{232}_{90}\text{Th}$ (именно они используются в качестве сырья в реакторах-размножителях), т.е. при потреблении энергии $5 \cdot 10^8$ МВт (на два порядка выше, чем сейчас) запасов урана и тория в граните хватит на 10^9 лет.

Техника реакторов на быстрых нейтронах находится в стадии поисков наилучших инженерных решений. Первая опытно-промышленная станция такого типа мощностью 350 МВт была построена в г. Актау на берегу Каспийского моря. Она использовалась для производства электроэнергии и опреснения морской воды в 1972–1999 гг, обеспечивая водой город и прилегающий район нефтедобычи.



Дополнительный материал

- Самый большой в мире парк АЭС принадлежит США. В эксплуатации находятся энергоблоки суммарной мощностью около 100 ГВт. Они обеспечивают производство 20% электроэнергии страны.
- Мировым лидером по использованию АЭС является Франция. Ее энергоблоки вырабатывают около 80% всей электроэнергии страны. При этом их суммарная мощность меньше, чем у американских – около 70 ГВт.

**Вопросы**

1. Что называют ядерным реактором? Из каких частей состоит ядерный реактор?
2. Как объясняется принцип действия ядерного реактора? С помощью каких элементов управляют ядерным реактором?
3. Что такое критический размер и критическая масса? Какой характер носит цепная реакция деления, если коэффициент размножения: 1) $k > 1$; 2) $k = 1$; 3) $k < 1$?
4. Для каких целей создаются атомные и термоядерные реакторы? Какие типы реакторов существуют в Казахстане и СНГ?
5. В чем заключается принципиальное отличие атомных реакторов на тепловых и быстрых нейтронах?

**Задание (практическое исследование)**

Сделайте мини-модель ядерного реактора.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. При сгорании ядерного топлива на атомной электростанции за 1 с выделяется приблизительно 28,5 МДж энергии. Сколько ядерного горючего расходует станция за сутки, если принять, что один атом урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ при делении на два осколка выделяет 200 МэВ энергии?

Дано:	СИ	Решение:
$W = 28,5 \text{ МДж}$	$28,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}$	Рассчитаем, сколько энергии выделяется при сгорании ядерного топлива за 1 сутки:
${}_{92}^{235}\text{U}$		$W_c = W \cdot t.$
$W_0 = 200 \text{ МэВ}$	$32 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$	Так как $t = 1 \text{ сутки} = 86\,400 \text{ секунд}$, то
$m = ?$		$W_c = W \cdot t.$

$$W_c = 28,5 \cdot 10^6 \cdot 86400 = 2\,462\,400 \cdot 10^6 \text{ (Дж)}.$$

Если один атом урана при делении на два осколка выделяет 200 МэВ энергии, то для выделения $2\,462\,400 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ энергии нужно

$$N = \frac{W_c}{W_0} = \frac{2\,462\,400 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{32 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}} = 76\,950 \cdot 10^{18},$$

то есть требуется $76\,950 \cdot 10^{18}$ атомов урана.

Подсчитаем массу урана:

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \Rightarrow m = \frac{NM}{N_A} = \frac{76\,950 \cdot 10^{18} \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} = 0,03 \text{ кг} = 30 \text{ (граммов)}.$$

О т в е т: 30 (граммов урана).

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень В**

- 9.6.1. Какая масса урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ расходуется за сутки на атомной электростанции мощностью 5000 кВт с КПД 17%, если при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ? (Ответ: $31,1 \cdot 10^{-8}$ кг.)
- 9.6.2. Определите число нейтронов, возникающих за 1 с в ядерном реакторе с тепловой мощностью 200 МВт, если известно, что при одном акте деления выделяется энергия 200 МэВ, а среднее число нейтронов на один акт деления составляет 2,5. (Ответ: $1,6 \cdot 10^{19}$.)
- 9.6.3. Найдите электрическую мощность атомной электростанции, расходующей уран ${}_{92}^{235}\text{U}$ массой 0,1 кг в сутки, если КПД станции составляет 16%. (Ответ: 15,13 МВт.)
- 9.6.4. Реактор мощностью 100 МВт производит плутоний ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Исходя из того, что в среднем при одном акте деления ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ возникает 1,5 ядра плутония, найдите, сколько при этом плутония образуется в течение 10 дней. (Ответ: 72 г.)
- 9.6.5. При делении одного ядра урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ освобождается 200 МэВ энергии. Сколько энергии выделится при цепной реакции в образце данного урана массой 60 кг, если разделится 0,1% содержащихся в нем ядер? (Ответ: $306,2 \cdot 10^{23}$ МэВ.)
- 9.6.6. На атомной электростанции за год расходуется 19,5 кг ${}_{92}^{235}\text{U}$. КПД станции составляет 25%. Найдите электрическую мощность станции, если при делении одного ядра урана выделяется 200 МэВ энергии. (Ответ: 12,6 МВт.)
- 9.6.7. Атомная электростанция мощностью 1000 МВт имеет КПД 20%. Какова масса расходуемого за сутки урана ${}_{92}^{235}\text{U}$? При делении одного ядра урана выделяется 200 МэВ энергии. (Ответ: $\approx 5,3$ кг.)
- 9.6.8. Ввиду большой энергии связи, приходящейся на нуклон ядра гелия, возможны экзотергические реакции деления легких ядер. Найдите, какая энергия выделяется при бомбардировке бора ${}_{5}^{11}\text{B}$ протонами с образованием трех α -частиц. (Ответ: 8,2 МэВ.)
- 9.6.9. Определите, какое количество урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ потребляет в сутки атомный ледокол, если мощность его двигателей $3,2 \cdot 10^7$ Вт, а коэффициент полезного действия составляет 17%. Считать, что при делении одного ядра атома урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ выделяется энергия 200 МэВ. (Ответ: 0,2 кг.)

Уровень С

- 9.6.10. В ядерном реакторе на тепловых нейтронах среднее время жизни одного поколения нейтронов составляет 90 мс. Принимая коэффициент размножения нейтронов $k = 1,002$, определите период реактора. Период реактора – это время, в течение которого поток тепловых нейтронов в реакторе возрастает в e раз. (Ответ: 45 с.)

§ 9.7

Биологическое действие радиоактивных излучений. Искусственная радиоактивность. Защита от радиации

1. Радиоактивное излучение оказывает негативное воздействие на здоровье человека. У человека возможны реакции, начиная с повышения температуры тела и заканчивая лучевой болезнью. Как известно, повышение температуры тела губительно для клеток тела. Радиоактивное излучение поражает костный мозг, клетки пищеварительного тракта и других частей тела.

Механизм биологического воздействия радиоактивного излучения делится на *соматический* и *генетический*. Соматические эффекты проявляются непосредственно у наблюдаемых людей, генетические передаются потомству, поражая хромосомы. Причем действие облучения проявляется не сразу – колеблется от 2–3 часов до нескольких месяцев.

Радиоактивные излучения отличаются и положительными сторонами. В медицине действие радиоактивного излучения используют для лечения раковых опухолей. Быстро размножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ -лучами радиоактивных препаратов, которые для этой цели более эффективны, чем рентгеновские лучи.

2. *Явление искусственной радиоактивности* открыто в 1934 г. супругами Жюлио-Кюри, которые показали, что при бомбардировке α -частицами ядер легких элементов образуются другие элементы, являющиеся радиоактивными. Реакция, в ходе которой удалось открыть искусственную радиоактивность, имеет вид:



В результате этой реакции возникает искусственный радиоактивный изотоп фосфора ${}_{15}^{30}\text{P}$.

Можно получить искусственные радиоактивные изотопы при бомбардировке ядер стабильных элементов нейтронами. Например, при бомбардировке азота нейтронами образуется искусственный радиоактивный изотоп углерода ${}_{6}^{14}\text{C}$, при распаде которого возникает поток электронов (β -излучений):



В настоящее время известно свыше 900 радионуклидов, получаемых искусственным путем.

Искусственной радиоактивностью называются излучения, испускаемые нестабильными изотопами химических элементов, являющихся продуктами научно-хозяйственной деятельности людей.

Природа излучений естественной и искусственной радиоактивностей одна и та же, оба вида подчиняются одному и тому же закону радиоактивного распада.

Искусственные радионуклиды подразделяются на три группы:

- а) **радиоактивные продукты ядерного деления.** Они возникают при реакциях деления ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и т.д. Источники этой группы радионуклидов: испытания ядерного оружия, работа предприятий ядерного топливного цикла и атомной промышленности (ядерно-энергетические установки, радиохимические заводы и т.д.). При ядерных взрывах образуется около 250 радиоактивных изотопов 35 элементов. Период их полураспада варьируется от нескольких секунд до нескольких десятков лет;
- б) **радиоактивные продукты распада последующих поколений ядер трансураниевых элементов,** получаемых в ядерно-энергетических установках и при ядерных взрывах.
- в) **продукты наведенной радиоактивности,** образующиеся в результате ядерных реакций элементарных частиц. Нейтроны, образующиеся при цепной реакции деления урана или плутония, воздействуют на ядра стабильных элементов окружающей среды, превращая их в радиоактивные (реакция активации). К этим радионуклидам относятся ^{45}Ca , ^{24}Na , ^{27}Mg , ^{29}Al , ^{31}Si , ^{65}Zn , ^{54}Fe и др. Большая часть их распадается с испусканием β -частиц и γ -излучения.

Однако ежегодной рост искусственных радиоактивных источников наряду с естественными радиоактивными элементами и для окружающей среды, и для всех видов живого организма представляет серьезную опасность. В этой связи следует знать единицы измерения поглощенной дозы радиоактивных измерений, а также предельно допустимую дозу излучения для живого организма.

3. Степень воздействия радиоактивного излучения на живые организмы определяется дозой излучения.

Поглощенной дозой излучения называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (9.18)$$

В СИ поглощенную дозу излучения выражают в греях (сокращенно Гр).

1 Гр равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр на человека. Международная комиссия по радиационной защите установила **для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую за год дозу 0,05 Гр. Доза излучения 3–10 Гр, полученная за короткое время, смертельна.**

На практике широко используется внесистемная единица экспозиционной дозы излучения – **рентген** (сокращенно Р). Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского и γ -излучений. Доза излучения равна одному рентгену (1 Р), если в 1 см³ сухого воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст. образуется столько ионов, что их суммарный заряд каждого знака в отдельности равен $3 \cdot 10^{-10}$ Кл. При этом получается примерно $2 \cdot 10^9$ пар

ионов. Число образующихся ионов связано с поглощаемой веществом энергией. **В практической дозиметрии можно считать 1 Р примерно эквивалентным поглощенной дозе излучения 0,01 Гр.**

Характер воздействия излучения зависит не только от дозы поглощенного излучения, но и от его вида. Различие биологического воздействия видов излучения характеризуется **коэффициентом качества k** . За единицу принимается коэффициент качества рентгеновского и γ -излучения.

Самое большое значение коэффициента качества у α -частиц ($k = 20$), α -лучи являются самыми опасными, так как вызывают самые большие разрушения живых клеток.

Для оценки действия излучения на живые организмы вводится специальная величина – эквивалентная доза поглощенного излучения. Это произведение дозы поглощенного излучения на коэффициент качества:

$$H = D \cdot k. \quad (9.19)$$

Единица эквивалентной дозы – *зиверт* (Зв). **1 Зв – эквивалентная доза, при которой доза поглощенного γ -излучения равна 1 Гр.**

Максимальное значение эквивалентной дозы, после которой происходит поражение организма, выражающееся в нарушении деления клетки или образовании новых клеток, составляет 0,5 Зв.

Среднее значение эквивалентной дозы поглощенного излучения за счет естественного радиационного фона (космические лучи, радиоактивные изотопы земной коры и т.д.) составляет 2 мЗв в год.

4. Защита организма от излучения. При работе с любым источником радиации (радиоактивные изотопы, реакторы и др.) необходимо принимать меры по радиационной защите всех людей, могущих попасть в зону действия излучения.

Самый простой метод защиты – это удаление персонала от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учета поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому ампулы с радиоактивными препаратами не следует брать руками. Надо пользоваться специальными щипцами с длинной ручкой.

В тех случаях, когда удаление от источника излучения на достаточно большое расстояние невозможно, для защиты от излучения используют преграды из поглощающих материалов.

Наиболее сложна защита от γ -лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ -лучей является свинец. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита.

После аварии на Чернобыльской АЭС Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) приняты рекомендации по дополнительным мерам безопасности энергетических реакторов. Установлены более строгие регламенты работ персонала АЭС.

Аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011 г.) показали огромную опасность радиоактивных излучений. Все люди должны иметь представление об этой опасности и мерах защиты от нее.

**Вопросы**

1. Какие изменения могут быть у человека при воздействии радиоактивного излучения? Где используется радиоактивное излучение?
2. Какой процесс называется искусственной радиоактивностью? На какие группы подразделяются искусственные нестабильные радионуклиды?
3. Что называют поглощенной дозой излучения?
4. Каковы предельно безопасные нормы облучения для человека?
5. Что такое коэффициент качества? У каких лучей наивысший коэффициент качества?
6. Каким образом можно защититься от радиации?

**Задание (практическое исследование)**

1. В смартфон из приложения Play Market загрузите программу Radiation Counter, работающую на основе встроенного счетчика Гейгера. Изучите принцип действия и произведите измерения радиационного фона различных местностей.
2. Заполните данную таблицу.

Наименование величины	Обозначение	Формула	Определение	Единица измерения
Поглощенная доза излучения				
Экспозиционная доза излучения				
Эквивалентная доза поглощенного излучения				

**Задание (теоретическое исследование)**

Почему α -частицы, испускаемые радиоактивными препаратами, не могут вызывать ядерных реакций в тяжелых элементах? Результаты своих исследований оформите в виде реферата.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень В**

- 9.7.1. γ -излучение лучше всего поглощается свинцом (в 1,5 раза лучше стальной брони и в 22 раза лучше воды). Толщина слоя половинного ослабления γ -излучения для свинца равна 2 см. Какой толщины должен быть слой свинца, чтобы ослабить γ -излучение в 128 раз? (*Ответ: 14 см.*)
- 9.7.2. Средняя поглощенная доза излучения сотрудником, работающим с рентгеновской установкой, равна 7 мкГр за 1 ч. Опасна ли работа сотрудника

в течение 200 дней в году по 6 ч в день, если предельно допустимая доза облучения равна 50 мГр в год?

(*Ответ:* безопасно, так как поглощенная доза за год равна 8,4 мГр, что меньше предельно допустимой дозы.)

9.7.3. Мощность дозы γ -излучения радиоактивных изотопов в зоне заражения равна 200 мкГр/ч. Сколько часов человек может работать в этой зоне без вреда для здоровья, если в аварийной обстановке в качестве допустимой принята доза 25 мЗв? (*Ответ:* 125 часов.)

9.7.4. Человек массой 60 кг подвергался облучению в течение 12 ч. Какова мощность поглощенной дозы и энергия, поглощенная человеком за это время, если поглощенная доза излучения составила 35 мГр? (*Ответ:* 0,81 мкГр/с; 2,1 Дж.)

9.7.5. Студент предполагает использовать при работе с источником ^{90}Sr , имеющим активность 270 МБк и содержащимся в стеклянной пробирке, в качестве защиты только плотные перчатки. Не опасно ли это? Учтем, что на один акт распада ^{90}Sr приходится 1 фотон с энергией 1,74 МэВ; масса человека равна 70 кг; коэффициент пропускания равен 0,1; предельно допустимая доза: (ПДД) – 0,1 рад/неделю = $0,17 \cdot 10^{-6}$ рад/с. (*Ответ:* работать не опасно!) Докажите.

Уровень С

9.7.6. В установках для γ -облучения в сельском хозяйстве используется β -радиоактивный изотоп цезия $^{137}_{55}\text{Cs}$. Напишите реакцию β -распада. Найдите максимальную частоту γ -излучения, если наибольшая энергия γ -квантов равна 0,66 МэВ. Вычислите релятивистскую скорость β -частиц, если их энергия равна 1,18 МэВ. Учтем, что масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. (*Ответ:* $1,6 \cdot 10^{20}$ Гц; $2,85 \cdot 10^8$ м/с.)

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 9

- **Радиоактивностью** называют способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц.
- При **α -распаде** материнское ядро теряет положительный заряд $2e$ и его масса уменьшается на четыре атомные единицы массы. В результате кроме ядра гелия рождается еще одно новое дочернее ядро.
- При **β -распаде** материнское ядро увеличивает свой заряд на единицу, но его масса остается неизменной. В результате рождается новое дочернее ядро.
- **γ -излучение** не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады. Оно испускается дочерним ядром.
- **Закон радиоактивного распада:** $N = N_0 \cdot 2^{-t/T}$ или $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, где $\lambda = \ln 2/T$ – **постоянная распада**, T – **период полураспада**.



- **Атомное ядро** – это центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, называемых **нуклонами**.
- Ядра с одинаковыми Z , но разными A (т.е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$) называются **изотопами**.
- Ядра с одинаковыми A , но разными Z называются **изобарами**.
- Ядра с одинаковым количеством нейтронов называются **изотонами**.
- **Энергией связи** ядра называют энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны: $E_{св} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_x)c^2$.
- Разница между массой ядра и суммарной массой слагающих его протонов и нейтронов называется **дефектом масс**: $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_x$.
- **Удельной энергией связи** называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон: $E_{уд} = E_{св}/A$.
- **Ядерные реакции** – превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.
- Законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.
- **Энергетическим выходом ядерной реакции** называется разница энергии покоя ядер и частиц до реакции и после нее.
- **Цепная реакция деления** – ядерная реакция деления тяжелых ядер, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции.
- **Термоядерными** называются реакции слияния легких ядер при очень большой температуре.
- Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной реакции, называются **критическими размерами**.
- Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления цепной реакции, называется **критической массой**.
- **Поглощенной дозой излучения** называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}.$$

Глава 10

НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять физические свойства наноматериалов и способы их получения;
-  обсуждать сферы применения нанотехнологии.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
нанобөлшек	наночастица	nanoparticle
нанотехнология	нанотехнология	nanotechnology
наноматериалдар	наноматериалы	nanomaterials
графен	графен	graphene
нанотүтіктер	нанотрубки	nanotubes
фуллерен	фуллерен	fullerene
микролитография	микролитография	microlithography
нанороботтар	нанороботы	nanorobots
зондтық микроскопия	зондовая микроскопия	probe microscopy
сканерлеуші туннельдік микроскоп	сканирующий туннельный микроскоп	scanning tunneling microscope
атомдық-күштік микроскоп	атомно-силовой микроскоп	atomic force microscope

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «наночастица», «нанотехнология», «наноматериалы», «графен», «нанотрубки», «фуллерен», «микролитография», «нанороботы», «зондовая микроскопия», «сканирующий туннельный микроскоп», «атомно-силовой микроскоп».

§ 10.1

Нанотехнология и ее основные достижения

1. Область науки и техники, именуемая нанотехнологией, появилась сравнительно недавно. Перспективы этой науки поистине грандиозны. Термин «нано» происходит от греческого слова «нанос» (карлик) и соответствует одной миллиардной части международной единицы длины – метра, называемой *нанометром (нм)*, т.е. $1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

Частицу, размеры которой измеряются нанометрами, принято называть наночастицей.

Эти размеры схожи с размерами молекул и атомов. Область науки и техники, называемая *нанотехнологией*, манипулирует объектами, имеющими размеры от 1 до 100 нм, и создает из них так называемые *наноматериалы*. Стало известно, что в зависимости от величины частиц и так называемых *зёрен (микрористаллитов)*, которые входят в состав вещества и кристаллического тела, их свойства существенно изменяются. Такие эффекты появляются, когда средний размер зёрен в кристаллических телах не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зёрен менее 10 нм.

Техника манипуляции на уровне отдельных атомов и молекул называется нанотехнологией.

Таким образом, нанотехнология – это техника, оперирующая величинами порядка нанометра, сопоставимыми с размерами атомов. Поэтому переход от «микро» к «нано» – это уже не только *количественный*, но и *качественный* переход от манипуляции *веществом* к манипуляции *отдельными атомами*.

Первое историческое упоминание методов, которые впоследствии будут названы нанотехнологией, связывают с известным выступлением лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана «Там, внизу, много места» в 1959 году в Калифорнийском технологическом институте. Ричард Фейнман предположил, что возможно механически перемещать одиночные атомы с помощью манипулятора соответствующего размера, по крайней мере, такой процесс не противоречил бы известным на сегодняшний день физическим законам. Этот манипулятор он предложил делать следующим способом. Необходимо построить механизм, который создавал бы свою копию, только на порядок (т.е. в 10 раз) меньшую. Созданный меньший механизм должен опять создать свою копию, опять на порядок меньшую, и так до тех пор, пока размеры механизма не будут соизмеримы с размерами одного атома. Подобные *наномеханизмы (нанороботы)* смогут поатомной сборкой собирать и макровещи. Это позволит сделать вещи на порядок дешевле – таким нанороботам нужно будет дать только нужное количество молекул и энергию, написать программу для сборки необходимых предметов.

Термин «нанотехнология» впервые введен японским профессором Норио Тагигучи в его докладе «Основные принципы нанотехнологии» на международной конференции в Токио в 1974 году.

2. Различные предметы, состоящие из наночастиц и нанокристаллитов (зёрен), называют наноматериалами.

В 8 классе, рассматривая явления броуновского движения и диффузии частиц, вы узнали о том, что кристаллические тела состоят из отдельных микрокристаллитов, называемых *зёрнами*. Поликристаллические тела состоят из разноразмерных и различно ориентированных зёрен, тогда как монокристаллическое тело представляет собой большое монокристаллическое зерно, где кристаллические плоскости атомов имеют одну и ту же ориентацию.

К основным типам нанокристаллических материалов по размерности относятся: нульмерные (0 D) *нанокластеры*, например, молекулы *фуллерена* (рис. 10.1.1, а), из нульмерных кластеров создают такие разномерные наноматериалы, как одномерные (1 D) *волоконные материалы*, например, *нанотрубки* (рис. 10.1.1, б); двумерные (2 D) *пленки и многослойные материалы*, например, однослойный и многослойный *графены* (рис. 10.1.1, в); *трехмерные (3 D) поликристаллические материалы*, например, поликристаллическая медь (рис. 10.2.1, г), зёрна которых имеют сравнимые размеры во всех трех направлениях.

3. Разноразмерные малые кластеры являются промежуточным звеном между изолированными атомами и молекулами, с одной стороны, и массивным (объемным) твердым телом, с другой стороны. Переход от дискретного электронного энергетического спектра, свойственного отдельным атомам и молекулам, к зонному электронному энергетическому спектру, характерному для твердого тела, происходит через *кластеры*.

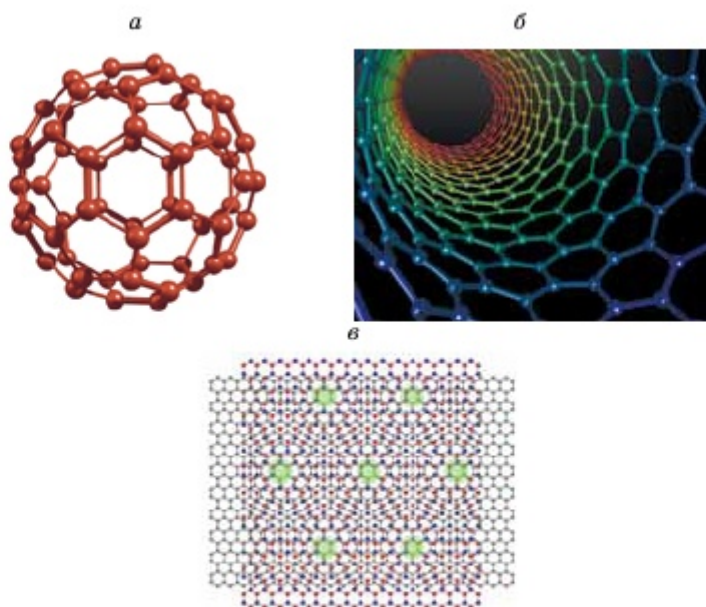


Рис. 10.1.1. Нанозлементы и наноматериалы:
а) молекула фуллерена; б) нанотрубка; в) графены

Фуллерен – стабильная молекула, на сферической поверхности которой в узлах 5- и 6-угольных многогранников расположены 60 атомов углерода.

Нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графенов. Эти объекты начиная с 1991 года начали привлекать внимание ученых. Оказалось, что прочность этих сверхлегких углеродистых трубок с примесью атомов других химических элементов превышает прочность стали в 60 раз, они выдерживают нагрев до 2500 градусов и давление в тысячи атмосфер. Эта прочность свойственна и изготовленным на их основе материалам. В электронике нанотрубки могут применяться и как хорошие проводники, и как полупроводники.

Графен – монослой атомов углерода, полученный в октябре 2004 года в Манчестерском университете. Многие ученые полагают, что этот невероятно прочный материал, обладающий также другими уникальными свойствами, в будущем станет основой микропроцессоров, вытеснив современные полупроводники.

Сверхпрочность нанотрубок и графенов объясняется тем, что все их атомы и молекулы, практически находясь на поверхности, получают доступ к непосредственному взаимодействию с атомами внешней среды. Действительно, при разделении вещества на атомарные наноразмерные частицы общая площадь поверхности таких частиц в веществе увеличивается в сотни раз, а вследствие этого усиливается взаимодействие почти каждого атома материала с атомами внешней среды, ведь теперь все атомы таких наноматериалов находятся на поверхности. Вот поэтому прочность нанопленок (графенов) и нанотрубок, атомы которых расположены в основном на поверхности, в разы больше прочности объемного массивного тела. Это явление уже используется во многих отраслях жизни. Например, в медицине применяется нанопорошок серебра, который обладает многократно усиленными антисептическими свойствами при его мизерном количестве. Наночастицы диоксида титана отталкивают грязь и позволяют создать самоочищающиеся поверхности и в быту, и в промышленности. Нанопорошок алюминия ускоряет сгорание твердого ракетного топлива. Новые литиевые ионные аккумуляторы, содержащие наночастицы, заряжаются буквально за пару минут, а не часами, как современные аккумуляторы. Такие быстро заряжающиеся аккумуляторы открывают грандиозную перспективу для развития экологически чистого вида транспорта, в частности электромобилей.

4. Наноматериалы классифицируются и по размерам зёрен, и по пространственной структуре. Поликристаллические сверхмелкозернистые материалы со средним размером зёрен менее 40 нм называют *нанокристаллическими*, а от 30 до 300 нм обычно называют *субмикросталлическими*. Кристаллические тела, средние размеры зёрен которых превышают 300 нм, называются *крупнозернистыми материалами*. Условная классификация нановеществ и материалов по размеру частиц и числу участвующих в них атомов показана в *таблице 10.1.1.*

Таблица 10.1.1

Нанозлементы и материалы	Размеры частиц (зёрен), пм, нм	Число атомов в частице (зерне)
Атомы и двух-, трехатомные молекулы	50–70 пм	1–3
Молекулярные кластеры (фуллерены и другие молекулы)	70 пм – 1 нм	4–70
Икосаэдрические металлические кластеры	1–7 нм	70 – 1500
Нанокристаллические материалы	7–70 нм	1500 – $1 \cdot 10^7$
Субмикроструктурные материалы	70–500 нм	$1 \cdot 10^7$ – $1 \cdot 10^9$
Крупнозернистые материалы	500 нм и выше	$1 \cdot 10^9$ и больше

5. Описанные выше нанозлементы и наноматериалы все чаще находят применение в различных областях технологии – от медицины до космических исследований. Так, например, ученые не первый год работают над проблемой доставки лекарственных препаратов непосредственно к клеткам, пораженным инфекцией или болезнью. На этом пути основным видом «транспорта», доставляющего лекарства размером 50–200 нанометров без потери, может стать наноробот. Последние успехи нанотехнологий, по словам ученых, могут оказаться весьма полезными в борьбе с раковыми заболеваниями. Разработано противораковое лекарство, доставляемое нанороботами непосредственно к цели – в клетки, пораженные злокачественной опухолью. Новая система «адресной» доставки лекарства основана на материале, известном как *биосиликон*. Такой силикон обладает пористой структурой (десять атомов в диаметре), в которую удобно внедрять лекарства, протеины и радионуклиды. Достигнув цели, биосиликон начинает распадаться, а доставленные им лекарства берутся за работу.

Нанотехнология и наноматериалы позволяют на два порядка (т.е. в 100 раз) снизить массу и габариты любых приборов, в том числе выводимых в космос. Например, прочность наноникеля в 6 раз выше, чем обычного никеля, что дает возможность при использовании его в ракетных двигателях уменьшить массу сопла на десятки процентов. Уменьшение массы космической техники решает

множество задач: продлевает срок нахождения аппарата в космосе, позволяет ему улететь дальше и унести на себе больше всякой полезной аппаратуры для проведения исследований. Сегодня космос – это не место экзотики, а в первую очередь показатель национальной безопасности и национальной конкурентоспособности любого государства. Именно развитие высокотехнологичных сложных наносистем в любой области общественной жизни и в космосе может обеспечить конкурентоспособность страны.

6. Применение легких двумерных нанослойных зеркал хорошо защищает от остропроникающих высокочастотных рентгеновских излучений, так как такие зеркала практически полностью отражают рентгеновские лучи, тогда как другие материалы пропускают их. Использование таких нанолинзеров в рентгеновских телескопах позволяет, с одной стороны, отражать и фокусировать рентгеновское излучение, поступающее из космоса с энергией до 35 кэВ, с другой – усиливать очень слабые сигналы отдаленных источников. Отражение коротковолновых лучей такими зеркалами объясняется тем, что толщина слоев зеркала сравнима с длиной волны рентгеновского излучения.

Применение нанослойных зеркал в рентгеновских телескопах позволило заглянуть глубже в недра Вселенной, в частности в центр нашей Галактики. И в самом деле, оптические телескопы не смогут улавливать сигналы глубинных космических объектов, так как электромагнитные волны видимого спектра света поглощаются межгалактическими и межзвездными газовыми облаками. Тогда как электромагнитные волны рентгеновского излучения продолжают путь во Вселенной, неся с собой огромные информации. Такая информация, например, недавно зарегистрирована рентгеновским телескопом «Чандра» из глубины нашей Галактики, отстоящей от нас на расстоянии 26 световых лет. Эта информация показала, что в центре Галактики происходят удивительные явления, сопровождающиеся расширением или сжатием звезд, поглощением одних звезд другими. В центральной части Галактики удалось идентифицировать более 1000 объектов, испускающих рентгеновские лучи, среди которых присутствуют черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. Среди обнаруженных объектов только 20 были известны ранее. Все эти успехи достигнуты благодаря использованию нанотехнологии и наноматериалов.



Вопросы

1. Каково краткое определение нанотехнологии, в чем заключается ее суть и смысл? Чьи труды послужили толчком для развития нанотехнологии?
2. Какие материалы называются наноматериалами? Каково типологическое название нанокристаллических материалов по размерности наноэлементов? *В чем заключается роль кластеров?
3. Какие объекты называются фуллереном, нанотрубкой и графеном? *На основе какого явления была объяснена сверхпрочность нанотрубок, графенов? Как это явление использовалось на практике?





4. Как классифицируются наноматериалы по размерам кристаллических зёрен?
5. Каковы основные достижения нанотехнологии в области науки, техники и производства?
6. Как можно объяснить преимущества рентгеновского телескопа, использующего нанослойные зеркала?

§ 10.2

Физические свойства наноматериалов и способы их получения

1. Из теории и практики стало известно, что свойства материалов претерпевают изменения в трех случаях. **Во-первых**, в физике для 7 класса, изучая строение твердых кристаллических тел, мы убедились в том, что в зависимости от *формы (конфигурации) кристаллической решетки* свойства одного и того же вещества могут быть совершенно разными. Действительно, три разных тела: уголь (графит), фуллерен и алмаз состоят из атомов одного и того же вещества – углерода. Однако их кристаллические решетки разнятся, вследствие чего они обладают совершенно разными свойствами. **Во-вторых**, было определено, что изменение свойств вещества зависит не только от конфигурации кристаллической решетки, но и от *величины размерности его структурных элементов (частиц, зёрен)*. **В-третьих**, *примесные атомы чужеродного химического элемента*, внедренные в молекулярные кластеры веществ, также разительно изменяют свойства как обычных, так и наноматериалов. Действительно, в зависимости от количества и рода примесных атомов углерода из железа можно получить булат (сталь), бронированный сплав или чугуны, свойства которых существенно отличаются друг от друга.

Нанотехнология позволяет нам, передвигая атомы и молекулы, создавать из них наноматериалы любого размера и любой конфигурации. Очевидно, такой поатомно созданный искусственный наноматериал или детали наномашин (рис. 10.2.1, а и б) будут обладать совершенно другими неизвестными нам свойствами. В этой связи в последние десятилетия исследовательский интерес к сверхмелкозернистым объемным телам и порошкообразным дисперсным материалам (рис. 10.2.1, в) существенно вырос. Как и ожидалось, было обнаружено (в первую очередь на металлах, рис. 10.2.1, г), что уменьшение размеров их структурных элементов (частиц, зёрен) ниже некоторой пороговой величины может привести к значительному изменению их свойств. Если говорить конкретно, то стало известно, что изменение свойств материалов появляется тогда, когда средний размер кристаллических зёрен не превышает 100 нм, и отчетливо наблюдается, когда размер зёрен менее 10 нм.

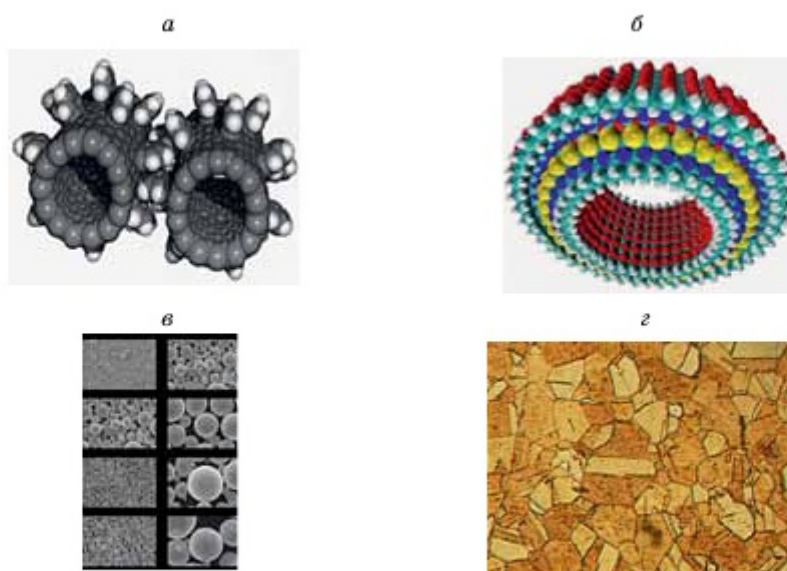


Рис. 10.2.1. а) наностеренки; б) наноподшипник; в) наночастицы (порошки); г) поликристаллическая (многозернистая) медь

2. Наноматериалы обладают удивительными свойствами. Так, например, результаты исследования показали, что одномерные углеродные нанотрубки (рис.10.1.1, б) по сравнению с обычными металлическими или полимерными трубками фантастически прочны и легки. Нульмерные наночастицы некоторых материалов имеют очень хорошие каталитические и адсорбционные свойства. Двумерные сверхтонкие нанопленки органических материалов, обладающих свойствами полупроводников, применяют для производства солнечных батарей. Такие батареи ценятся относительной дешевизной и гибкими механическими свойствами. Одним из замечательных свойств наноматериалов и наночастиц является то, что удастся их совместить с природными объектами наноразмеров, например, белками и нуклеиновыми кислотами, а также с другими биологическими клетками и органами. Тщательно очищенные наночастицы могут самовыстраиваться в определенные структуры. Такая структура содержит строго упорядоченные наночастицы, которая также проявляет необычайно важные свойства.

Экологически чистый двумерный графен (рис. 10.2.2, а), представляющий собой всего один слой атомов углерода, также отличается необычными свойствами. Нанопленки на основе графена прекрасно отталкивают воду и оберегают металл от коррозии, а также надежно очищают и защищают зубы (рис. 10.2.2, б) от разрушения. Такие материалы в отличие от соединений хрома, используемого в современном производстве, совершенно не токсичны и не требуют использования сильных кислот. Тончайшая пленка графена не пропускает воду; хорошо замедляет электрохимические реакции, окисляющие металлы (например, железо). Это

свойство графена используется в производстве высокотехнологичного «лака» для защиты поверхности различных изделий.

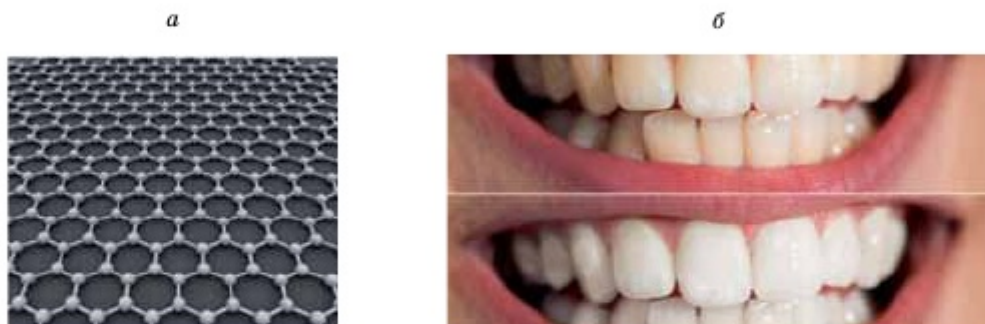


Рис. 10.2.2. а) нанопленка из графена б) «умная» нанопленка защищает зубы

3. Существуют различные методы и способы получения наноматериалов. В научной литературе *эти методы делятся на две группы.*

К первой группе относятся методы, используемые *для синтеза нанокристаллических порошков и изолированных наночастиц.* К ним относятся такие методы и способы, как *газофазовый синтез (конденсации паров), плазмохимический синтез, осаждение из коллоидных растворов, термическое разложение и восстановление, детонационный синтез и электровзрыв, самораспространяющийся высокотемпературный синтез* и другие.

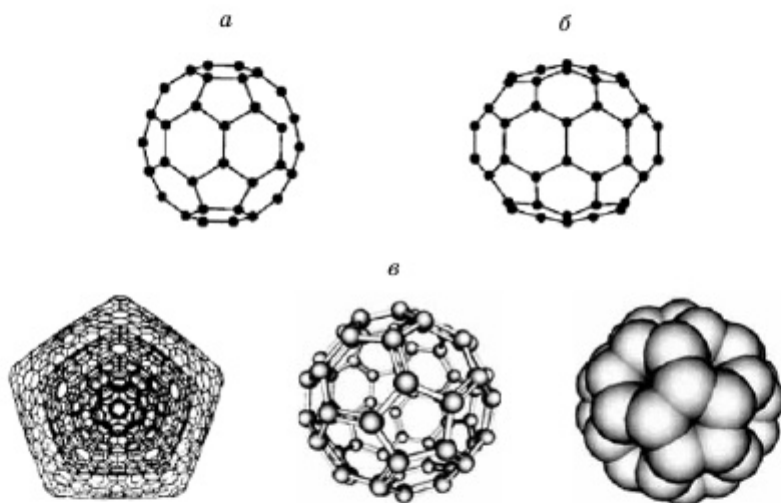
Ко второй группе относятся методы и способы, используемые *для получения компактных наноматериалов.* К ним относятся такие методы и способы, как *микролитография, плазменный электрический разряд, компактирование нанопорошков, осаждение на подложку, кристаллизация аморфных сплавов, интенсивная пластическая деформация, превращение беспорядок-порядок.*

В настоящее время из вышеуказанных методов и способов производственное применение получил только метод *микролитографии.* Этот метод позволяет получать на поверхности матриц плоские островковые объекты размером от 50 нм, используемые в электронике. Остальные методы пока еще служат в основном для сугубо научных исследовательских целей. Среди них наиболее перспективными считаются *методы ионного и молекулярного наслаивания,* поскольку с их помощью стали получать как монослойные, так и многослойные нанобъекты. Кроме того, для получения молекул фуллерена и других наноматериалов, созданных на их основе, стали широко применяться *методы плазменного электрического разряда* между графитовыми электродами.

В связи с тем, что многие физические и химические свойства наночастиц сильно зависят от их размера, в последние годы проявляется значительный интерес *к методам измерения размеров наночастиц.* К ним относятся такие методы, как *анализ траекторий наночастиц, электронно-микроскопический метод, ультразвуковые методы* и другие.

4. На примере фуллереновых молекулярных кластеров рассмотрим более подробно, как изменяются физические свойства наноматериалов в зависимости от способов их получения. Особое место среди наноструктурных молекулярных кластеров занимает новая модификация углерода – фуллерен, разительно отличающийся от графита и алмаза. За открытие фуллеренов Р. Кёрл, Х. Крото и Р. Смолли в 1996 году получили Нобелевскую премию в области химии.

Углеродные молекулы получают электродуговым распылением графита в атмосфере гелия при давлении газа около 10^4 Па. В молекуле фуллерена C_{60} (рис. 10.2.3, а) атомы углерода (их всего 60) располагаются в узлах 5- и 6-угольных многоугольников на полой сферической поверхности. Купола с такой конструкцией были применены американским архитектором Ричардом Бакминстером Фуллером при строительстве павильона США на всемирной выставке ЭКСПО-67 в Монреале. Новая модификация углеродной молекулы оказалась схожей с предложенной конструкцией Фуллера, которая в честь архитектора была названа фуллереном.



10.2.3. Фуллерены и фуллереноподобные молекулы

В результате горения дуги между двумя угольными электродами образуется сажа, которая конденсируется на холодной поверхности. Собранный сажа обрабатывается в кипящем толуоле или бензоле. После выпаривания раствора остается черный конденсат, который примерно на 10–15% состоит из смеси фуллеренов с 60 атомами углерода (C_{60}) и 70 атомами углерода (C_{70}). Первая молекула фуллерена C_{60} (рис. 10.2.3, а) имеет форму футбольного мяча, а вторая модифицированная молекула фуллерена C_{70} (рис. 10.2.3, б) имеет форму бейсбольного мяча. Существуют и другие конструкции фуллеренов (рис. 10.2.3, в).

5. Центральное место среди фуллеренов принадлежит молекуле C_{60} (рис. 10.2.3, а), имеющей наиболее высокую симметрию и, как следствие, наибольшую стабильность. Диаметр молекулы C_{60} составляет около 0,7 нм. При кристаллизации C_{60}

из раствора или газовой фазы его молекулы образуют гранецентрированный кристалл (ГЦК) с параметром решетки 1,417 нм. Такой твердотельный фуллерен называют *фуллеритом*.

Фуллериты обладают необычными свойствами. Так, например, кристаллические фуллериты представляют *полупроводники* с высокой фотопроводимостью. Если их диффузионно легировать атомами щелочных металлов, то они становятся *проводниками* и переходят в *сверхпроводящее состояние* при температуре 30 К и выше. Кристаллический фуллерит превращается в *алмаз* даже при комнатной температуре при давлении 20 ГПа, а при нагреве до температуры 1500 К для перехода в алмаз достаточно давления 7 ГПа. Для сравнения: обычный графит превращается в алмаз только при давлении 30–50 ГПа и температуре не ниже 900 К.

6. Как показали результаты недавно проведенных исследований, полимеризованный фуллерен с примесью атомов химического элемента родий (Rh-C_{60}) представляет собой ромбоэдрическую структуру и при комнатной температуре обнаруживает ферромагнитные свойства. Магнитные свойства такой углеродистой структуры с фуллереноподобными молекулами характеризуются типичной кривой гистерезиса, как и для ферромагнетиков. При нагреве и деполимеризации кристалл Rh-C_{60} теряет ферромагнитные свойства, соответствующая температура Кюри составляет 500 К.

В 2001 году учеными была получена фуллереноподобная форма молекулы $\text{C}_{48}\text{N}_{12}$ (рис. 10.2.3, в), в которой по сравнению с обычным фуллереном C_{60} пятая часть атомов углерода замещена атомами азота. Если в кристаллах фуллерена молекулы C_{60} объединяются слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, то наличие атомов азота приводит к появлению сильных ковалентных связей. По этой причине фуллереноподобный кристаллический материал $\text{C}_{48}\text{N}_{12}$ обладает уникальным сочетанием прочности и эластичности.

Фуллереновые кластеры, каждая молекула которых содержит менее 60 атомов углерода, менее стабильны.

Однако теоретически доказано: если заменить определенную часть атомов углерода атомами других металлов (например, титана, меди и т.д.), то стабильность углеродистых молекул резко повышается. Поиски таких молекулярных кластеров в 1992 году увенчались открытием нового необычного стабильного положительно заряженного кластера $\text{Ti}_8\text{C}_{12}^+$. В этой молекуле все 20 атомов титана и углерода расположены на сферической поверхности, состоящей из двенадцати пятиугольников, в углах каждого пятиугольника расположены два атома титана и три атома углерода.

Нанокластеры Ti_8C_{12} были получены методом плазмохимического газофазного синтеза. В качестве инертного газа использовали гелий; реагентами являлись углеводороды (метан, этилен, ацетилен и др.), а также пары титана. Давление газовой смеси в реакторе составляло 93 Па (0,7 мм рт. ст.). Для испарения вращающегося металлического прутка титана и создания ионизированного пучка паров металла использовали сфокусированное излучение лазера с длиной

волны 532 нм. Нейтральные и ионизированные кластеры выделяли из продуктов реакции и анализировали с помощью масс-спектрометра. В масс-спектрах продуктов реакции обнаруживался резкий пик, соответствующий молекуле Ti_8C_{12} . Наряду с нейтральными молекулами Ti_8C_{12} в смеси ионизированных газов обнаружили и стабильные ионы $Ti_8C_{12}^+$.



Вопросы

1. Как можно объяснить столь разительные свойства материалов, состоящих из атомов одного и того же вещества (химического элемента)? Чем вызван исследовательский интерес к наноструктурным материалам?
2. Какими отличительными свойствами обладают наночастицы, нанотрубки и нанопленки по сравнению с обычными материалами?
3. Какие методы и способы существуют для получения наноматериалов? Как они группируются?
4. Когда и какие ученые открыли углеродные кластеры? Какую роль играют углеродные кластеры в создании наноматериалов?
5. Какие существуют модификации углеродных кластеров, почему они названы фуллереном и фуллеритом? Чем они отличаются?
6. Какие молекулярные кластеры относятся к фуллереноподобным молекулам, какими способами их получают? Каковы их отличительные свойства?



§ 10.3

Перспективы развития наноматериалов и их проблемы

1. Три группы технологий обеспечивают научно-технический прогресс первой половины XXI века. Это: *1) электроника с компьютерной технологией; 2) биотехнология и 3) нанотехнология*. По прогнозам, развитие электроники с компьютерной технологией достигнет своего максимума к 2035 году; вклад биотехнологии, зародившейся в 1968–1973 гг., станет наибольшим в период 2025–2035 гг.; а нанотехнология станет основной движущей силой научно-технического развития в 2045–2055 гг.

Многие идеи, связанные с нанотехнологией и наноматериалами, находятся сейчас не только на стадии разработок, но и на этапе практического применения. Ожидается, что уже в 2025 году появятся первые так называемые *роботизированные ассемблеры*, созданные на основе нанотехнологий. Теоретически они будут способны конструировать из готовых атомов любой предмет. Для этого достаточно будет спроектировать на компьютере любой продукт, и он будет собран и размножен сборочным комплексом нанороботов.

2. Создаваемые нанообъекты постоянно удивляют исследователей своими новыми свойствами и обещают самые неожиданные перспективы своего

применения. В этой связи растет энтузиазм ученых по поводу приближения эры воплощения самых фантастических идей. Действительно, уникальные свойства наноматериалов нашли применение уже во многих областях науки, техники и производства. В качестве примера приводим следующие сведения.

Легкоочищаемые наноматериалы находят применение в быту, архитектуре, молочной и пищевой промышленности, транспортной индустрии, санитарии. В этих целях *налаживается производство самоочищающихся стекол, больничного инвентаря и инструментов, антиплесневого покрытия, легко очищающихся различных керамик и бытовых посуды.*

Оптика как одна из сфер применения нанотехнологии включает в себя электрохромистику и производство оптических линз, в рамках которых стали развиваться такие новые направления, как *фотохромная оптика, легкоочищаемая оптика и просветленная оптика.*

Применение нанотехнологии в керамическом производстве дает возможность получения высокого качества печатных паст, пигментов, нанопорошков, микрочастиц, мембран.

Компьютерная техника и электроника, став главной площадкой нанотехнологии, даст развитие электронике, наносенсорам, бытовым микрокомпьютерам, средствам визуализации и преобразователям энергии; беспроводным коммуникациям, квантовым и другим нанотехнологичным компьютерам. Именно в области электроники уже в 90-х годах XX века были получены первые результаты по перемещению одиночных атомов, разработаны и изготовлены первые наноэлектронные элементы, из которых осуществляется сборки определенных конструкций. А с 2010 года осуществляется производство наноэлектронных «запоминающих» чипов (устройств) емкостью в десятки гигабайт.

В области медицины в результате применения наноматериалов стали развиваться производство «умных» протезов и прецизионных инструментов, *наокапсул, диагностических нанозондов, имплантатов, фармацевтика направленного действия.*

Для космоса также открывается гигантская перспектива развития механоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе нанотехнологии и наноматериалов. Для космического комплекса будут создаваться надежно и качественно функционирующие спутники и наноприборы уменьшенной массы до 20 килограммов. Соответственно, могут быть снижены материальные и финансовые затраты.

3. Когда речь идет о проблемах и перспективе развития наноматериалов, обращают внимание на следующие три основных направления: 1) изготовление электронных схем (в том числе и объемных) с активными элементами, размеры которых сравнимы с размерами молекул и атомов; 2) непосредственная манипуляция атомами и молекулами и сборка из них новых материалов, конструкций и устройств; 3) разработка и изготовление наномашин, то есть механизмов и роботов размером с молекулу. Среди них самой главной проблемой считается создание первого **наноробота** и **наномашин** (общее название – **нанобот**) для работы на нанофабриках, выпускающих востребуемые наноматериалы и нано-

продукты. Для достижения этих целей человечеству необходимо решить три основных вопроса:

- 1) разработать и создать нанороботов, которые смогут ремонтировать молекулы;
- 2) разработать и создать нанокomпьютеры, которые будут управлять нанороботами и другими наномашинами;
- 3) создать полное описание всех молекул в теле человека; таким образом, иметь карту всех человеческих органов на атомном уровне, для того чтобы лечить или заменить их в случае преждевременного «изнашивания».

Неутомимыми тружениками будут «умные» нанороботы.

Нанороботом называется робот, созданный из наноэлементов молекулярного размера, который обладает функциями двигать отдельные атомы, обрабатывать молекулы, передавать информацию, исполнять компьютерные программы.

Нанороботы, способные к созданию своих копий, то есть к самовоспроизводству, называются репликаторами. Такие репликаторы смогут производить пищу, «освободив» от этого растения и животных. К примеру, теоретически возможно производить качественное молоко прямо из травы, собранной из атомов, минуя промежуточное звено – корову. Таким образом, в грядущей эпохе предметы потребления и пищевые продукты будут произведены «умными» репликаторами как на родной Земле, так и на далеких планетах. Именно такие «умные» наномашинны и нанороботы способны воплотить сакральную мечту человеческого рода обживать и иные планеты, о которой еще Бухар-жырау три века тому назад говорил: «Не иссякнет мечта человеческого рода даже тогда, когда он, оседлав лунный свет, будет путешествовать среди звезд». Действительно, не так уж далек тот день, когда «умные» роботы начнут автоматическое строительство любых объектов как на Земле, так и в космосе (эксперты прогнозируют, что роботы смогут приступить к такой работе уже в 2025 г.).

4. Исследовательские работы по изучению наноботов начаты недавно, но темпы новых открытий в этом направлении чрезвычайно высоки; многие ученые полагают, что результаты этих исследований определяют грядущее будущее нанотехнологии и наноматериалов. В этих исследованиях одна из основных проблем сводится к разработке и созданию таких важных частей нанороботов, как **молекулярные роторы, молекулярные пропеллеры и молекулярные шестерни** (рис. 10.2.1, а), размеры которых могут быть на порядок меньше, чем размеры самого наноробота.

Молекулярные роторы представляют собой синтетические наноразмерные двигатели, способные генерировать крутящий момент при приложении к ним достаточного количества энергии.

Молекулярные пропеллеры – это наноразмерные молекулы в форме винта, способные совершать вращательные движения благодаря своей специальной форме, аналогичной форме макроскопического винта.

5. Ученые и конструкторы грядущую перспективу применения «умных» молекулярных роботов связывают с технологической модернизацией сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов. Создание сканирующего

туннельного микроскопа в 1980 году и несколько позже *атомно-силового микроскопа* позволило ученым не только различать отдельные атомы, но и собирать из них новые конструкции. Создателями этих микроскопов являются Герд Бинниг и Генрих Рорер (рис. 10.3.1). В 1986 году они были удостоены Нобелевской премии за создание сканирующего туннельного микроскопа.

Сканирующую туннельную и атомно-силовую микроскопию часто объединяют, используя такое понятие, как *зондовая микроскопия*.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) – это микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины туннельного тока электронов между атомами зонда и токопроводящего образца (рис. 10.3.2).

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) – это микроскоп для исследования также нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины ван-дер-ваальсовой силы взаимодействий между атомами образца и зонда.



Рис. 10.3.1. Герд Бинниг и Генрих Рорер с моделью первого СТМ

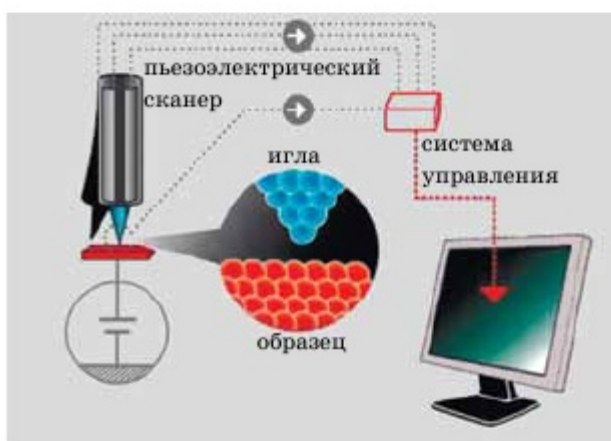


Рис. 10.3.2. Схема устройства сканерно-туннельного микроскопа

Зондовая микроскопия – это совокупность методов определения с помощью различных наноразмерных микрозондов механических, электрических, магнитных и других свойств на локальном (точечном) участке исследуемой поверхности. При зондовой микроскопии зонд (игла) подводится к исследуемому образцу на расстояние нескольких нанометров (рис. 10.3.2).

В зависимости от природы регистрируемого сигнала различают сканирующую туннельную микроскопию (сигналом служит регистрируемая величина туннельного тока) и атомно-силовую микроскопию (сигналом служит регистрируемая величина ван-дер-ваальсовой силы). Сканирующий туннельный микроскоп используется для исследования электропроводящей поверхности, а атомно-силовой микроскоп применим как для проводящих, так и для непроводящих объектов.

6. В заключение главы следует отметить, что невозможно переоценить *качественные изменения*, которые нанотехнологии принесут обществу.

Получение наночастиц и наноматериалов, изучение их строения и свойств, разработка методов манипулирования нанообъектами, применение наноматериалов и приборов в различных системах – все это выходит за пределы какой-либо одной науки, будь то физика или химия. Наука о наноструктурированном состоянии веществ является комплексной дисциплиной, использующей приемы и методы без исключения всех известных наук. Комплексная наука о нанотехнологии и материалах кардинально изменит и перестроит почти все отрасли промышленности в будущем; приведет к новой научно-технической и промышленной революции, изменит представления людей о природе, повысит качество жизни.

Нанотехнология, интегрируясь с другими передовыми технологиями, может совершить настоящие чудеса даже в области музыки, литературы, балета, театра, архитектуры, которые всегда стояли несколько особняком от научно-технического прогресса. Так, например, в 2001 году японские ученые, используя передовые лазерные технологии, создали самую маленькую в мире скульптуру, представляющую собой разъяренного быка, разворачивающегося для атаки. Размеры «микробыка» впечатляют: 10 мкм в длину и 7 мкм в высоту – не больше, чем у красных кровяных телец человеческой крови. Увидеть его можно только в сверхмощный микроскоп.



Вопросы

1. Какие технологии обеспечивают научно-технический прогресс первой половины XXI века?
2. В каких перспективных областях науки, техники и производства начали применяться наноматериалы?
3. Какие направления развития нанотехнологии считаются наиболее перспективными? Какие задачи следует решать в этих направлениях?
4. Какая задача является наиболее сложной проблемой? Какие устройства называются нанороботом, нанорепликатором и наноботом?
5. Какова роль зондовой микроскопии в решении основной проблемы нанотехнологии? На каких физических явлениях основываются принципы работы сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов?
6. Почему нанотехнологию называют комплексной междисциплинарной наукой?



Задание (теоретическое исследование)

Напишите краткий реферат на одну из следующих проектных тем:

- 1) «Я стану специалистом по нанотехнологиям»;
- 2) «Поразившие меня свойства наноматериалов»;
- 3) «Наиболее интересные аспекты нанотехнологии и наноматериалов».












КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 10

- **Наночастица** – схожая с молекулой частица, размеры которой измеряются нанометрами.
- **Нанотехнология** – техника манипуляции на уровне отдельных атомов и молекул.
- **Наноматериалы** – различные предметы, состоящие из наночастиц и нанозлементов (кристаллитов, зёрен).
- **Графен** – монослой атомов углерода.
- **Нанотрубки** – протяженные цилиндрические структуры, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графенов.
- **Фуллерен** – стабильная молекула сферической формы, состоящая из 60 атомов углерода.
- **Микролитография** – наиболее распространенный в электронике метод нанотехнологии.
- **Наноробот** – это робот, созданный из наноматериалов, размером, сопоставимым с молекулой; он обладает функциями движения, обработки, передачи информации и исполнения программ.
- **Зондовая микроскопия** – это совокупность методов определения с помощью различных наноразмерных микрозондов механических, электрических, магнитных и других свойств на локальном участке исследуемой поверхности.
- **Сканирующий туннельный микроскоп** – микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины электронного тока между атомами зонда и токопроводящего образца.
- **Атомно-силовой микроскоп** – микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины ван-дер-ваальсовой силы взаимодействий между атомами образца и зонда.

Глава 11

КОСМОЛОГИЯ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  описывать главные спектральные классы звезд;
-  различать понятия «видимая звездная величина» и «абсолютная звездная величина»;
-  использовать формулы для определения видимой и абсолютной звездных величин;
-  использовать законы Стефана – Больцмана и Вина для характеристики излучения Солнца;
-  использовать диаграмму Герцшпрунга – Рассела для объяснения эволюции звезд;
-  описывать свойства сверхновых звезд, нейтронных звезд и черных дыр;
-  описывать использование метода стандартной свечи для определения расстояний;
-  обсуждать споры вокруг ускорения Вселенной и темной энергии;
-  обсуждать гипотезы о расширении Вселенной, основываясь на данных астрономических наблюдений;
-  уметь оценивать возраст Вселенной, используя закон Хаббла;
-  объяснять теорию Большого Взрыва, используя данные о микроволновом фоновом излучении.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
жұлдыз	звезда	star
жылдық параллакс	годовой параллакс	annual parallax
Күн	Солнце	Sun

фотосфера	фотосфера	photosphere
Күн жүйесі	Солнечная система	Solar system
планета	планета	planet
галактика	галактика	galaxy
квazar	квazar	quasar
Метагалактика	Метагалактика	Metagalaxy
Үлкен Жарылыс	Большой Взрыв	Big Bang
қараңғы материя	темная материя	dark matter
қараңғы энергия	темная энергия	dark energy
реликттік сәулелену	реликтовое излучение	relict radiation
орбиталық станция	орбитальная станция	orbital station

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «звезда», «годовой параллакс», «Солнце», «фотосфера», «Солнечная система», «планета», «галактика», «квazar», «Метагалактика», «Большой Взрыв», «темная материя», «темная энергия», «реликтовое излучение», «орбитальная станция».

§ 11.1

Мир звезд. Расстояние до звезд

1. Звезда – это массивное шарообразное плазменное образование, излучающее свет и тепло в результате протекания термоядерных реакций синтеза в его недрах.

Звезды различают по температуре, цвету и спектральному классу.

Последовательность спектральных классов (одновременно и цветовая) обозначается заглавными буквами латинского алфавита: O, B, A, F, G, K, M. Тонкие различия внутри каждого класса дополнительно подразделяют на 10 подклассов – от 0 (самые горячие) до 9 (самые холодные). Например, Солнце принадлежит к спектральному классу G2. В таблице 11.1.1 приведены примеры звезд каждого класса, их цвет, температура и в каком созвездии они располагаются.

Таблица 11.1.1

Характеристики некоторых звезд

Спектральный класс	Цвет	Температура	Пример	Созвездие
O	голубой	30 000 К	Беллатрикс	Орион
B	бело-голубой	20 000 К	Регул	Лев
A	белый	10 000 К	Сириус	Большой Пес
F	желто-белый	8 000 К	Альгаир	Орел
G	желтый	6 000 К	Солнце	–
K	оранжевый	5 000 К	Альдебаран	Телец
M	красный	3 500 К	Бетельгейзе	Орион

В спектрах холодных звезд имеются полосы *поглощения молекул*, при более высоких температурах – линии поглощения нейтральных атомов. Спектр Солнца указывает на наличие *ионизированных металлов*. У более горячих звезд увеличивается интенсивность линий *ионизированного водорода*, а у самых горячих – *ионизированного гелия*.

Температуру звезд определяют по их спектру (по интенсивности разных линий в их спектрах, по распределению энергии в их непрерывном спектре и даже по цвету звезды). Поскольку наблюдаемые нами спектр и свет звезд производятся их внешними газоплазменными слоями, то и определяемая температура, химический состав относятся только к этим слоям звезд. Температура внутри звезд вычисляется путем сложных теоретических расчетов – она достигает многих миллионов градусов.

2. Светимостью звезды (L) называется полная световая энергия, излучаемая ею за одну секунду.

Светимость можно выражать в ваттах, но чаще ее выражают в светимости Солнца, которая составляет $3,85 \cdot 10^{26}$ Вт.

Видимая звездная величина (m) – характеристика звезды, показывающая, сколько света приходит от нее в точку, где находится наблюдатель.

Видимый блеск звезд зависит не только от истинного излучения, но и от расстояния до Земли.

Видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк, называется **абсолютной звездной величиной (M)**:

$$M = m + 5 - 5 \lg r, \quad (11.1)$$

где m – видимая звездная величина; r – расстояние до звезды в парсеках.

Абсолютная звездная величина Солнца $M_c = +4,8^m$, это означает, что со стандартного расстояния 10 пк Солнце выглядит слабой звездочкой почти 5-й звездной величины (*видимая звездная величина Солнца* равна -27^m).

Светимость и звездные величины какой-либо звезды и Солнца связаны отношением:

$$\frac{L}{L_c} = 2,512^{M_c - M}. \quad (11.2)$$

Принимая светимость Солнца $L_c = 1$, получаем $L = 2,512^{M_c - M}$.

Мощность излучения звезд-сверхгигантов ($M = -9^m$) в 330 тыс. раз больше излучения мощности Солнца, а неярких звезд ($M = 19^m$) – в 480 тыс. раз слабее.

В спектре излучения нагретого тела встречается большой диапазон длин волн. Но чем выше температура тела, тем на более короткую длину волны приходится максимум интенсивности его излучения. Математически это выражается **законом смещения Вина**:

$$\lambda_{max} T = b,$$

где $b \approx 2,89 \cdot 10^{-3}$ м · К – постоянная Вина. Максимум солнечного излучения приходится на длину волны 480 нм (поэтому его температура составляет 6000 К).

От температуры зависит и мощность излучения **по закону Стефана – Больцмана**:

$$\varepsilon = \sigma \cdot T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана. Зная постоянную энергию, приходящую от звезды, можно определить ее температуру.

Радиусы звезд вычисляются по их светимости и температуре. Используя закон Стефана – Больцмана, можно записать формулы полной светимости для какой-либо звезды и для Солнца:

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

$$L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma T_\odot^4,$$

где L и L_\odot ; R и R_\odot ; T и T_\odot – светимости, линейные размеры, абсолютные температуры звезды и Солнца соответственно. Приняв $L_\odot = 1$, $R_\odot = 1$ и преобразовав два предыдущих выражения путем деления их друг на друга, получим:

$$L = R^2 \frac{T^4}{T_\odot^4}, \text{ откуда находим радиус звезды:}$$

$$R = \sqrt{L} \left(\frac{T_\odot}{T} \right)^2. \quad (11.3)$$

3. Доказательством обращения Земли вокруг Солнца служит параллактическое смещение звезд.

Угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты $a = 1$ а. е., перпендикулярный лучу зрения, называется *годовым параллаксом* π (рис. 11.1.1).

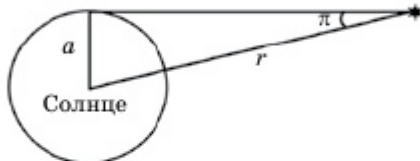


Рис. 11.1.1. Определение расстояния r до звезды

Годичный параллакс определяют с точностью до $0,01''$, фотографируя одни и те же участки звездного неба с промежутком в полгода.

Для удобства при определении расстояний до звезд принимают следующие единицы измерения:

1) *астрономическая единица* – среднее расстояние от Земли до Солнца;

$$1 \text{ а. е.} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ м.}$$

2) *парсек* (параллакс, секунда) – расстояние, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом $1''$;

$$1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,26 \text{ св. года} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$

3) *световой год* – расстояние, которое свет проходит за один земной год;

$$1 \text{ св. год} = 0,3069 \text{ пк} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. е.}$$

Определим *расстояние r до звезды в парсеках* (рис. 11.1.1):

$$r = \frac{a}{\sin \pi}, \text{ т.к. } \sin 1'' = \frac{1}{206\,265}, \text{ то для очень малого угла } \pi'' \text{ получим:}$$

$$r = \frac{206\,265}{\pi''} \text{ а. е.} = \frac{1}{\pi''} \text{ пк.} \quad (11.4)$$

4. Расстояние до ближайшей к Солнечной системе звезды Проксима Центавра равно 4,24 св. года (автомобиль со скоростью 100 км/ч без остановок пройдет это расстояние за 40 млн лет).

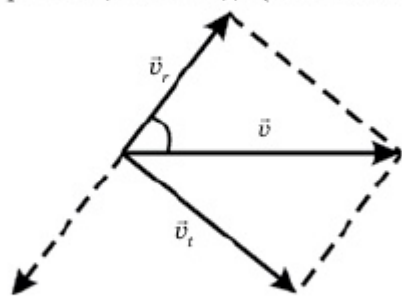


Рис. 11.1.2. Определение тангенциальной v_t скорости собственного движения звезды

Угловые перемещения звезд на небе называют *собственными движениями*. Зная их расстояния до звезд, можно определить *тангенциальные скорости* (рис. 11.1.2):

$$v_t = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \text{ км/с,} \quad (11.5)$$

где μ – собственное движение – видимое угловое смещение звезды на небесной сфере за один год; π – годичный параллакс.

Измеряя смещения спектральных линий $\Delta\lambda$, можно определить *лучевые скорости* звезд:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c. \quad (11.6)$$

Пространственные скорости звезд определяются по формуле:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}. \quad (11.7)$$

Скорости звезд составляют десятки километров в секунду. Наибольшую из измеренных скоростей имеет слабая звезда в созвездии Голубя. Некоторые группы звезд (например, Гиады) движутся параллельно с одинаковыми скоростями, будучи связаны взаимным тяготением и общностью происхождения. Кроме того, звезды вращаются вокруг центра Галактики. Почти каждая звезда имеет собственную скорость. Солнце движется со скоростью 19,4 км/с по отношению к соседним звездам, в направлении созвездия Геркулеса, к точке с координатами на небесной сфере $\alpha = 270^\circ$; $\delta = +30'$, называемой *апексом*.

Несмотря на быстрое движение звезд, их видимые места на небе меняются крайне медленно. За время существования нашей цивилизации на Земле созвездия значительно не изменили своих очертаний.



Вопросы

1. Что представляет собой звезда? По каким параметрам их различают? Какие сведения можно извлечь из спектров звезд?
2. Какими величинами характеризуются звезды? Как их формулируют и определяют?
3. Для каких целей используют закон смещения Вина и закон Стефана – Больцмана?
4. Как определяют радиус звезды?
5. Как определить расстояния до звезды? Какие единицы используют при определении расстояний до звезд? Что является базисом при определении годичного параллакса звезды?
6. Как определяют абсолютную звездную величину, зная параллакс звезды? Как взаимосвязаны собственное движение звезды и ее тангенциальная, лучевая и пространственная скорости?



Задание (экспериментальное исследование)

Расположите в порядке возрастания температуры атмосферы звёзды спектральных классов: F3, G2, K0, A5, B8.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Годичные параллаксы звезд Гемма (α Северной Короны) и Садр (γ Лебеда) равны соответственно $\pi_1 = 0,044''$ и $\pi_2 = 0,004''$, а их видимые звездные

величины одинаковы: $m_1 = m_2 = 2,23''$. Каковы расстояния r_1 и r_2 до этих звезд в парсеках? У какой звезды светимость больше и во сколько раз? Каковы абсолютные звездные величины M_1 и M_2 Геммы и Садра? Межзвездным поглощением света пренебречь.

Дано:

$$\pi_1 = 0,044''$$

$$\pi_2 = 0,004''$$

$$m_1 = m_2 = 2,23''$$

$$r_1 - ?$$

$$r_2 - ?$$

$$\frac{L_2}{L_1} - ?$$

$$M_1 - ?$$

$$M_2 - ?$$

Решение:

Расстояния соответственно равны:

$$r_1 = \frac{1}{\pi_1}; r_2 = \frac{1}{\pi_2}.$$

Абсолютные звездные величины Геммы и Садра соответственно равны:

$$M_1 = m_1 + 5 - 5 \lg r_1, \quad M_2 = m_2 + 5 - 5 \lg r_2.$$

Отношение светимости звезд можно найти из следующего выражения:

$$\frac{L_2}{L_1} = 2,512^{M_1 - M_2}.$$

Произведем вычисления:

$$r_1 = \frac{1}{0,044} = 23 \text{ пк}; \quad r_2 = \frac{1}{0,004} = 250 \text{ пк}.$$

$$M_1 = 2,23 + 5 - 5 \lg 23 = 0,42; \quad M_2 = 2,23 + 5 - 5 \lg 250 = -4,76.$$

$$\frac{L_2}{L_1} = 2,512^{0,42 - (-4,76)} = 2,512^{5,18} = 118.$$

Ответ: $r_1 = 23$ пк; $r_2 = 250$ пк;

$$M_1 = 0,42; \quad M_2 = -4,76; \quad \frac{L_2}{L_1} = 118.$$



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 11.1.1. Параллакс звезды равен $0,01''$, ее видимая звездная величина $+10^m$. Какова ее абсолютная звездная величина? (Ответ: 5^m .)
- 11.1.2. Со звезды Капелла большая полуось земной орбиты, перпендикулярная лучу зрения, видна под углом $0,07''$. Параллакс звезды Процион равен $0,28''$. Какая из этих звезд дальше от нас и во сколько раз? (Ответ: Капелла дальше Проиона в 4 раза.)
- 11.1.3. Параллакс звезды равен $0,5''$. Определите, во сколько раз она дальше от нас, чем Солнце. (Ответ: в $4,1 \cdot 10^5$ раз.)
- 11.1.4. Параллакс Альтаира равен $0,20''$. Расстояние до Веги 29 св. лет. Какая

из этих звезд дальше от нас и во сколько раз? (*Ответ: Вега дальше Альтаира почти в 2 раза.*)

- 11.1.5. Звезда движется в пространстве со скоростью 50 км/с в сторону наблюдателя под углом 30° к лучу зрения. Чему равны модули лучевой и тангенциальной составляющих скорости звезды? (*Ответ: 43,3 км/с; 25 км/с.*)
- 11.1.6. Определите пространственную скорость звезды, если ее лучевая скорость равна 27 км/с, а тангенциальная – 31 км/с. (*Ответ: 41 км/с.*)

Уровень В

- 11.1.7. Звезда Тубан расположена в «голове» созвездия Дракон вблизи Северного полюса эклиптики, а Регул – «звезда царей» – почти на эклиптике. Как изменяются лучевые скорости этих звезд в течение года для земного наблюдателя? Лучевая скорость – проекция относительной скорости звезды на луч зрения наблюдателя. (*Ответ: у Тубана лучевая скорость не испытывает колебаний; у Регула лучевая скорость в конце ноября уменьшается на 30 км/с, а в мае – увеличивается на 30 км/с.*) Докажите.
- 11.1.8. Во сколько раз звезда Арктур (α Волопаса) ярче звезд α Андромеды и η Девы, если визуальный блеск Арктура равен $+0,24^m$, а блеск остальных звезд соответственно равен $+2,15^m$ и $+4^m$? (*Ответ: ≈ 6 и 32 .*)
- 11.1.9. Во сколько раз звезды ϵ Лебеда и γ Водолея слабее Сириуса (α Большого Пса), если их визуальный блеск соответственно равен $+2,64^m$; $+3,97^m$ и $-1,58^m$? (*Ответ: ≈ 49 и 166 .*)
- 11.1.10. Во сколько раз меняется блеск Марса, если его видимая визуальная звездная величина колеблется в пределах от $+2^m$ до $-2,6^m$? (*Ответ: ≈ 69 .*)

§ 11.2

Эволюция звезд. Переменные звезды

1. По современным представлениям, звезды образуются в результате гравитационного сжатия вещества межзвездной среды. Гигантский (размером около 100 пк) комплекс сжимается, уплотняется, распадается на сгустки (протозвезды), которые продолжают сжиматься. Температура сгустков повышается, и, когда она достигает 10 млн градусов, начинаются термоядерные реакции, в результате чего зажигается звезда и сжатие прекращается, так как гравитационной силе сжатия противостоит сила давления излучения термоядерного синтеза. В ходе термоядерных реакций водород превращается в гелий, при этом выделяется энергия. Солнце исчерпает свой запас водорода примерно за 10 млрд лет. Зависимость продолжительности жизни звезды от ее массы можно проанализировать из таблицы, данной в *Приложении*.

По мере того как водородное топливо в солнечном ядре будет выгорать, его внешняя оболочка станет расширяться, а ядро – сжиматься и нагреваться.

Когда водород внутри ядра израсходуется, термоядерные реакции будут продолжаться в тонком внешнем слое ядра. Солнце будет расширяться и через 4,6 млрд лет от настоящего времени станет **красным гигантом** (рис. 11.2.1). Масса Солнца недостаточна для того, чтобы его эволюция завершилась взрывом сверхновой звезды.



Рис. 11.2.1. Эволюция Солнца на последующие 4,5–5 миллиардов лет



Рис. 11.2.2. Взрыв сверхновой звезды 1054 года

После того как Солнце пройдет фазу красного гиганта, его внешняя оболочка будет сброшена, из нее образуется планетарная туманность. В центре этой туманности остается сформированный из ядра Солнца **белый карлик** – горячий и плотный объект размером с Землю. Температура поверхности белого карлика 120 000 К, в течение многих миллионов и миллиардов лет он будет остывать и угасать.

Данный жизненный цикл считается типичным для звезд с массой, сравнимой с солнечной.

2. У массивной звезды (масса более чем в 5 раз больше массы Солнца), находящейся на стадии красного сверхгиганта, **ядро под действием сил гравитации начинает сжиматься**. С уменьшением радиуса звезды и, следовательно, объема светила, растут плотность и температура. Начинается новая последовательность термоядерных реакций. В термоядерных реакциях синтезируются все более тяжелые элементы: гелий, углерод, кислород, кремний и железо.

На стадии, когда весь кремний практически превратился в железо (Fe_{56}), дальнейший экзотермический термоядерный синтез становится невозможен. Это связано с тем, что Fe_{56} обладает максимальным дефектом массы и образование более тяжелых ядер с выделением энергии невозможно. Следовательно, когда железное ядро звезды достигает определенного размера, то давление в нем уже не в состоянии противостоять весу вышележащих слоев звезды, и **происходит незамедлительный коллапс ядра с нейтронизацией его вещества – взрыв сверхновой звезды** невероятной мощности. Из истории известно, что в 1054 году вспышку такого мощнейшего взрыва люди видели невооруженным глазом даже днем (рис. 11.2.2).

Сильные потоки нейтрино и вращающееся магнитное поле выталкивают большую часть накопленного звездой материала, включая железо и более легкие элементы. Разлетающаяся материя бомбардируется вылетающими нейтронами, захватывая их и образуя элементы, которые тяжелее железа, включая радиоактивные,

вплоть до урана (а возможно, до калифорния). В дальнейшем этот материал сверхновой звезды может участвовать в образовании новых звезд, планет или спутников.

Процессы, протекающие при образовании сверхновой, до сих пор изучаются, как и то, что остается от изначальной звезды. Остаток изначальной звезды может превратиться в *нейтронную звезду* либо в *черную дыру*.

Сильная гравитация в недрах сверхгиганта заставляет электроны поглотиться атомным ядром, где они, сливаясь с протонами, образуют нейтроны. Электромагнитные силы, разделяющие ядра, исчезают. Звезда представляет собой сверхплотный шар, состоящий из атомных ядер и отдельных нейтронов. Размеры таких звезд измеряются несколькими десятками километров, их плотность в 100 млн раз превышает плотность воды. Их называют *нейтронными звездами* (рис. 11.2.3). Нейтронная звезда может быть наблюдаема с Земли в разных спектральных диапазонах, включая оптический, на который приходится около 0,003% всей излучаемой звездой энергии.

Быстро вращающиеся нейтронные звезды, создающие излучение в радиодиапазоне, называются пульсарами. Период вращения звезды уменьшается до сотых или даже до тысячных долей секунды. На поверхности нейтронной звезды, где давление не столь велико, как в центре, нейтроны могут опять распасться на протоны и электроны. Сильное магнитное поле разгоняет электроны до скоростей, близких к скорости света, и выбрасывает в околозвездное пространство. Заряженные частицы движутся вдоль магнитных силовых линий, поэтому электроны покидают звезду именно от ее магнитных полюсов, где силовые линии выходят наружу. Перемещаясь вдоль силовых линий, электроны испускают излучение в направлении своего движения. Это излучение представляет собой узкий пучок электромагнитных волн. В результате вращения пульсара эти пучки попадают в поле зрения внешнего наблюдателя через равные промежутки времени – так образуются *периодические импульсы пульсара* – нейтронной звезды, которые были впервые зарегистрированы наземными радиолокаторами во второй половине XX века.

Если звезда обладает достаточно большой массой, то сжатие продолжается и звезда становится черной дырой. Существование черных дыр было предсказано общей теорией относительности.

Черная дыра – область пространства-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть ее не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света, в том числе кванты самого света. Граница этой области называется горизонтом событий.

В настоящее время черные дыры доступны только для косвенного наблюдения, так как из нее ничего не выходит наружу, она обратно проглатывает даже собственное излучение. Возможны разные варианты оценки масс центров галактики, где может



Рис. 11.2.3. Нейтронная звезда

существовать черная дыра. Так, например, при наблюдении светимости ядер активных галактик, а также по изучению вращения галактики или обращения близких к ней звезд удается обнаружить, что масса центра некоторых из них оказывается слишком большой для любого объекта, кроме сверхмассивной черной дыры. Есть объекты с явной аккрецией вещества на них, но при этом не наблюдается специфического излучения, вызванного ударной волной, значит, это излучение не может проглотить никакой объект, кроме черной дыры.

3. В начале XX в. независимо друг от друга датский астроном Э. Герцшпрунг и американский астроном Г. Рассел установили связь между спектральным классом (или температурой) звезд и их светимостью.

Распределение звезд в виде чередующейся последовательности в зависимости от связи между их спектральным классом и светимостью называется *диаграммой Герцшпрунга – Рассела*. Каждой звезде соответствует точка на диаграмме Герцшпрунга – Рассела. В результате звезды распределяются не случайным образом, а образуют череду нескольких последовательностей: *главная последовательность, последовательность голубых сверхгигантов, красных карликов, красных гигантов, красных сверхгигантов, белых карликов* (рис. 11.2.4).

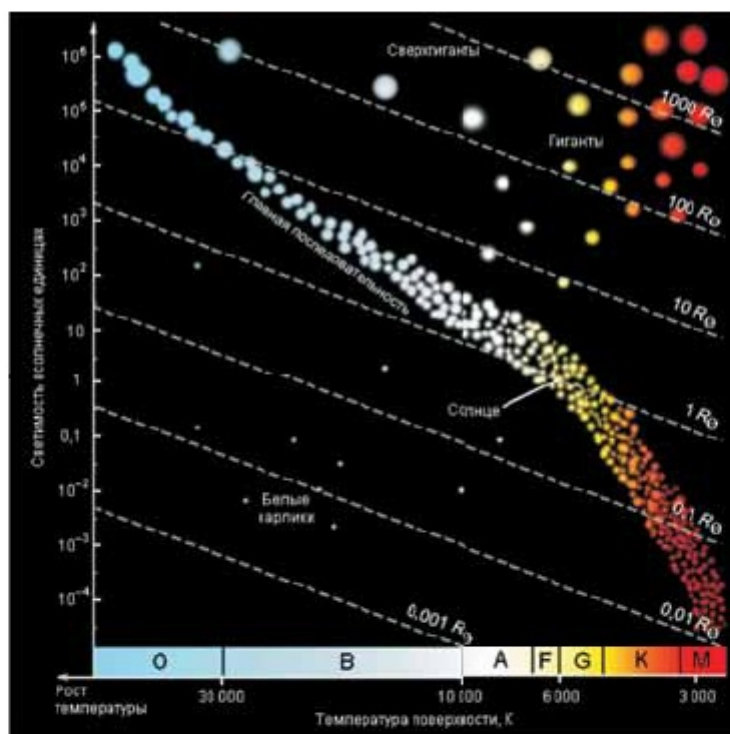


Рис. 11.2.4. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

Диаграмма показывает, что в природе встречаются звезды только с определенными соотношениями светимости и температуры. Например, звезд со светимостью,

равной светимости нашего Солнца, но красного цвета (спектральных классов К и М) не существует.

Самой длительной фазой эволюции всех звезд является стадия главной последовательности. Длительность этой стадии составляет около 90% от всего времени эволюции звезды до стадии нейтронной звезды или белого карлика. Продолжительность жизни звезд на главной последовательности зависит от их массы и определяется следующей формулой:

$t = 10^{10} \frac{1}{M^2}$ (лет), где M – масса звезды в массах Солнца. Когда водород заканчивается, звезда переходит в другую группу.

Зная, к какой ветке принадлежит звезда и ее спектральный класс, можно определить ее абсолютную величину и другие характеристики.

4. Звезды, у которых меняются блеск и цвет, относят к переменным звездам.

Главными наблюдательными (удобно наблюдаемыми) критериями выступают: период, амплитуда изменения блеска, форма кривой блеска и кривой лучевых скоростей. Факторами, влияющими на изменение блеска звезд, могут быть пульсации, хромосферная активность, переход вещества с одной звезды на другую в двойной системе, катастрофические события (взрыв сверхновой звезды) и пр.

Количество зафиксированных переменных звезд около 30 000.

Переменные звезды делятся на два больших класса: *затменно-переменные* и *физически переменные* звезды.

В зависимости от характера протекающих процессов физически переменные звезды делятся на *пульсирующие переменные* и *эруптивные* звезды.

Долгопериодические переменные звезды (с периодами от нескольких недель до года) называют миридами (представитель – звезда Мира из созвездия Кита Южного полушария, период изменения составляет 331,62 сут).

Особый класс ярких переменных звезд представляют *цефеиды* (δ Цефея – двойная звезда, изменяет свой блеск от 3,7^м до 4,5^м с периодом 5,4 сут). По известному из наблюдений периоду можно определить абсолютную звездную величину, светимость звезды и вычислить расстояние до нее. Цефеиды наблюдают в ближайших галактиках и определяют расстояния до этих звездных систем.

Эруптивные звезды проявляют свою переменность в виде вспышек. Это *новые* и *сверхновые звезды*.

Светимость *новых звезд* увеличивается в миллионы раз за несколько суток, а затем ослабевает в течение года и более.

Светимость *сверхновых звезд* увеличивается в десятки миллионов раз, при этом выделяется энергия 10^{46} Дж. Вспышки сверхновых звезд – довольно редкое явление. В нашей Галактике известно всего несколько остатков сверхновых, среди них самые известные: Сверхновая Тихо, Сверхновая Кеплера, Сверхновая 1054 г. С помощью современной аппаратуры открывается более 100 сверхновых в год в других галактиках, а их общее количество превысило 1500. Вспышки сверхновых звезд обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами, способствуют новому звездообразованию.

**Вопросы**

1. Как описывается жизненный цикл Солнца и других звезд с массой, сравнимой с солнечной? Во что они превращаются в процессе эволюции?
2. Как описывается жизненный цикл массивных звезд? Во что превращаются массивные звезды в процессе эволюции?
3. При каких условиях возникают сверхновая звезда, нейтронная звезда, пульсирующая звезда, черная дыра?
4. Как формулируется диаграмма Герцшпрунга – Рассела? На основе какой связи была построена эта диаграмма?
5. Какой период своей жизни звезда проводит на главной последовательности? Какие звезды имеют самую низкую температуру?
6. Какие звезды называются переменными? На какие виды они делятся и чем отличаются?

**Задание (экспериментальное исследование)**

В смартфон из приложения Play Market загрузите бесплатную программу «Звездная карта (siranet)». Направьте свое устройство на небо, и на его экране отобразятся имена звезд, созвездий и планет. Изучите, в каком созвездии в настоящий момент находится Солнце, как в отношении него расположены планеты. Запишите свои наблюдения в тетрадь.

§ 11.3**Солнце. Солнечно-земные связи**

1. Солнце – типичная звезда, спектрального класса *G* с температурой поверхности **6000 градусов** (рис. 11.2.4). Диаметр равен 1 млн 390 тыс. км (или 109 диаметров Земли), масса – $1,98 \cdot 10^{30}$ кг (или 330 тыс. земных масс), средняя плотность – $1,41 \cdot 10^3$ кг/м³, что в 4 раза меньше средней плотности Земли.

Расстояние от Солнца до Земли свет проходит примерно за 8 минут, а Солнце с этого расстояния видится как диск со средним угловым диаметром 32'. Измерения за пределами земной атмосферы показали, что на площадку Земли с площадью поперечного сечения 1 м² ежесекундно поступает 1370 Дж энергии. Эта величина называется **солнечной постоянной**:

$$J_c = 1370 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 1370 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (11.8)$$

Если эту величину умножить на площадь сферы радиусом 1 а. е., то получим полную энергию, излучаемую Солнцем в единицу времени, т.е. **светимость Солнца**:

$$L_{\odot} = 4\pi r^2 \cdot 1370 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 3,85 \cdot 10^{26} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (11.9)$$

На Землю падает около половины миллиардной доли этой энергии. Максимум солнечного излучения приходится на оптический диапазон. Фотосфера дает сплошной спектр. Химические элементы, которые имеются в атмосфере, поглощают свет определенной частоты, появляются темные линии, которые обнаружил Фраунгофер. При изучении спектра Солнца установили его состав: $\approx 73\%$ водорода, $\approx 25\%$ гелия и $\approx 2\%$ – другие элементы. Солнце находится в состоянии гидростатического равновесия, при котором тяготение, с одной стороны, а упругость газов и давление излучения – с другой, уравновешивают друг друга.

Внутреннее строение Солнца: от центра до 0,3 радиуса – *зона ядерных реакций*; от 0,3 до 0,7 – *зона переноса лучистой энергии*, где энергия, кроме теплопередачи, распространяется путем многократного последовательного поглощения и излучения фотонов. В результате на выходе из лучистой зоны излучение состоит из квантов всех длин волн, включая и видимый свет. В области последней трети радиуса Солнца находится *конвективная зона*. Энергия передается посредством конвекции – перемешивания.

2. Атмосферу Солнца образует фотосфера, хромосфера и корона.

Фотосфера – видимая поверхность Солнца, являющаяся источником излучения.

Протяженность (толщина) фотосферы – около 300 км, температура – 6000 К. В фотосфере Солнца наблюдается *процесс грануляции*: возникновение и исчезновение гранул. Плазма в гранулах поднимается вверх, а в межгранульных пространствах опускается вниз – разность температур ≈ 600 К. Размер любой из гранул – около 700 км. Каждые 5–10 мин они успевают появиться и исчезнуть.

Картина солнечных пятен также меняется, хотя и несколько медленнее. Индукция магнитного поля увеличивается в 1000 раз и препятствует перемешиванию плазмы в пятне, поэтому температура в пятне на 2000°С ниже, чем температура фотосферы, вследствие этого пятно темнее. Пятна обычно появляются группами в пределах небольшой области, вытянутой вдоль экватора (*рис. 11.3.1*). За период полного оборота Солнца (27 сут) пятна в основном исчезают. Но есть и долгоживущие, которые могут существовать на протяжении нескольких оборотов. Изучение пятен показало, что Солнце вращается в направлении движения планет и плоскость солнечного экватора наклонена к плоскости эклиптики под углом $7^{\circ}15'$.

Период вращения Солнца изменяется от 25 сут на экваторе до 30 сут у полюсов. Вблизи быстро развивающихся групп пятен возникают *вспышки*, сопровождающиеся выбросами вещества из нижних областей короны (*рис. 11.3.2*), а также усилением ультрафиолетового и рентгеновского излучений. **Период** такой солнечной активности – 11 лет.

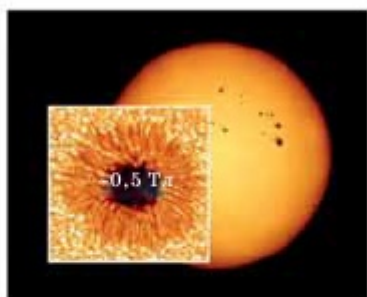


Рис. 11.3.1. Пятна на поверхности Солнца



Рис. 11.3.2. Факелы и протуберанцы (плазменные арки)

В фотосфере наблюдаются *факелы* – устойчивые потоки восходящего горячего газа, температура которого превышает температуру фотосферы на несколько сотен градусов.

Протяженность *хромосферы* составляет 10–15 тыс. км. Температура в хромосфере с высотой не падает, а растет от 4500 К до нескольких десятков тысяч. Хромосфера неоднородна и состоит из *спикул – столбиков светящейся плазмы* диаметром от 500 до 1200 км, выбрасываемых из нижней хромосферы со скоростью около 20 км/с на 5000–10 000 км вверх. До 40 радиусов Земли в солнечную корону простираются *протуберанцы – гигантские арки*, или выступы (рис. 11.3.2). Скорость вещества в них – 200 км/с, а температура составляет 10^4 К.

Солнечная корона – внешняя, самая разреженная оболочка солнечной атмосферы; наблюдается лишь во время солнечных затмений, что можно увидеть с помощью специальных *телескопов-коронোগрафов*.

3. Максимум солнечного излучения приходится на видимую часть спектра. Атмосфера Земли пропускает только видимый свет, а также в узком диапазоне радиоволны. В оптическом диапазоне излучение Солнца постоянно, а в коротковолновой области очень сильно зависит от солнечной активности. Рентгеновское и жесткое ультрафиолетовое излучения ионизируют верхние слои атмосферы, создавая ионосферу. Мягкое ультрафиолетовое излучение проникает глубже и при воздействии на кислород образует *озон O_3* и *озоновый слой*. Поток солнечной плазмы называется *солнечным ветром*. Состоит он из α -частиц, протонов, электронов и незначительного количества некоторых высокоионизированных атомов.

Скорость частиц увеличивается при удалении от Солнца и вблизи Земли составляет 450 км/с. Поток солнечной плазмы не может преодолеть магнитное поле Земли и обтекает его. При этом образуется магнитосфера – сжатая со стороны Солнца до 10–12 радиусов Земли и вытянутая с ночной стороны на 6000 радиусов Земли.

Солнечная активность приводит к возникновению *магнитных бурь*. Магнитное поле Земли экранирует нас от высокоэнергетических частиц, однако на космических спутниках, авиалайнерах и в приполярных широтах они создают высокую радиационную опасность и приводят к *полярным сияниям* (рис. 11.3.3).



Рис. 11.3.3. Полярные сияния

Во время вспышек уровень рентгеновского и ультрафиолетового излучений повышается, атмосфера в верхних слоях, поглощая эти излучения, разогревается, ее объем увеличивается, повышается плотность газа на высоте в несколько сотен километров, что приводит к торможению спутников на низших орбитах, вплоть до их потери. Выброшенные при вспышках высокоэнергетические частицы на высоте 1000 км вызывают сбой и деградацию электроники, дополнительно ионизируя ионосферу, разрушают радиосвязь. Изменение магнитного поля приводит к появлению индуцированных токов в линиях электропередачи, трубопроводах и на железнодорожных путях. В трубопроводах сила тока может достигать нескольких сотен тысяч ампер. Это вызывает перегрузки в электросистемах, перегревание трансформаторов, нарушение коррозионной защиты, сбой автоматики.

Магнитные бури приводят к развитию циклонов, поскольку изменяется давление в нижнем слое атмосферы Земли.

4. Космические обсерватории SOHO и ASE, находящиеся в так называемой *точке либрации* L_1 между Землей и Солнцем (рис. 11.3.4), позволяют постоянно отслеживать появление пятен, вспышек, корональных выбросов массы, по их динамике составляют трехдневный прогноз и оценивают опасность. Все тела, находящиеся в точках либрации, вращаются с такими же периодами, как период вращения Земли вокруг Солнца. Предупреждение о магнитных бурях и потоках космических лучей позволяет изменить маршруты воздушных судов и избежать опасного радиационного облучения пассажиров и экипажей, предупредить людей, чтобы они заблаговременно приняли лекарство.

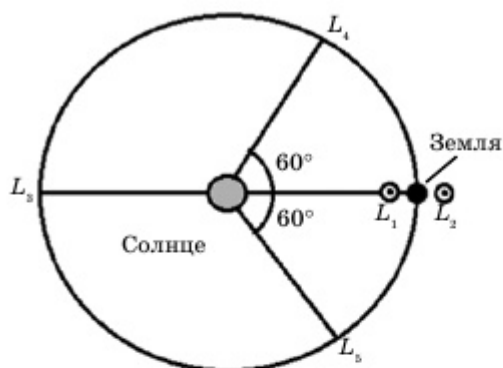


Рис. 11.3.4. Расположение космических обсерваторий



Вопросы

1. Какими параметрами характеризуется Солнце? Расскажите о внутреннем строении Солнца. Какие зоны его составляют? В чем заключается их особенность?

- Из каких химических элементов состоит Солнце? С помощью каких наблюдений можно определить химический состав Солнца?
- Из каких частей состоит атмосфера Солнца? Как они характеризуются? Какие процессы в них происходят? Как называются эти процессы?
- Как проявляет себя солнечная активность в околоземном пространстве? Какие при этом происходят явления в верхних слоях атмосферы? Как они негативно влияют на различные земные и околоземные объекты?
- Как обеспечивается постоянство наблюдения за поведением Солнца?



Задание (практическое исследование)

Нарисуйте строение атмосферы Солнца и укажите примерные размеры слоев.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Чему равен период вращения Солнца, если путем наблюдений установлено, что пятно, расположенное близ экватора, сместилось за трое суток на 40° ?

Дано:
 $t = 3$ сут
 $L = 40^\circ$

 $T = ?$

Решение:

Если за трое суток пятно сместилось на 40° , то за одни сутки оно сместилось на $\frac{40^\circ}{3}$, а на 360° оно сместится за:

$$T = \frac{360^\circ}{\frac{40^\circ}{3}} = \frac{360^\circ \cdot 3}{40^\circ} = 27 \text{ (сут).}$$

О т в е т: 27 (сут).

Задача 2. Диаметр изображения пятна на Солнце равен 1,9 мм. Определите истинную площадь пятна и сравните с площадью сечения Земли. Диаметр изображения Солнца примите равным 100 мм.

Дано:
 $d = 1,9$ мм
 $D_0 = 1\,390\,600$ км
 $r_3 = 6400$ км
 $D = 100$ мм

 $S_3 = ?$
 $\frac{S_n}{S_3} = ?$

Решение:

Истинный диаметр пятна во столько раз больше диаметра его изображения, во сколько раз истинный диаметр Солнца больше его изображения $\frac{D_0}{D} = \frac{d_0}{d}$, откуда $d_0 = \frac{D_0 d}{D}$, где D_0 – истинный диаметр Солнца.

$$d_0 = \frac{1390600 \cdot 1,9}{100} = 2,64 \cdot 10^4 \text{ (км).}$$

$$\text{Площадь пятна: } S_n = \frac{\pi d_0^2}{4} = 5,48 \cdot 10^8 \text{ (км}^2\text{).}$$

$$\text{Площадь сечения Земли: } S_3 = \pi r_3^2 = 3,14 \cdot (6,4 \cdot 10^3)^2 = 1,29 \cdot 10^8 \text{ (км}^2\text{).}$$

$$\frac{S_n}{S_3} = \frac{5,48 \cdot 10^8}{1,29 \cdot 10^8} = 4,2 \text{ раза больше.}$$

О т в е т: $S_n = 5,48 \cdot 10^8$ (км²); $\frac{S_n}{S_3} = 4,2$ раза больше.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 11.3.1. Период вращения Солнца вблизи экватора составляет 27 сут. На сколько градусов сместится пятно за 6 сут? (Ответ: 80°.)
- 11.3.2. Диаметр изображения пятна на Солнце – 1,3 мм. Определите истинную площадь пятна и сравните с площадью сечения Земли. Стандартный размер изображения Солнца – 100 мм. (Ответ: $2,56 \cdot 10^8$ км²; в 2 раза больше.)
- 11.3.3. Во сколько раз ускорение свободного падения на уровне фотосферы Солнца больше ускорения свободного падения на поверхности Земли, если масса Солнца в 333 000 раз больше массы Земли, а его радиус в 109 раз превосходит радиус Земли? (Ответ: в 28 раз.)
- 11.3.4. Вычислите угловую и линейную скорость движения точки на экваторе Солнца, если период составляет 25 суток, а радиус Солнца – $6,95 \cdot 10^5$ км. (Ответ: $2,9 \cdot 10^{-6}$ рад/с; 2,02 км/с.)
- 11.3.5. Вычислите среднюю плотность вещества Солнца, если его масса равна $1,98 \cdot 10^{30}$ кг, радиус равен $6,95 \cdot 10^5$ км. (Ответ: $1,4 \cdot 10^3$ кг/м³.)

Уровень В

- 11.3.6. Частицы солнечного ветра – протоны ($m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг), покинув атмосферу Солнца и двигаясь практически равномерно, достигают орбиты Земли через 3,5 дня. При этом в 1 см³ пространства на расстоянии 1 а. е. от Солнца находится в среднем пять частиц. Какую массу теряет с солнечным ветром наше светило за сутки? За год? (Ответ: 10^{14} кг/сут; $\approx 3,7 \cdot 10^{16}$ кг.)
- 11.3.7. Новая звезда 1918 г. в созвездии Орла за трое суток увеличила блеск с $m_1 = +13,2$ до $m_2 = -1,1$. Во сколько раз в среднем за сутки возрастал блеск новой звезды? (Ответ: \approx в 80 раз.)
- 11.3.8. Если у двух звезд примерно одинаковой температуры радиусы различаются в 20, 100 и 500 раз, то во сколько раз различается их светимость? (Ответ: 400; 10000; $25 \cdot 10^4$ раз.)
- 11.3.9. Расстояние от звезды Денеб (α Лебедя) до Земли свет проходит за 815 лет, расстояние от звезды Альдебаран (α Тельца) – за 67,9 года и от звезды Толиман (α Центавра) – за 4,34 года. Чему равны годовые параллаксы этих звезд? (Ответ: 0,004"; 0,048"; 0,752".)

§ 11.4

Солнечная система

1. *Солнечной системой* называется макромир, состоящий из самой близкой к человечеству звезды – Солнца и восьми планет, а также других космических объектов, вращающихся вокруг Солнца (рис. 11.4.1).

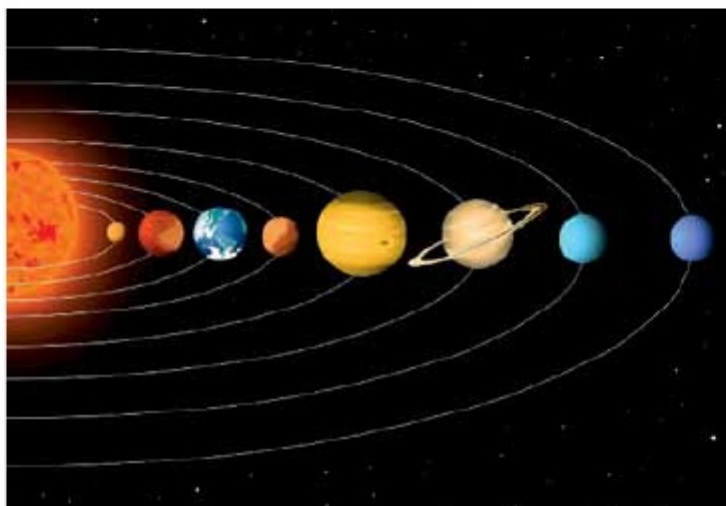


Рис. 11.4.1. Солнечная система

Большая часть массы объектов Солнечной системы приходится на Солнце; остальная часть содержится в восьми относительно уединенных планетах, имеющих почти круговые орбиты и располагающихся в пределах почти плоского диска – плоскости эклиптики. Общая масса системы составляет около $1,0014 M_{\odot}$.

Планетой называют движущееся вокруг звезды в ее гравитационном поле небесное тело, имеющее форму, близкую к сферической, светящееся отраженным от звезды светом и расчилившее область своей орбиты от других мелких объектов путем захвата их своим гравитационным полем.

Орбиты планет и большинства астероидов лежат почти в одной плоскости, незначительно наклоненной ($7^{\circ}15''$) к плоскости солнечного экватора.

Все планеты (кроме Венеры и Урана) обращаются вокруг своей оси, а также вращаются вокруг Солнца в одну и ту же сторону, совпадающую с вращением Солнца вокруг своей оси. В том же направлении движется и большинство спутников по своим орбитам. Спутники, которые вращались в противоположном направлении, были захвачены планетами.

Образование Солнечной системы началось около 4,6 млрд лет назад в результате уплотнения (неоднородного сжатия) межзвездного газопылевого облака, состоящего из атомарного и молекулярного водорода (H и H₂), гелия (He), простейших молекул (H₂O, OH) и пыли. Пылевая составляющая облака представляет собой частицы льда, железа, сажи и других твердых веществ неправильной формы с субмикронными размерами (на нее приходится всего несколько процентов массы облака).

Плотность вещества увеличивается и далее начинает сжиматься под действием собственной силы тяготения. В центре сжимающегося фрагмента образуется сгущение пыли и газа, которое является центром аккреции (аккреция – процесс захвата вещества из окружающего пространства). Плотность ядра увеличивается, давление растет, начинаются термоядерные реакции синтеза – образуется протозвезда. Процесс формирования молодой звезды продолжается около миллиона лет.

Вокруг звезды образуются планетезимали (зародыши планет) из частиц пыли протопланетного диска. Размеры планетезималей вначале увеличиваются за счет случайных столкновений, затем, обладая более сильной гравитацией, планетезимали поглощают своих соседей с меньшей массой и приобретают современный вид планет. Такова научная трактовка образования Солнечной системы с *четырьмя планетами земной группы и четырьмя планетами-гигантами, вращающимися вокруг нашего светила.*

2. Четыре ближайшие к Солнцу планеты, называемые *планетами земной группы* – *Меркурий, Венера, Земля и Марс*, состоят в основном из силикатов и металлов (рис. 11.4.2). Они представляют собой твердые тела, сравнительно небольшие, маломассивные, но с большой средней плотностью, более медленным вращением по сравнению с планетами-гигантами и с малым числом спутников (или без них).



Рис. 11.4.2. Планеты земной группы

Меркурий – самая близкая к Солнцу планета. По размерам близка к Луне, ее можно увидеть непродолжительное время после захода или перед восходом Солнца.

У него вытянутая орбита, большой эксцентриситет. На Меркурии нет атмосферы, его магнитное поле в 300 раз меньше земного, сутки равны 176 земным, год – три земных месяца, температура от $+430^{\circ}\text{C}$ днем до -170°C ночью. Угол наклона оси вращения к плоскости орбиты составляет 90° , поэтому полярные области никогда не освещаются Солнцем и являются хранилищами льда, перемешанного с горной породой. На Меркурии имеются многочисленные кратеры, уступы и невысокие горы высотой 2–4 км. Меркурий имеет большое железное ядро и тонкую мантию.

Венера – вторая от Солнца планета, ее масса составляет 80% земной. Венера и Земля – внешне похожие планеты, имеют примерно одинаковые размеры, значения силы тяжести, кроме того, они весьма схожи по основному химическому составу. Но Венера нагрета до 475°C , вода присутствует в столь малых количествах, что если ее сконденсировать на планетарную поверхность, она образует слой всего лишь 3 см. В отличие от Земли у Венеры нет магнитного поля, поэтому она не защищена от солнечного ветра. Потоки заряженных частиц, бомбардирующих атмосферу планеты, уносят из нее ионы кислорода и водорода, образованные из воды ультрафиолетовым излучением.

С помощью космических аппаратов составлены рельефные карты поверхности Венеры и установлено, что ее атмосфера состоит в основном из углекислого газа, облака содержат капельки серной кислоты, наблюдаются молнии. Мощный парниковый эффект обуславливает температуру поверхности 475°C . Давление у поверхности – *90 атм по ртутному столбику*. Около 500 млн лет назад на Венере произошла глобальная геологическая катастрофа. Сотни тысяч действующих вулканов извергли огромное количество лавы, которая покрыла всю поверхность планеты. Самый высокий потухший вулкан – гора Маат высотой 8 км, другие – до 3 км; самые высокие горы – до 11 км, хотя большая часть поверхности – равнины. На Венере имеется много крупных кратеров.

Земля окружена атмосферой, которая состоит в основном из азота и кислорода. Модели внутреннего строения Земли и остальных планет земной группы примерно схожи (рис. 11.4.3). По химическому составу и физическим характеристикам выделяют твердую кору, мантию и ядро. Плотность вещества в центре Земли оценивается в $13\,500\text{ кг/м}^3$. Основным источником нагрева недр является энергия, выделяемая при распаде радиоактивных элементов, и нагревание за счет сжатия планеты в процессе эволюции. Происходит перераспределение вещества по плотности – тяжелые элементы стремятся к центру, а легкие – к поверхности. У Земли этот процесс еще не завершился, что приводит к землетрясениям, извержению вулканов и т.п. С помощью спутников обнаружены радиационные пояса Земли (рис. 11.4.4). Благодаря магнитному полю Земля удерживает в радиационных поясах захваченные частицы солнечного излучения, не позволяя им проходить в атмосферу Земли и тем более к поверхности.

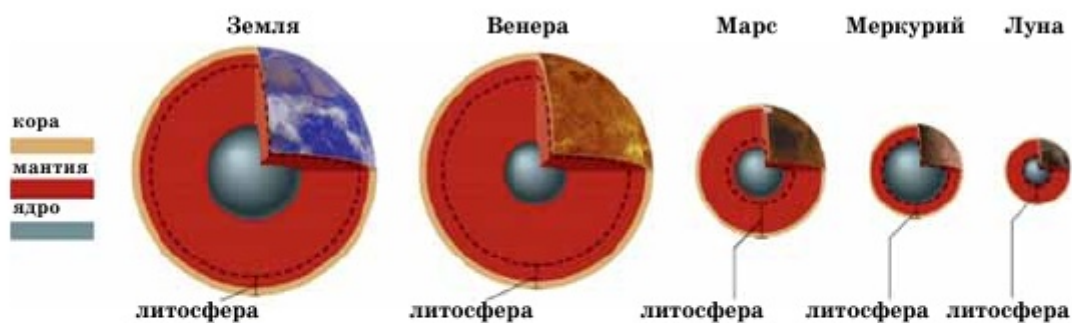


Рис. 11.4.3. Модели внутреннего строения планет земной группы и Луны



Рис. 11.4.4. Магнитное поле Земли

Марс – четвертая от Солнца планета, видна как яркое красное светило. Марс – безжизненная песчаная пустыня красноватого цвета из-за повышенного содержания оксидов железа. Много каньонов и долин, крупных и мелких, потухших вулканов (гора Олимп – высота 27 км), ударных кратеров, обнаружены русла рек. Планета по многим параметрам схожа с Землей. Сутки длиннее земных примерно на 37 минут, ось вращения наклонена к плоскости орбиты почти как земная, сила тяжести в два раза меньше. Атмосфера Марса разрежена, состоит в основном из углекислого газа. Отмечаются большие суточные колебания температуры: днем $+15^{\circ}\text{C}$, ночью до -65°C . Зимой наблюдаются снег и иней. Среднегодовая температура составляет -70°C . Давление у поверхности в 100–170 раз меньше, чем на Земле. При таких условиях вода закипает при $+2^{\circ}\text{C}$ и тут же испаряется, поэтому в жидком состоянии ее там нет. Хотя исследования показали, что в прошлом на Марсе было много воды, но поскольку атмосфера тонкая, то она улетучилась в межпланетное пространство. Объем льда эквивалентен объему воды, которая

может покрыть поверхность всей планеты в 1 км. Магнитное поле Марса в 500 раз меньше земного, сильно деформируется солнечным ветром. Марс имеет два спутника – Фобос и Деймос, в переводе с греческого «страх» и «ужас».

3. Четыре более удаленные от Солнца планеты – *Юпитер*, *Сатурн*, *Уран* и *Нептун* (также называемые *газовыми гигантами*) – намного более массивны, чем планеты земной группы (рис. 11.4.5). Крупнейшие планеты Солнечной системы (Юпитер и Сатурн) состоят главным образом из водорода и гелия; меньшие газовые гиганты (Уран и Нептун), помимо водорода и гелия, содержат в составе своих атмосфер метан и угарный газ. Такие планеты выделяются в отдельный класс «ледяных гигантов».

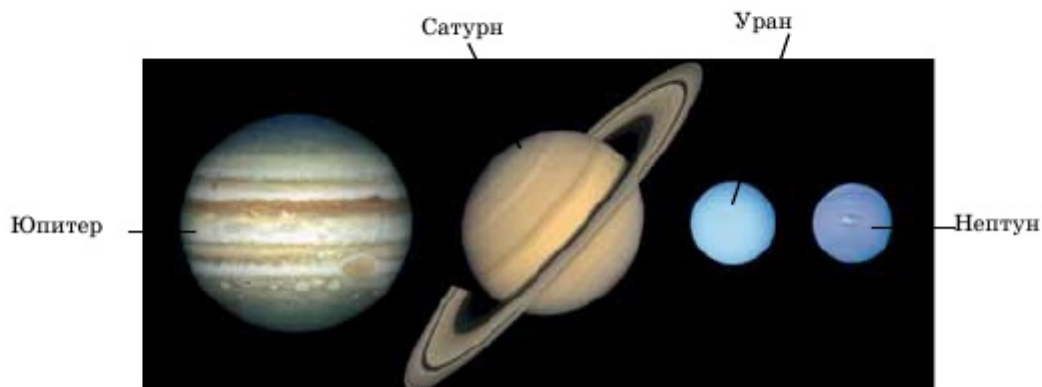


Рис. 11.4.5. Планеты – газовые гиганты

Юпитер в 300 раз массивнее Земли, средняя плотность близка к плотности воды. Не имеет твердой поверхности. В составе преобладают водород и гелий. Атмосфера в глубь планеты уплотняется и переходит в особое газопожидкое состояние. На глубине 1500 км водород жидкий, а на уровне 0,77 радиуса планеты приобретает свойства металла. Движение электронов в этом слое создает магнитное поле, которое в 12 раз сильнее земного. Вероятно, внутреннее ядро диаметром 25 000 км имеет температуру 23 000 К и состоит из оксидов кремния, магния и железа с примесями. Космические аппараты обнаружили возле Юпитера пылевые кольца и полярные сияния в его атмосфере. Сильное магнитное поле Юпитера захватывает выброшенные Солнцем заряженные частицы, которые образуют большие, чем у Земли, радиационные пояса. В области полюсов космические частицы проникают в атмосферу, вызывая полярные сияния. Период вращения Юпитера – 10 ч. Из-за быстрого вращения облака в атмосфере вытягиваются в полосы: светлые полосы – зоны высокого давления, темные – низкого. На широтах от $+9^\circ$ до -9° движение газов происходит с запада на восток, выше и ниже, т.е. до $\pm 20^\circ$ – в противоположную сторону, между ними – вихри. На поверхности наблюдаются овальные пятна; самое большое – красное пятно. Это гигантский антициклон, в котором газ вращается против хода часовой стрелки, причем ско-

рость ветра на краях этого урагана достигает 360 км/ч, его размеры 35 000 км в длину и 14 000 км в ширину. Считают, что Большое Красное Пятно существует так долго, потому что подпитывается энергией меньших собратьев, поглощая их. Одно из таких поглощений сфотографировано телескопом «Хаббл» в 2008 г. До сих пор не ясно, что придает пятну красный цвет. Юпитер излучает энергии в 2,5 раза больше, чем получает от Солнца, значит, он имеет собственные источники теплоты, вследствие медленного гравитационного сжатия планеты. Период обращения Юпитера вокруг Солнца – 12 земных лет. В настоящее время у Юпитера насчитывается 67 спутников.

Сатурн имеет самую низкую плотность из всех планет Солнечной системы (0,7 плотности воды). Как и Юпитер, имеет мощную водородно-гелиевую атмосферу, уплотняющуюся к центру и переходящую в жидкий и металлический водород с капельками гелия, а также каменное ядро. Кольца Сатурна обнаружил в 1610 году Галилео Галилей. Кольца состоят из множества частиц – от мельчайших пылинок до объектов в несколько метров. Плоскость колец расположена в плоскости экватора Сатурна и при движении Сатурна по орбите дважды бывает повернута к Земле ребром. В таком случае колец не видно в телескоп, так как толщина их мала. Диаметр по наружному краю – 272 000 км, а по внутреннему – 144 000 км. Ширина всего кольца – 128 000 км, толщина – 1 км. Суммарная масса около $3 \cdot 10^{-3}$ массы Сатурна. Сейчас установлено, что кольца – остатки огромного околопланетного облака. На Сатурне происходят мощные грозы и молнии, превосходящие земные. Штормы возникают в одном и том же месте – 35° южной широты (это место астрономы называют «аллеей штормов»), могут продолжаться несколько месяцев, исчезать на годы и снова возникать там же. Причины этого не ясны. Напряженность магнитного поля близка к земной. Сатурн обращается вокруг Солнца медленно, период его обращения – примерно 30 земных лет. Сатурн имеет 62 спутника (последний открыт в 2008 г.).

Уран имеет каменное ядро, мантию из замерзшей воды, метана и аммиака и атмосферу из водорода, гелия и метана. Метан хорошо поглощает красные лучи и рассеивает голубые и зеленые, что придает планете красивый бирюзовый цвет. В 1977 году открыты первые девять колец Урана, в настоящее время их уже тринадцать, толщиной от 1 до 8 км, и только у самого большого от 22 до 93 км, на расстоянии 1,65–2,02 радиуса от центра планеты. Кольца состоят из мелкой пыли и небольших твердых частиц. Ось вращения планеты почти совпадает с плоскостью орбиты. Уран как бы «лежит на боку» и катится по орбите, как мяч, поэтому летом Северное полушарие полностью освещено Солнцем, а Южное – полностью погружено во тьму, зимой – наоборот. Год составляет 84 земных, каждое время года длится 21 год. Имеет 27 спутников.

Нептун – самая маленькая из планет-гигантов. Находится на краю планетарной части Солнечной системы и получает очень мало солнечной энергии. Но, несмотря на это, планета очень активна. На Нептуне наблюдаются самые сильные ветры Солнечной системы – скорость достигает 2400 км/ч. Планета имеет внутренний источник энергии, природа которого не ясна. В окружающее пространство она излучает в 2,5 раза энергии больше, чем получает от Солнца. Атмосфера состоит из водорода (80%), гелия (19%), метана (1%), поэтому имеет голубой с зеленым оттенком цвет.

Метан может распадаться на водород и углерод и кристаллизоваться в виде алмаза, поэтому возможен алмазный град. Вероятнее всего, у Нептуна есть твердое ядро. Космический зонд «Вояджер-2» обнаружил кольца Нептуна на расстояниях от 1,7 до 2,5 радиуса планеты, состоящие из мелких силикатных пылинок, отражающих 6% солнечного света. Напряженность магнитного поля в три раза меньше, чем у Земли. Имеет 13 спутников.

4. В Солнечной системе существуют две области, заполненные *малыми телами*. К ним относятся *астероиды, метеориты и кометы*.

Пояс астероидов, находящийся между Марсом и Юпитером, схож по составу с планетами земной группы, поскольку состоит из силикатов и металлов. Крупнейшими объектами пояса астероидов являются карликовая планета Церера и астероиды Паллада, Веста и Гигея. За орбитой Нептуна располагаются транснептуновые объекты, состоящие из замерзшей воды, аммиака и метана, крупнейшими из которых являются Плутон, Седна, Хаумеа, Макемаке, Кварвар, Орк и Эрида. Размеры астероидов могут превышать десятки и сотни километров.

В межпланетном пространстве имеется большое количество мелких тел, называемых *метеоритными*. При столкновениях с Землей, при трении в атмосфере они разогреваются и ярко светятся. Возникает *болид – огненный шар со светящимся хвостом*. Если тело небольшое, то оно полностью сгорит в атмосфере, погасив космическую скорость, более крупное падает под действием тяготения и достигает поверхности Земли. Уцелевший от полного разрушения остаток метеоритного тела называется *метеоритом*. Метеориты имеют оплавленную поверхность, бывают из каменных веществ или же из железа с примесью никеля, причем в такой пропорции, которая в самородном железе не встречается. От искусственно выплавленного железа они отличаются необычайно крупной кристаллизацией. Изредка метеориты бывают в виде железной губки, поры заполнены каменной массой. На Землю ежегодно выпадает от 200 до 2000 т метеоритного вещества.

Кометы, или «хвостатые звезды», движутся вокруг Солнца по вытянутой орбите. Ядра комет представляют собой рыхлые тела плотностью менее 1000 кг/м^3 , массой $10^{10} - 10^{17} \text{ кг}$. На 80% состоят из водяного льда, а также из замерзших углекислого газа, угарного газа, аммиака и вкрапленных металлических частиц. При приближении к Солнцу наблюдается явление сублимации – переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое. В результате образуется голова кометы и хвост.



Вопросы

1. Какой смысл таких понятий, как «Солнечная система» и «планета»?
2. Как образовалась Солнечная система?
3. Какие планеты называются планетами земной группы? В чем состоит их сходство и отличие?
4. Какие планеты называются газовыми гигантами? В чем состоит их сходство и отличие?
5. Какие тела Солнечной системы называются малыми телами? В чем состоит их сходство и отличие?

**Задание (теоретическое исследование)**

Действительно ли солнечные вспышки и космическая радиация представляют реальную опасность для человека, находящегося в высоко летящем самолете? Почему, когда самолет взлетает и набирает высоту, общий уровень радиации сначала (примерно на первых 500 м подъема) уменьшается? Если космическое излучение как-то меняется с высотой, то с чем это связано? Обоснуйте свои выводы.

**Задание (практическое исследование)**

Определите число метеоров, появившихся на обозреваемой области неба. Вычислив площадь наблюдаемой площадки, можно определить плотность потока метеоров, а при известной геоцентрической скорости и пространственную плотность роя. С помощью регулярных наблюдений изучите структуру потока, пространственную плотность и распределение метеоров по яркости.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Цирк Клавдий на Луне имеет диаметр около 200 км. Каковы его угловые размеры при наблюдении с Земли (расстояние до Луны $3,8 \cdot 10^5$ км)?

Дано: $d = 200$ км $D = 3,8 \cdot 10^5$ км $\rho = ?$	СИ $2 \cdot 10^5$ м $3,8 \cdot 10^8$ м	Решение: Линейный диаметр светила d , его угловой радиус ρ и расстояние до него D связаны соотношением: $d = D \sin \rho''$.
--	--	--

(1)

$$\text{Но } \sin \rho'' = \rho'' \frac{1}{206265}. \quad (2)$$

Подставив соотношение (2) в формулу (1), получаем:

$$d = D \frac{\rho''}{206265}, \text{ откуда } \rho = \frac{206265 \cdot d}{D}.$$

$$\text{Проведем вычисления } \rho = \frac{206265 \cdot 2 \cdot 10^5}{3,8 \cdot 10^8} = 109'' = 1'49''.$$

О т в е т: $\rho = 1'49''$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 11.4.1. При наблюдении с Земли на Луне (расстояние до Луны $3,8 \cdot 10^5$ км) можно различить невооруженным глазом объекты протяженностью 200 км. Может ли космонавт, пролетающий на высоте 190 км над лунной поверхностью, различить стоящий на Луне космический корабль диаметром 3 м? (*Ответ:* нет.)
- 11.4.2. Угловой диаметр лунного кратера при наблюдениях его с Земли (расстояние до Луны $3,8 \cdot 10^5$ км) равен $30''$. На каком расстоянии от Земли должен

- пролететь космический корабль, чтобы космонавт, находящийся на его борту, увидел этот кратер невооруженным глазом, разрешающая способность которого равна $2'$? (Ответ: $9,5 \cdot 10^4$ км.)
- 11.4.3. Объекты какого размера может различить на поверхности Земли космонавт с высоты 220 км, если острота его зрения равна $2'$? (Ответ: 128 м.)
- 11.4.4. Каков линейный диаметр кольца Сатурна, если с расстояния $1,3 \cdot 10^9$ км оно видно под углом $40''$? (Ответ: $2,5 \cdot 10^6$ км.)
- 11.4.5. С какого расстояния невооруженным глазом можно различить диск Венеры, если ее диаметр составляет 12 000 км? Разрешающая способность глаза равна $2'$. (Ответ: $20,6 \cdot 10^3$ км.)
- 11.4.6. Объекты какого размера может различить на поверхности Земли космонавт с высоты 180 км, если острота зрения равна $2'$? (Ответ: 104,7 м.)
- Уровень В**
- 11.4.7. Меркурий и Луна вращаются в направлении своего орбитального движения, первый с периодом в $58,65^a$, а вторая с периодом в $27,32^a$. Период обращения Меркурия вокруг Солнца равен 88^a , а Луна обращается вокруг него вместе с Землей. Чему равна продолжительность солнечных суток на Меркурии и на Луне? (Ответ: 176^a ; $29,53^a$.)
- 11.4.8. Найдите географическую широту точек земной поверхности, линейная скорость вращения которых в два, четыре и восемь раз меньше линейной скорости экватора. (Ответ: 60° ; $75,5^\circ$; $82,8^\circ$.)
- 11.4.9. На каких примерно расстояниях обращаются вокруг Марса его спутники Фобос и Деймос, которые по наблюдениям с Земли при среднем противостоянии планеты удаляются от нее соответственно на $24,7''$ и $61,8''$? Большая полуось орбиты Марса равна 1,524 а. е. (Ответ: 9400 км; 23500 км.)

§ 11.5

Наша Галактика. Открытие других галактик. Квазары

1. Галактика – это гравитационно связанная система, состоящая из сотен миллиардов звезд и межзвездной среды.

В нашей Галактике более 200 млрд звезд. Проекция нашей Галактики на небесную сферу называется Млечный Путь. Резкой границы у Галактики нет, поэтому ее размеры оцениваются примерно и составляют 100 000 световых лет в диаметре и 12 000 световых лет в толщине. Галактика имеет вид сплюснутого эллипса со спиральными ветвями, в плоскости которого располагаются самые яркие и массивные звезды (рис. 11.5.1). Солнечная система находится на расстоянии около 26 000 световых лет от центра Галактики. Плоскости Галактики и Солнечной системы не совпадают. Галактика вращается, но не равномерно –



Рис. 11.5.1. Наша Галактика

при приближении к центру угловая скорость вращения растет. Солнечная система совершает оборот вокруг центра Галактики примерно за 180–220 млн земных лет – столько длится один галактический год.

2. С помощью спектрального анализа было обнаружено, что пространство между звездами заполнено газом с очень малой, но вполне определенной плотностью. Химический состав довольно близок к химическому составу звезд. Преобладающими элементами являются водород и гелий – остальные элементы можно рассматривать как примеси. Межзвездная пыль поглощает свет звезд, состоит из микроскопических частиц вещества, имеющего сложный химический состав. В плоскости Галактики, помимо повышенной концентрации звезд, наблюдается повышенная концентрация пыли и газа в виде *туманностей*. Вещество туманностей чрезвычайно разрежено. Однако вследствие гигантских размеров туманностей на фотографиях они выглядят весьма плотными облаками.

Свечение туманностей происходит в том случае, если они отражают и переизлучают свет близких звезд. Галактические облака бывают не только отражающими свет, но и поглощающими его, состоящими из молекулярного газа и пыли.

Межзвездная среда за пределами туманностей еще более разрежена (в десять тысяч раз), чем среда самих туманностей, тем не менее она содержит атомы, поэтому получила название *межзвездного газа*.

Вся межзвездная среда пронизывается магнитными полями, электромагнитным излучением. Масса межзвездного вещества оценивается в 2% от общей массы Галактики.

3. С помощью наблюдений было обнаружено, что таких систем, как наша Галактика, во Вселенной огромное множество.

Галактики классифицируются по следующим основным видам: *эллиптические, спиральные, неправильные*.

Эллиптические галактики (E). К эллиптическим относится около 25% изученных галактик. Их диаметры от 5 до 50 кпк. Массы – 10^6 – 10^{13} массы Солнца. В центре находится яркое пятно, яркость которого уменьшается при удалении от центра (рис. 11.5.2). Число звезд плавно убывает от центра к краю. Такие галактики обычно содержат желтые и красные звезды, в них практически нет пыли и газа.



Рис. 11.5.2.
Эллиптическая
галактика



Рис. 11.5.3.
Спиральная
галактика



Рис. 11.5.4.
Неправильная
галактика

Спиральные галактики (S). Около половины изученных галактик относится к спиральному виду (рис. 11.5.1 и рис. 11.5.3). Это сильно сплюснутые системы, у которых имеется центральное уплотнение с ядром и спиральные ветви (две или более). У половины спиральных галактик в центральной части существует почти прямая звездная перемычка, от которой начинают закручиваться спиральные рукава. Толщина диска спиральной галактики составляет около $1/10$ его диаметра. Спиральные галактики – быстро вращающиеся звездные системы, причем внутренняя часть галактики вращается со скоростью, отличной от внешней, поэтому образуются спиральные рукава, а в некоторых галактиках – и бары (своеобразные перемычки, от концов которых расходятся рукава). В спиральных ветвях сосредоточены самые яркие и молодые звезды, а также яркие газопылевые туманности. Галактики Млечный Путь и Туманность Андромеды являются спиральными.

Неправильные галактики (Ir). Неправильные галактики – маломассивные галактики неправильной структуры (рис. 11.5.4). Их массы – 10^8 – 10^{10} массы Солнца. 50% от общей массы составляет газ. Видимая яркость таких галактик создается молодыми звездами высокой светимости и областями ионизированного водорода. Примером неправильной галактики служат Большое и Малое Магеллановы облака – спутники нашей Галактики.

4. Некоторые галактики более интенсивно излучают в радиодиапазоне, их называют **радиогалактиками**.

Имеются галактики с активными ядрами – **сейфертовские галактики**, по имени первооткрывателя К. Сейферта.

В начале 1960-х годов по радиоизлучениям были обнаружены объекты, подобные активным ядрам галактик, их позже назвали **квасарами**. Расстояние до самых далеких квазаров около 10 млрд световых лет, видимая звездная величина не больше 12^m , наблюдают их с помощью крупных телескопов.

Квазары – самые яркие астрономические объекты, представляющие собой активные ядра галактик на начальном этапе развития.

Излучение среднего квазара в несколько десятков и сотен раз сильнее, чем излучение крупной галактики, содержащей многие миллионы звезд. Кроме оптического, инфракрасного, ультрафиолетового излучений, они испускают потоки быстрых элементарных частиц – *космических лучей*, которые, распространяясь в магнитных полях, создают радиоизлучение квазара.

Существуют разные модели, объясняющие источник такого мощного излучения. По одной из них излучение возникает в процессе поглощения черной *дырой звезд* галактического центра. Но ни одна из моделей не может объяснить всех наблюдаемых свойств квазаров. Загадочными остаются также происхождение и эволюция квазаров.

5. Главным методом измерения внегалактических расстояний является *метод стандартной свечи*, заключающийся в следующем: выбирается класс объектов с известной (либо легко вычисляемой) *мощностью излучения L (светимостью)*. С помощью астрономических инструментов *измеряется поток излучения J* от этого объекта на Земле.

Поток излучения от объекта падает обратно пропорционально квадрату расстояния до него. Если светимость L известна, то, измерив яркость, можно рассчитать расстояние.

Сравнивая наблюдаемую яркость эталонных объектов (или стандартных свечей, как говорят астрономы) в разных галактиках, можно определить расстояния до этих галактик, если известно расстояние до одной из галактик.

Для близких галактик, разрешимых на звезды (до 25 Мпк), в качестве «стандартной свечи» целесообразно использовать ярчайшие звезды (голубые и красные сверхгиганты). Такие звезды представляют интерес еще и как предельные по массе и светимости образцы звезд. Ярчайшие голубые сверхгиганты различимы при современном уровне наблюдений до $m - M = 34^m$ (т.е. до 60 Мпк). Физические причины существования предела светимости у красных сверхгигантов не до конца ясны, хотя наличие этого предела установлено эмпирически. Красные сверхгиганты также используют для проверки теории эволюции массивных звезд. Абсолютные болометрические звездные величины красных сверхгигантов порядка $-9,5^m$.

Для оценки расстояния до галактик использовали ярчайшие звезды. Существует зависимость между абсолютной звездной величиной ярчайших сверхгигантов и светимостью их родительской галактики. Вид этой зависимости различен для голубых и красных сверхгигантов. При использовании ярчайших звезд, как и при любом другом методе, основанном на небольшом числе экстремальных объектов в галактиках, необходимо учитывать эффекты селекции.

Галактики бывают двойными, кратными, образуют скопления и сверхскопления. Наша Галактика входит в *Местную группу* примерно из 50 галактик, вокруг имеется примерно 50 таких же скоплений. В сверхскоплении Девы, например, содержится 30 000 галактик, расстояние до него – 55 млн световых лет.

**Вопросы**

1. Какие объекты входят в состав нашей Галактики? Какова структура нашей Галактики?
2. Как проявляет себя межзвездная среда? Из чего она состоит?
3. Каковы существующие типы галактик и особенности их форм?
4. Какие галактики называются радиогалактиками? Какие объекты называются квазарами? В чем заключается их особенность?
5. Каким методом и как измеряются внегалактические расстояния?

**Задание (экспериментальное исследование)**

Смоделируйте движение спиральной галактики. Наполните высокую емкость на $\frac{3}{4}$ водой. Вырежьте дыроколом 20 кружков из листа бумаги. Поместите бумажные кружки на поверхность воды. Быстро помешайте воду круговыми движениями с помощью карандаша. Посмотрите на воду сбоку сразу после помешивания. Понаблюдайте вращение бумажных кружков, образовавших в центре спиральную структуру.

**Задание (практическое исследование)**

Рассчитайте освещенность лампочек мощностью 25 Вт и 100 Вт на расстоянии 1 м и 2 м соответственно. Проведите аналогию результатов данного вычисления с методом стандартной свечи.

§ 11.6**Вселенная**

1. На протяжении веков разные космологические модели сменяли друг друга, но считалось абсолютно незыблемым, что Вселенная бесконечна во времени и пространстве. Звездное небо над головой являлось символом вечности и неизменности.

Вселенная – безграничная во времени и пространстве объективная действительность, в которой материя в процессе своего развития принимает бесконечно разнообразные формы.

Наблюдаемая Вселенная – понятие в космологии, описывающее часть Вселенной, являющуюся абсолютным прошлым относительно наблюдателя. С точки зрения пространства это область, из которой материя (в частности, излучение и, следовательно, любые сигналы) успела бы за время существования Вселенной достичь нынешнего местоположения (в случае человечества – современной Земли), то есть быть наблюдаемой. Границей наблюдаемой Вселенной является космологический горизонт, объекты на нем имеют бесконечное красное смещение. Число галактик оценивается более чем в 500 млрд.

Часть наблюдаемой Вселенной, доступной для изучения современными астрономическими методами, называется Метагалактикой.

За пределами Метагалактики располагаются гипотетические внеметагалактические объекты.

2. В XX веке стали известны два экспериментальных факта, подтверждающих **расширение Вселенной**: *красное смещение, реликтовое излучение.*

В 1922 году советский ученый А. А. Фридман показал на основе общей теории тяготения А. Эйнштейна, что Вселенная не может быть стационарной. Американский астроном Весто Слайдер в 1912 году обнаружил красное смещение в спектрах галактик, это означало, что галактики от нас удаляются.

В 1929 году, исходя из наблюдений спектров галактик, американский астроном Эдвин Хаббл сформулировал закон. **Скорости удаления галактик возрастают пропорционально расстоянию до них:**

$$v = HR, \quad (11.10)$$

где H – постоянная Хаббла.

Этот закон получил название **закона Хаббла**.

Постоянная Хаббла в настоящее время принимается равной $H = 66,93 \pm \pm 0,62$ (км/с)/Мпк.

Время расширения Хаббла (вероятно, близкое ко времени расширения нашей Вселенной) $t_H = \frac{1}{H} = 14$ миллиардов лет, а расстояние Хаббла (условный размер Вселенной) $R = \frac{c}{H} = 4\,300$ Мпк.

В настоящее время красные смещения измерены у сотен тысяч галактик. Самые далекие из них находятся на расстоянии 12 миллиардов световых лет.

Расширение Вселенной – это крупномасштабный процесс, ход которого, по сути, определяет ход ее эволюции: из-за расширения средняя температура падает, определяя, как долго и с какой скоростью будет идти первичный нуклеосинтез, на фоне расширения происходит и развитие флуктуаций, фрагментов материи, которые затем должны стать галактиками, и т.д.

Экспериментально установленное расширение Вселенной проявляется в виде красного смещения спектральных линий удаленных галактик в соответствии с законом Хаббла, а также в виде удлинения времени видимого протекания различных процессов в них (длительность вспышек сверхновых и других).

Закон Хаббла вовсе не означает, что наша Галактика является центром, от которого и идет расширение. В любой точке Вселенной наблюдатель увидит ту же самую картину: все галактики имеют красное смещение, пропорциональное расстоянию до них. Поэтому иногда говорят, что расширяется само пространство. Это, естественно, следует понимать условно: галактики, звезды, планеты и мы с вами не расширяемся.

В настоящее время принято считать, что разбегание галактик, связанное с общим расширением окружающей нас части Вселенной, есть результат **Большого Взрыва**.

3. Наличие **красного смещения** у галактик позволяет с большой точностью определять расстояния до них. Чем сильнее смещены линии в спектре галактик, тем дальше галактика (рис. 11.6.1). Этот метод определения расстояний до галактик основан на хорошо известном в физике **эффекте Доплера**.

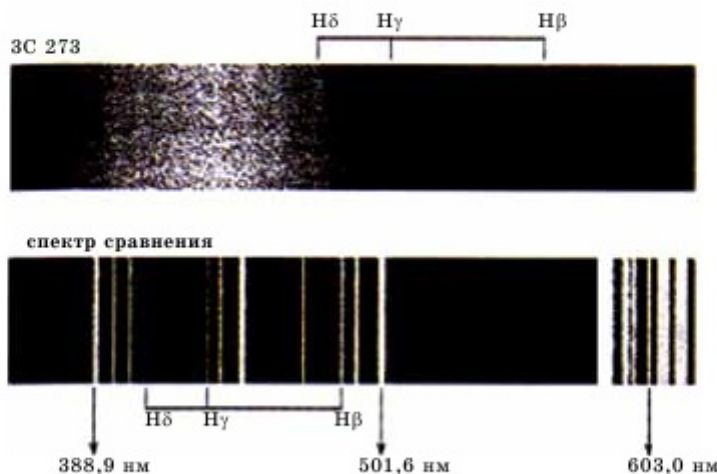


Рис. 11.6.1. Смещение линии в спектре галактик

Галактика является источником электромагнитных колебаний. Если этот источник движется относительно наблюдателя, то частота колебаний в системе координат наблюдателя будет меняться согласно эффекту Доплера на величину, зависящую от отношения скорости движения источника к скорости света. При удалении источника частота его излучения (колебаний) уменьшается, при приближении – увеличивается.

Если пользоваться не частотой, а длиной волны, то в системе координат наблюдателя излучение источника будет описываться формулой

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (11.11)$$

где $\Delta\lambda = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ – изменение длины волны; v – скорость удаления галактики; c – скорость света; λ_0 – длина волны лабораторного, неподвижного источника. С другой стороны, скорость удаления галактики определяется и по закону Хаббла:

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = HR, \quad (11.12)$$

где H – постоянная Хаббла; R – расстояние до галактики. Зная величину красного смещения $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, например, для какой-нибудь галактики, мы можем определить расстояние до нее.

Некоторые квазары имеют большое красное смещение: обнаружен даже квазар с $z = 5,82$. Такие объекты удаляются со скоростью, близкой к скорости света. Обычная формула Доплера здесь уже не применима.

В таких случаях пользуются формулой из специальной теории относительности:

$$z = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (11.13)$$

Определенная по этой формуле скорость квазара при любом красном смещении будет меньше скорости света.

4. Вселенная расширяется из начального сверхплотного и сверхгорячего состояния в результате так называемого **Большого Взрыва**.

Большой Взрыв – *общепринятая космологическая модель, описывающая раннее развитие Вселенной, а именно начало расширения Вселенной, перед которым Вселенная находилась в сингулярном состоянии.*

Космологическая сингулярность – *состояние Вселенной в начальный момент Большого Взрыва, характеризующееся бесконечной плотностью и температурой материи.*

Космологическая сингулярность является одним из примеров гравитационных сингулярностей, предсказываемых общей теорией относительности и некоторыми другими теориями гравитации.

По современным представлениям, наблюдаемая нами сейчас Вселенная возникла почти 14 млрд лет назад из некоторого начального сингулярного состояния и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается (рис. 11.6.2). Согласно известным ограничениям по применимости современных физических теорий, наиболее ранним моментом, допускающим описание, считается момент **Планковской эпохи** с температурой примерно 10^{32} К и плотностью около 10^{93} г/см³.

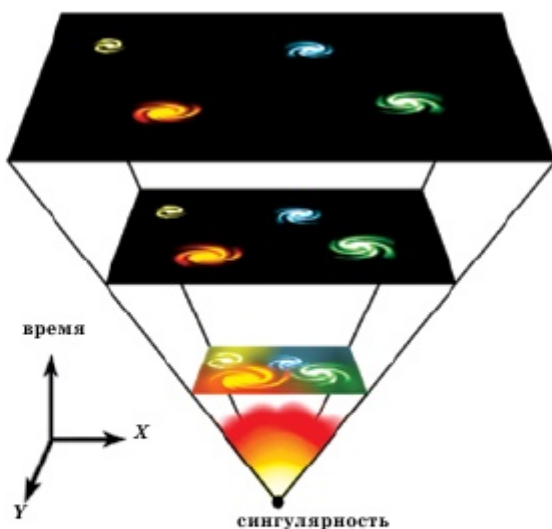


Рис. 11.6.2. Возникновение Вселенной после Большого Взрыва

В период времени от нуля до 10^{-43} секунд после Большого Взрыва происходили процессы рождения Вселенной из сингулярности. Считается, что при этом температура и плотность вещества Вселенной были близки к планковским значениям. По окончании этого этапа гравитационное излучение отделилось от вещества.

Приблизительно через 10^{-42} секунд после момента Большого Взрыва фазовый переход вызвал экспоненциальное расширение Вселенной. Данный период получил название **Космической инфляции** и завершился через 10^{-36} секунд после момента Большого Взрыва.

После окончания этого периода строительный материал Вселенной представлял собой *кварк-глюонную плазму*. По прошествии некоторого времени температура упала до значений, при которых стал возможен следующий фазовый переход, называемый *бариогенезисом*. На этом этапе кварки и глюоны объединились в барионы, такие как протоны и нейтроны. При этом одновременно происходило асимметричное образование как материи, так и антиматерии, которые взаимно аннигилировали, превращаясь в излучение.

Дальнейшее падение температуры привело к следующему фазовому переходу – образованию *физических сил и элементарных частиц* в их современной форме. После чего наступила *эпоха нуклеосинтеза, при которой протоны, объединяясь с нейтронами, образовали ядра дейтерия, гелия-4 и еще нескольких легких изотопов*. После дальнейшего падения температуры и расширения Вселенной наступил следующий переходный момент, при котором гравитация стала доминирующей силой. *Через 380 тысяч лет после Большого Взрыва температура снизилась настолько, что стало возможным существование атомов водорода (до этого процессы ионизации и рекомбинации протонов с электронами находились в равновесии).*

На этом периоде *материя Вселенной стала прозрачной для излучения водородоподобных атомов, которое, свободно распространяясь в пространстве, дошло до нас в виде реликтового излучения.*

Существуют различные модели Вселенной, среди которых *модель горячей Вселенной* считается более приемлемой для описания возникновения *реликтового излучения*.

Модель горячей Вселенной – космологическая модель, в которой эволюция Вселенной начинается с состояния плотной горячей плазмы, состоящей из элементарных частиц, и протекает при дальнейшем адиабатическом космологическом расширении.

Впервые модель горячей Вселенной рассматривалась в 1947 году советским и американским ученым Г. А. Гамовым. Наиболее существенное предсказание, вытекающее из модели горячей Вселенной, – это наличие в космическом пространстве **реликтового излучения** со спектром, очень близким к спектру абсолютно черного тела; это излучение возникало на ранней стадии расширяющейся видимой Вселенной в момент рекомбинации ионов (в основном водорода и гелия) и электронов в нейтральные атомы.

Реликтовое излучение является одним из компонентов общего фона космических электромагнитных излучений. Оно равномерно распределено по небесной сфере и по интенсивности соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела при температуре около 3 К. Наличие реликтового излучения во Вселенной было обнаружено американскими учеными А. Пензиасом и Р. Уилсоном в 1965 году. За это открытие в 1978 году они получили Нобелевскую премию.

Свойства реликтового излучения хорошо согласуются с гипотезой Г. А. Гамова о горячей модели Вселенной, согласно которой плазма и электромагнитное излучение на ранних стадиях расширения Вселенной обладали высокой плотностью и температурой 10^9 К и выше. В результате расширения Вселенной температура горячей плазмы и находящегося с ней в термодинамическом равновесии излучения падала. При температуре около 4000 К произошла рекомбинация протонов и электронов, после чего равновесие образовавшегося нейтрального вещества (водорода и гелия) с излучением нарушилось. Вследствие этого кванты излучения уже не обладали необходимой для ионизации вещества энергией, и они проходили через него как через прозрачную среду. Температура обособившегося излучения продолжала снижаться и к нашей эпохе составила около трех градусов Кельвина (3 К). Таким образом, это излучение сохранилось до наших дней как *реликт* от эпохи рекомбинации и образования нейтральных атомов водорода и гелия после Большого Взрыва.

5. Критическая плотность Вселенной – величина массовой плотности материи (энергии) Вселенной, от которой зависят глобальные геометрические свойства Вселенной в космологических моделях. В свою очередь, величина критической плотности Вселенной ρ_c зависит от значения постоянной Хаббла H :

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}, \quad (11.14)$$

где H – постоянная Хаббла; G – гравитационная постоянная.

При записи критической плотности (и других космологических параметров) часто используют безразмерную постоянную Хаббла h , определенную как $h = H/(100 \text{ (км/с)/Мпк})$. В этих обозначениях критическая плотность Вселенной составляет:

$$\rho_c = 1,88 \cdot 10^{-26} h^2 \text{ кг/м}^3 = 1,05 \cdot 10^{-5} h^2 \text{ ГэВ/см}^3,$$

где H и h зависят от времени, остальные коэффициенты в этих выражениях не зависят от времени.

С учетом того, что масса нуклона (и масса атома водорода) примерно равна 0,94 ГэВ, **критическая плотность соответствует 5,5 атома водорода на кубический метр.**

По полученным данным, наблюдаемая Вселенная является плоской. Исходя из этого, согласно модели Фридмана, средняя плотность Вселенной равна критической: $\rho = \rho_c$ с точностью порядка 1%. Однако **барионная (обычная, доступная прямым наблюдениям) материя дает в эту плотность довольно малый вклад: лишь $(4,54 \pm 0,01)\%$, или 0,25 атома водорода на кубический метр.**

Следовательно, логично принимать, что основной вклад в критическую плотность Вселенной вносят два других компонента, которые были названы *темной материей* (26,8%) и *темной энергией* (68,3%). Вклад релятивистских частиц, то есть фотонов микроволнового фона крайне мал: 0,0050%.

Темная материя – гипотетическая форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним.

Это свойство данной материи затрудняет и, возможно, даже делает невозможным ее прямое наблюдение.

Вывод о существовании темной материи сделан на основании многочисленных согласующихся друг с другом, но косвенных признаков поведения астрофизических объектов и по создаваемым ими гравитационным эффектам. Выяснение природы темной материи поможет решить проблему скрытой массы, которая, в частности, заключается в аномально высокой скорости вращения внешних областей галактик.

Темная энергия – гипотетический вид энергии, введенный в математическую модель Вселенной ради объяснения наблюдаемого ее расширения с ускорением.

Существует три варианта объяснения сущности темной энергии; согласно первому варианту *темная энергия есть космологическая константа* – неизменная энергетическая плотность, равномерно заполняющая пространство Вселенной (другими словами, постулируется ненулевая энергия и давление вакуума).

К настоящему времени все известные надежные наблюдательные данные не противоречат первой гипотезе, так что она принимается в космологии как стандартная. Темпы расширения Вселенной описываются космологическим уравнением состояния. Разрешение уравнения состояния для темной энергии является одной из самых насущных задач современной наблюдательной космологии.

Наряду с космологическим красным смещением реликтовое излучение рассматривается как одно из главных подтверждений теории Большого Взрыва.



Дополнительный материал

В 2019 году канадец Джеймс Пиблз и швейцарцы Мишель Майор и Дидье Кело получили Нобелевскую премию по физике. Они удостоены награды за исследования в области астрономии.

Джеймс Пиблз стал лауреатом за теоретические исследования в физической космологии. Он был одним из первых, кто предсказал существование реликтового излучения, заполнившего Вселенную после Большого Взрыва.

Мишель Майор и Дидье Кело получили награду за открытие в 1995 году первой экзопланеты – планеты, находящейся вне Солнечной системы. Обнаруженное ими небесное тело вращалось вокруг звезды 51 Pegasi – было установлено, что эта звезда такого же типа, как Солнце. С тех пор больше четырех тысяч экзопланет были обнаружены учеными в Млечном Пути.

**Вопросы**

1. Какой смысл вкладывается в такие понятия, как Вселенная, наблюдаемая Вселенная и Метагалактика?
2. Как формулируется закон Хаббла? Как оцениваются по закону Хаббла условный размер Вселенной и ее возраст?
3. Как по красному смещению галактик устанавливается их разбегание (расширение) и расстояние до них?
4. Как описывается возникновение и эволюция Вселенной после Большого Взрыва?
5. На каком этапе расширения Вселенной образуется реликтовое излучение? Что оно собой представляет? Какой моделью описывается?
6. Чему равна критическая плотность Вселенной? На основании каких данных ученые утверждают о существовании темной массы и темной энергии? Что они собой представляют?

**Задание (экспериментальное исследование)**

Рассмотрите процесс движения галактик. Используйте для этого круглый шар диаметром 23 см, черный маркер и зеркало. Надуйте шар до размеров яблока. С помощью черного маркера нанесите на шар произвольно 20 точек. Встаньте перед зеркалом и наблюдайте за точками при надувании шара. Сделайте вывод по своим наблюдениям. Были ли точки, которые удалялись? Или сближались?

Работа в группах

Учащиеся разделяются на две группы. Первой группе следует продемонстрировать различные точки зрения об ускорении Вселенной и темной энергии, а второй – различные гипотезы о расширении Вселенной. Каждая группа, основываясь на астрономических наблюдениях, готовит материал в виде презентации, таблицы, видеоролика.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Относительное красное смещение квазара 3С-9 равно $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = 2$. Определите значение скорости для данного объекта. Почему в данном случае нельзя применить формулу $z = \frac{v}{c}$?

Дано:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = 2$$

 $v = ?$

Решение:

Формула $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ применяется при скоростях объектов, далеких от скорости света.

При больших скоростях, сравнимых со скоростью света, имеем

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1.$$

Обозначив $\frac{v}{c} = \beta$, с учетом условия задачи получим $\frac{1+\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 = 2$. Преобразовав, получим следующее квадратное уравнение:

$$10\beta^2 + 2\beta - 8 = 0,$$

решая которое, находим $\beta = 0,8$ (очевидно, что отрицательное решение нам не подходит). Таким образом, $\beta = \frac{v}{c} = 0,8$ и $v = 0,8c$.

Произведем вычисление:

$$v = 0,8 \cdot 3 \cdot 10^8 = 2,4 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}.$$

О т в е т: $v = 2,4 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

При решении задач данного параграфа учтем, что постоянная Хаббла $H = 66,9 \text{ (км/с)/Мпк}$.

Уровень А

- 11.6.1. На каком расстоянии от нас находится галактика, если скорость ее удаления составляет $2 \cdot 10^4 \text{ км/с}$? (Ответ: 299 Мпк.)
- 11.6.2. Какова скорость удаления галактики, находящейся от нас на расстоянии $3 \cdot 10^8 \text{ пк}$? (Ответ: $2 \cdot 10^4 \text{ км/с}$.)
- 11.6.3. Можно ли увидеть на небе невооруженным глазом Туманность Андромеды, если расстояние до нее составляет $5 \cdot 10^5 \text{ пк}$, а линейный диаметр – $3,5 \cdot 10^4 \text{ пк}$? Разрешающая способность глаза составляет $2'$. (Ответ: можно.)
- 11.6.4. Каково расстояние до галактики, если в ней обнаружена новая звезда, видимая звездная величина которой $+18$, а абсолютная звездная величина равна -7 ? (Ответ: 10^6 пк .)
- 11.6.5. Определите расстояние до галактики, если красное смещение в ее спектре соответствует скорости 10^4 км/с . (Ответ: 149 Мпк.)
- 11.6.6. Каков линейный диаметр галактики, если она видна под углом 1° , а расстояние до нее составляет $2,4 \cdot 10^5 \text{ пк}$? (Ответ: 4,2 кпк.)

Уровень В

- 11.6.7. Оцените массу галактики по расстоянию Солнца от центра галактики (8 кпк) и скорости его движения (250 км/с) по галактической орбите. (Ответ: $10^{11} M_{\text{Солнца}}$.)

Уровень С

- 11.6.8. Скопление галактик состоит из 10 000 одинаковых галактик с блеском 18^m каждая. Все скопление на земном небе имеет угловой диаметр 5° . Спектральные измерения показали, что красное смещение скопления составляет 0,1, а разность лучевых скоростей отдельных галактик и лучевой скорости скопления достигает $\pm 500 \text{ км/с}$. Определите вклад темной материи в массу скопления. Считайте, что все галактики состоят из звезд, похожих на Солнце. (Ответ: $\approx 90\%$.)

- 11.6.9. С самого края большой спиральной галактики, удаленной от нас на 2 Мпк и видимой на Земле «с ребра» как тонкая нить размером 1° , был получен радиосигнал, похожий на позывные далекой цивилизации. С помощью телескопа с фокусным расстоянием 2 м и дифракционной решетки с разрешением 0,5 нм/мм со целью, направленной вдоль оси галактики, был получен ее спектр. Линии в желто-зеленой части спектра (550 нм) оказались наклоненными под углом 5° к нормальному положению. В какую область галактики нужно послать ответный сигнал далекой цивилизации? Орбиты звезд вокруг центра галактики считать круговыми. (Ответ: $0,47^\circ$ к центру галактики.)

§ 11.7

Жизнь и разум во Вселенной. Освоение космоса и космические перспективы человечества

1. Нет никакого сомнения в том, что во Вселенной имеются жизнь и разум, находящиеся на разных стадиях своего развития. Свидетельством этого является наличие жизни и человеческого разума на планете Земля, относящейся к Солнечной системе нашей Галактики. Однако вопрос состоит в другом: есть ли жизнь вне нашей Земли? Только в нашей Галактике имеется более 200 млрд звезд со своей планетной системой; а таких галактик оказалось более 500 млрд, как это было установлено достижениями современной науки. В этой связи с давних пор людей интересовало наличие жизни вне Земли. Проведенные в этих целях исследования с помощью космической техники показали следующее:

- Меркурий лишен атмосферы и воды, температура $-170^\circ - +430^\circ$. Жизнь в известных нам формах невозможна.
- На поверхности Венеры плавится свинец ($t = +470^\circ\text{C}$), давление у поверхности в 95 раз выше, чем у поверхности Земли, содержится серная кислота – жизнь невозможна.
- Совершенно безжизненными выглядят Луна и астероиды.
- Неблагоприятны для жизни условия на Марсе – очень разреженная атмосфера, сильное ультрафиолетовое излучение, нет жидкой воды. Однако на детальных изображениях планеты видны следы водной эрозии, напоминающие овраги и сухие русла рек. Возможно, в далеком прошлом на поверхности Марса была вода и существовала жизнь. Ответить на этот вопрос можно



Сергей Павлович Королев (1906–1966) – советский ученый, конструктор ракетно-космических систем. Он является одним из основных создателей советской ракетно-космической техники, практической космонавтики. Под его руководством был осуществлен запуск первого искусственного спутника Земли и полет первого космонавта планеты Юрия Гагарина.

только после детального изучения марсианского грунта, доставка которого на Землю – сложная задача. Приборы посадочных блоков «Викингов» не обнаружили органического вещества в грунте Марса. Однако в определенных метеоритах, происхождение которых, как предполагают, марсианское (по химическому составу), обнаружили углеводороды.

- Много органических молекул в атмосферах планет-гигантов, но без наличия твердой поверхности жизнь там маловероятна.
- Спутник Юпитера – Европа, хотя и лишен атмосферы, но содержит, видимо, под ледяной поверхностью жидкую воду, где могут присутствовать какие-либо формы жизни, но обнаружить их очень сложно.

Таким образом, пока у нас нет доказательств, что жизнь в Солнечной системе существует где-либо за пределами Земли, хотя наши межпланетные зонды способны обнаружить признаки активной жизни на поверхности любых планет. Так, приемники аппарата «Галилео» зафиксировали сигналы наших радиои телестанций, что свидетельствует о присутствии на Земле технической цивилизации. Телекамера «Галилео» получила изображения Земли в узких диапазонах с зелеными участками, где происходит фотосинтез в растениях. Такой зеленой окраски не имеет ни одно другое тело Солнечной системы. Инфракрасный спектрометр «Галилео» зафиксировал в земной атмосфере наличие молекулярного кислорода и метана, что является признаком биологической активности на планете.

В настоящее время изучаются планетные системы других звезд (*экзопланеты*), прослушивается космическое пространство на многих частотах, в космос посылаются закодированная информация о жизни и цивилизации на Земле. Однако пока поиск внеземных цивилизаций не привел к положительным результатам.

2. Космическая эра началась 4 октября 1957 года. В этот день в СССР был совершен успешный запуск под руководством С. П. Королева первого спутника РН Р-7 (рис. 11.7.1).



Рис. 11.7.1. Первый искусственный спутник Земли

12 апреля 1961 года состоялся запуск космического корабля с первым космонавтом Земли Юрием Гагариным.

Необходимо отметить, что первый в мире космодром Байконур расположен в Казахстане. Именно с него стартовали ракеты с первым спутником и первым человеком – космонавтом Ю. Гагариным. Космодром Байконур основали в 1955 году. В настоящее время это не только первый, но и крупнейший в мире эксплуатируемый космодром (рис. 11.7.2).



Рис. 11.7.2. Космодром Байконур

16 июня 1963 года совершен первый в мире полет в космос женщины-космонавта Валентины Терешковой.

18 марта 1965 года Алексей Леонов совершил первый в истории выход человека в открытый космос.

20 июля 1969 года на поверхность Луны ступил первый человек – американский астронавт Нил Армстронг, в ходе лунной экспедиции корабля «Аполлон-11».

2–10 октября 1991 года работал в космосе в качестве космонавта-исследователя первый казах-космонавт Токтар Аубакиров.

Второй казах-космонавт Талгат Мусабаев побывал в космосе три раза – в качестве бортинженера и дважды командиром экипажа: с 1 июля по 4 ноября 1994 г., с 29 января по 25 августа 1998 г., с 28 апреля по 6 мая 2001 г.

Со 2 по 12 сентября 2015 года совершил космический полет в качестве бортинженера Айдын Аимбетов (рис. 11.7.3).

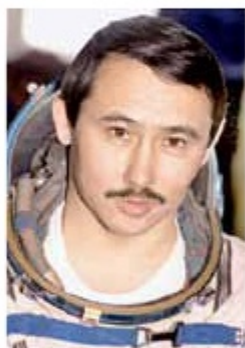


Рис. 11.7.3. Т. Аубакиров, Т. Мусабаев, А. Аимбетов

В настоящее время на орбите Земли побывало более 500 космонавтов из 36 государств мира. С 1998 года и по настоящее время на орбите летает международная орбитальная станция, находящаяся в совладении 15 государств.

3. Орбитальная станция – космический аппарат, предназначенный для длительного пребывания людей на околопланетной орбите с целью проведения научных исследований в условиях космического пространства, наблюдений за поверхностью и атмосферой планеты, астрономических наблюдений и т.п.

На околоземной орбите работает множество *искусственных спутников Земли* различного назначения (астрономические, метеорологические, военные, навигационные, спутники связи и др.). При этом в настоящее время становится актуальным вопрос об утилизации *космического мусора*, которого всего за неполные 60 лет освоения космоса скопилось достаточное количество на орбите.

Для изучения планет Солнечной системы к ним были отправлены автоматические межпланетные станции. Первой автоматической межпланетной станцией была «Луна-1» (1959 г.), пролетевшая вблизи Луны. Наиболее известными автоматическими межпланетными станциями являются аппараты серий «Вояджер», «Венера», «Луна», «Маринер», «Пионер», «Викинг», «Вега», а также аппараты «Галилео», «Кассини», «Новые горизонты».

В XXI веке человечество планирует доставку экспедиции на Марс, как первый шаг в колонизации Марса. Более близкая цель – прямое включение человеческого разума в исследование Марса как части окружающего мира.

Вопросами отправки людей на Марс занимается американская компания «SpaceX». Пока она построит свои космические корабли и соберет первых добровольцев для создания колонии к 2040 году на этой планете, NASA подготовит почву и узнает всю необходимую информацию для жизни на Красной планете. NASA планирует также построить на Луне поселение для 6–10 ученых до 2030 года, а японские ученые из космического агентства JAXA обещают, что до этого создадут на Луне базу с «умными» роботами.

Реализация межзвездного полета (путешествие между звездами космических пилотируемых кораблей или автоматических станций) – задача весьма актуальная. Однако аппаратов, прямым назначением которых был бы полет до ближайших звезд, на данный момент не создано и не запланировано.



Вопросы

1. Имеются ли во Вселенной жизнь и носители разума? Имеются ли условия для жизни в Солнечной системе? Что такое экзопланеты?
2. Когда и как для человечества началась космическая эра?
3. Как начались первые совместные шаги для изучения космоса? Каковы ближайшие и далекие перспективы человечества в исследовании космоса?

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 11

- **Звезда** – это массивное шарообразное плазменное образование, излучающее свет и тепло в результате протекания термоядерных реакций синтеза в его недрах.
- **Солнце** – типичная звезда, раскаленный плазменный шар. Диаметр равен 1 млн 390 тыс. км (или 109 диаметров Земли), масса – $1,98 \cdot 10^{30}$ кг (или 330 тыс. земных масс), средняя плотность – $1,41 \cdot 10^3$ кг/м³, что в 4 раза меньше средней плотности Земли.
- **Фотосфера** – видимая поверхность Солнца, являющаяся источником излучения.
- **Солнечная система** – планетная система, включающая в себя центральную звезду Солнце и все естественные космические объекты, вращающиеся вокруг Солнца.
- **Планетой** называют движущееся вокруг звезды в ее гравитационном поле небесное тело, имеющее форму, близкую к сферической, светящееся отраженным от звезды светом.
- **Галактика** – это гравитационно связанная система, состоящая из сотен миллиардов звезд и межзвездной среды.
- **Квезары** – самые яркие астрономические объекты, представляющие собой активные ядра галактик на начальном этапе развития.
- Часть наблюдаемой Вселенной, доступной для изучения современными астрономическими методами, называется **Метагалактикой**.
- **Большой Взрыв** – общепринятая космологическая модель, описывающая раннее развитие Вселенной, а именно начало расширения Вселенной.
- **Темная материя** – гипотетическая форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним.
- **Темная энергия** – гипотетический вид энергии, введенный в математическую модель Вселенной ради объяснения наблюдаемого ее расширения с ускорением.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Фундаментальные физические постоянные

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Элементарный электрический заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Вина	$b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Десятичные приставки к названиям единиц

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
пета	П	10^{15}	деци	д	10^{-1}
тера	Т	10^{12}	санتي	с	10^{-2}
гига	Г	10^9	милли	м	10^{-3}
мега	М	10^6	микро	мк	10^{-6}
кило	к	10^3	нано	н	10^{-9}
гекто	г	10^2	пико	п	10^{-12}
дека	да	10^1	фемто	ф	10^{-15}

Масса элементарных частиц (а.е.м.)

Протон	Нейтрон	Электрон
1_1P	1_0n	${}^0_{-1}e$
1,0072765 а. е. м.	1,0086649 а. е. м.	0,0005486 а. е. м.
$1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг	$1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг	$9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ РЕДЫ	ГРУППЫ																	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII										
1	H	He																
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni								
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd								
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt								
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds								
8	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
9	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

*Лантаноиды (Лантаноиды)
**Актиниоиды (Актиниоиды)

Массы некоторых изотопов (а. е. м.)

Изотоп	Масса нейтрального атома	Изотоп	Масса нейтрального атома
${}^1_1\text{H}$ (водород)	1,00783	${}^{15}_7\text{N}$ (азот)	15,00011
${}^2_1\text{H}$ (дейтерий)	2,01410	${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)	15,003065
${}^3_1\text{H}$ (тритий)	3,01605	${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)	15,99491
${}^3_2\text{He}$ (гелий)	3,01602	${}^{17}_8\text{O}$ (кислород)	16,99913
${}^4_2\text{He}$ (гелий)	4,00260	${}^{27}_{13}\text{Al}$ (алюминий)	26,98146
${}^6_3\text{Li}$ (литий)	6,01513	${}^{28}_{13}\text{Al}$ (алюминий)	27,9819103
${}^7_3\text{Li}$ (литий)	7,01601	${}^{28}_{14}\text{Si}$ (кремний)	27,9769265
${}^8_4\text{Be}$ (бериллий)	8,00531	${}^{234}_{92}\text{U}$ (уран)	234,0409521
${}^{10}_5\text{B}$ (бор)	10,01294	${}^{235}_{92}\text{U}$ (уран)	235,0439299
${}^{11}_5\text{B}$ (бор)	11,00931	${}^{236}_{92}\text{U}$ (уран)	236,0455680(20)
${}^{12}_6\text{C}$ (углерод)	12,00000	${}^{237}_{92}\text{U}$ (уран)	237,0487302
${}^{13}_6\text{C}$ (углерод)	13,0033548	${}^{238}_{92}\text{U}$ (уран)	238,0507882
${}^{18}_7\text{N}$ (азот)	13,0057386	${}^{239}_{92}\text{U}$ (уран)	239,0542933
${}^{14}_7\text{N}$ (азот)	14,00307		

Астрономические величины

Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22}$ кг
Радиус Земли	$6,378 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,976 \cdot 10^{24}$ кг

Зависимость продолжительности жизни звезды от ее массы

Масса звезды, в массах Солнца	Время жизни, лет
50	3–5 млн
10	30 млн
1,5	3 млрд
1,0	10 млрд
0,1	1 трлн

Абсолютная звездная величина (M) – видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк $M = m + 5 - 5lgr$, где m – видимая звездная величина, r – расстояние до звезды в парсеках (пк).

Атомно-силовой микроскоп – микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины ван-дер-ваальсовой силы взаимодействий между атомами образца и зонда.

Большой Взрыв – общепринятая космологическая модель, описывающая раннее развитие Вселенной, а именно начало расширения Вселенной.

Гамма-излучение – следствие явлений, происходящих внутри атомных ядер, а также в результате ядерных реакций. Гамма-излучение составляют электромагнитные волны с длиной волны меньше 10^{-2} нм, что соответствует энергии квантов больше 0,1 МэВ.

Годичный параллакс (π) – угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты a ($a = 1$ а. е.), перпендикулярный лучу зрения.

Графен – монослой атомов углерода.

Закон Хаббла: скорости удаления галактик возрастают пропорционально расстоянию до них:

$$v = HR.$$

Космологическая сингулярность – состояние Вселенной в начальный момент Большого Взрыва, характеризующееся бесконечной плотностью и температурой вещества.

Критическая масса – минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления цепной реакции.

Критические размеры – минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной реакции.

Метагалактика – часть наблюдаемой Вселенной, доступной для изучения современными астрономическими методами.

Модель горячей Вселенной – космологическая модель, в которой эволюция Вселенной начинается с состояния плотной горячей плазмы, состоящей из элементарных частиц, и протекает при дальнейшем адиабатическом космологическом расширении.

Наноматериал – предмет, состоящий из наночастиц и наноэлементов (кристаллитов, зёрен).

Наноробот – робот, созданный из наноматериалов размером, сопоставимым с молекулой; он обладает функциями движения, обработки, передачи информации и исполнения программ.

Нанотехнология – техника манипуляции на уровне отдельных атомов и молекул.

Низший энергетический уровень – это основное состояние атома, а все остальные состояния называются **возбужденными**.

Период полураспада – время, в течение которого распадается половина первоначального числа атомных ядер.

Поглощенная доза излучения – отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества: $D = \frac{E}{m}$.

Радиоактивностью называют способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц.

Расширение Вселенной – это крупномасштабный процесс, ход которого, по сути, определяет ход ее эволюции.

Реликтовое излучение (микроволновое фоновое излучение) – космическое электромагнитное излучение с высокой степенью изотропности и со спектром, характерным для абсолютно черного тела с температурой $2,72548 \pm 0,00057$ К.

Сканирующий туннельный микроскоп – микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины электронного тока между атомами зонда и токопроводящего образца.

Спектральный анализ – метод определения химического состава вещества по его спектру.

Темная материя – гипотетическая форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним.

Темная энергия – гипотетический вид энергии, введенный в математическую модель Вселенной ради объяснения наблюдаемого ее расширения с ускорением.

Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон.

Фуллерен – стабильная молекула сферической формы, состоящая из 60 атомов углерода.

Фотозффект – явление вырывания электронов из вещества под действием света.

Цепная реакция деления – ядерная реакция, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции.

Ядерные реакции – превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

1. Акылбеков А., Ермекова Ж., Даулетбекова А. Физика. – Астана: Фолиант, 2015. – 440 с.
2. Астрономия. История, теории и практики. Большая научная энциклопедия. – М.: АСТ, 2019. – 224 с.
3. Бендриков Г. А., Буховцев Б. Б., Керженцев В. В., Мякишев Г. Я. Задачи по физике для поступающих в вузы. – М.: МГУ, 1968. – 336 с.
4. Воробьев И. И., Зубков П. И., Кутузова Г. А., Савченко О. Я., Трубачев А. М., Харитонов В. Г. Задачи по физике. – М.: Наука, 1988. – 416 с.
5. Вселенная на ладони. Колин Стюарт. – М.: Эксмо, 2019. – 352 с.
6. Гампсон В., Шеффер К. Парадоксы природы: Книга в помощь юношеству для объяснения явлений, по-видимому, противоречащих повседневному опыту. – Либроком, 2010. – 200 с.
7. Гарднер М. Теория относительности для миллионов. – Либроком, 2010. – 240 с.
8. Глазами физика. Путешествие от края радуги к границе времени. Уолтер Левин и Уоррен Гольдштейн. – Изд-во: Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 352 с.
9. Гинзбург В. Л., Левин Л. М., Сивухин Д. В., Четверикова Е. С., Яковлев И. А. Сборник задач по общему курсу физики. Оптика. М., 1977. – 320 с.
10. Гольдфарб Н. И. Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Высшая школа, 1973. – 352 с.
11. Квантовая Вселенная. Как устроено то, что мы не можем видеть. Брайан Кокс и Джефф Форшоу. Изд-во: Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 288 с.
12. Косов В. Н., Красиков С. А. Численное моделирование на уроках физики. – Алматы: Алматыкітап, 2015. – 240 с.
13. Московкина Е. Г., Волков В. А. Сборник задач по физике. – М.: ВАКО, 2017. – 320 с.
14. Оськина В. Т. Физика и астрономия. 9–11 классы: олимпиадные задания. – Волгоград.: Учитель, 2011. – 143 с.
15. Романова В. В. Астрономия. Практикум. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2016. – 112 с.
16. Рымкевич А. П. Физика. Задачник. 10–11 кл. Пособие для общеобразоват. учеб. заведений. – 6-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2002. – 192 с.
17. Сборник задач по курсу общей физики/Под редакцией Цедрика М. С. – М.: Просвещение, 1989. – 271 с.
18. Сборник задач и вопросов по физике/Под общей редакцией Жданова Л. С. – М.: Наука, 1974. – 368 с.
19. Трофимова Т. И., Фирсов А. В. Курс физики с примерами решения задач. Том 1. – М.: Кнорус, 2010. – 584 с.
20. Уокер Дж. Физический фейерверк. – М.: Мир, 1989. – 298 с.
21. Физика. 11 кл. Проф. уровень – п.р. Пинского, Кабардина. – 2011. – 420 с. PDF (91,3 Мб).

22. Физика. Механика. 10 кл. Проф. уровень – под ред. Мякишева Г. Я.–2010. – 496 с. pdf (5,8 Мб).
23. Физика. Молекулярная физика. Термодинамика. 10 кл. Проф. ур – Мякишев Г. Я., Синяков А. З.–2010 – 352 с. pdf (4,4 Мб).
24. Физика. Оптика. Квантовая физика. 11 кл. (углубл. изуч.)_Мякишев Г. Я., Синяков А. З.–2002 – 464 с. djvu (8,7 Мб).
25. Физика. Электродинамика. 10–11 кл. Проф. уровень – Мякишев, Синяков, Слободсков – 2010 – 480 с. pdf (5,8 Мб).
26. Физика. Часть 2. Энциклопедия для детей. М. Аксенова. – М.: Аванта +, 2007.
27. Физика будущего. Митио Каку. – Изд-во: Альпина-нон-фикшн, 2018. – 584 с.

Интернет-ресурсы

1. <https://fiz.1sept.ru/fizarchive.php> (Задачи, тесты; образовательные ресурсы; эксперимент.)
2. <http://www.edu.delfa.net/> (Тесты и задачи; это интересно.)
3. <http://www.eduspb.com> (Конспекты; библиотека/задачники; библиотека/литература по истории физики.)
4. <https://physics.ru/> (Учебник/Открытая Физика 2.6. Часть II 1. Электродинамика.)
5. <https://videouroki.net/> (Конспекты/физика/11 класс.)
6. <http://www.astronews.ru> (астрономические новости; астрофото; астрономический календарь; Луна онлайн).
7. <http://www.cosmoworld.ru> (новости космонавтики).
8. <https://www.elementy.ru/physics> (Большой адронный коллайдер; задачи; видеотека; 200 законов мироздания).

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 7. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	3
§ 7.1. Принцип относительности в механике и электродинамике	5
§ 7.2. Преобразования Лоренца	8
§ 7.3. Энергия, импульс и масса в релятивистской динамике	15
§ 7.4. Закон взаимосвязи массы и энергии для материальных тел	20
Краткие выводы главы 7	24
ГЛАВА 8. АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	25
§ 8.1. Виды излучений	28
§ 8.2. Спектры. Спектральные аппараты	31
§ 8.3. Спектральный анализ.....	34
§ 8.4. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения	36
§ 8.5. Тепловое излучение	40
§ 8.6. Законы Стефана – Больцмана и Вина. Ультрафиолетовая катастрофа ..	43
§ 8.7. Формула Планка. Фотоны	49
§ 8.8. Фотозффект. Применение фотозффекта	52
§ 8.9. Давление света	61
§ 8.10. Химическое действие света	65
§ 8.11. Рентгеновское излучение	66
§ 8.12. Единство корпускулярно-волновой природы света	70
§ 8.13. Модели атома. Опыт Резерфорда.....	72
§ 8.14. Линейчатый спектр атома водорода. Постулаты Бора. Опыты Франка – Герца	75
Лабораторная работа № 6. Наблюдение сплошного и линейчатого спектров излучения	82
§ 8.15. Понятие о нелинейной оптике. Лазеры.....	84
§ 8.16. Трудности теории Бора. Волновые свойства частиц. Волны де Бройля	90
Краткие выводы главы 8	93
ГЛАВА 9. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА	95
§ 9.1. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада.....	97
§ 9.2. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра. Изотопы	105
§ 9.3. Энергия связи нуклонов в ядре	107
§ 9.4. Ядерные реакции. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции	111
§ 9.5. Термоядерные реакции.....	118
Лабораторная работа № 7. Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям	123
§ 9.6. Ядерный реактор. Критическая масса. Ядерная энергетика.....	124
§ 9.7. Биологическое действие радиоактивных излучений. Искусственная радиоактивность. Защита от радиации.....	129
Краткие итоги главы 9.....	133

ГЛАВА 10. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ	135
§ 10.1. Нанотехнология и ее основные достижения	137
§ 10.2. Физические свойства наноматериалов и способы их получения.....	142
§ 10.3. Перспективы развития наноматериалов и их проблемы.....	147
Краткие выводы главы 10	152
ГЛАВА 11. КОСМОЛОГИЯ	153
§ 11.1. Мир звезд. Расстояние до звезд	155
§ 11.2. Эволюция звезд. Переменные звезды.....	161
§ 11.3. Солнце. Солнечно-земные связи.....	166
§ 11.4. Солнечная система	172
§ 11.5. Наша Галактика. Открытие других галактик. Квазары.....	180
§ 11.6. Вселенная	184
§ 11.7. Жизнь и разум во Вселенной. Освоение космоса и космические перспективы человечества	193
Краткие выводы главы 11	197
Приложение.....	198
Глоссарий	201
Список использованной литературы	203

Учебное издание

**Башарулы Рахметолла
Шункеев Куанышбек Шункеевич
Мясникова Людмила Николаевна
Жантурина Нургул Нигметовна
Бармина Александра Александровна
Аймаганбетова Зухра Куралиевна**

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса
естественно-математического направления
общеобразовательной школы

В двух частях

Часть 2

Зав. редакцией *Н. Жиенгалиев*

Редактор *Г. Хасенова*

Художественные редакторы *А. Лукманов, Д. Сабитаева*

Технический редактор *О. Рысалиева*

Слайды *А. Устищенко и др.*

Компьютерная верстка *А. Чагимкуловой*

Сдано в набор 25.05.019. Подписано в печать 15.07.2020. Формат 70×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Гарнитура «Школьная». Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,21. Уч.-изд. л. 12,12. Тираж 1500 экз. Заказ № 5178.

ТОО «Корпорация «Атамұра», 050000, г. Алматы, пр. Абылай хана, 75.

Полиграфкомбинат ТОО «Корпорация «Атамұра», Республика Казахстан, 050002,
г. Алматы, ул. М. Мақатаева, 41.



Оглавление

page1
page2
page3
page4
page5
page6
page7
page8
page9
page10
page11
page12
page13
page14
page15
page16
page17
page18
page19
page20
page21
page22
page23
page24
page25
page26
page27
page28

page34

page35

page36

page37

page38

page39

page40

page41

page42

page43

page44

page45

page46

page47

page48

page49

page50

page51

page52

page53

page54

page55

page56

page57

page58

page59

page60

page61

page62

page63

page64

page69
page70
page71
page72
page73
page74
page75
page76
page77
page78
page79
page80
page81
page82
page83
page84
page85
page86
page87
page88
page89
page90
page91
page92
page93
page94
page95
page96
page97
page98
page99

page104
page105
page106
page107
page108
page109
page110
page111
page112
page113
page114
page115
page116
page117
page118
page119
page120
page121
page122
page123
page124
page125
page126
page127
page128
page129
page130
page131
page132
page133
page134

page139

page140

page141

page142

page143

page144

page145

page146

page147

page148

page149

page150

page151

page152

page153

page154

page155

page156

page157

page158

page159

page160

page161

page162

page163

page164

page165

page166

page167

page168

page169

page174
page175
page176
page177
page178
page179
page180
page181
page182
page183
page184
page185
page186
page187
page188
page189
page190
page191
page192
page193
page194
page195
page196
page197
page198
page199
page200
page201
page202
page203
page204