

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса общественно-гуманитарного направления
общеобразовательной школы

11

Рекомендовано Министерством образования и науки
Республики Казахстан









Алматы «Атамұра» 2020

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72
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. обществ.-гуманит. направл. общеобразоват. шк./
Р. Башарулы, К. Ш. Шункеев, Л. Н. Мясникова, Н. Н. Жантурина,
А. А. Бармина, З. К. Аймаганбетова. – Алматы: Атамұра, 2020. – 224 с.

ISBN 978-601-331-722-9

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72

ISBN 978-601-331-722-9

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

ВВЕДЕНИЕ

Дорогие учащиеся!

В этом учебном году вы завершаете всеобщее обязательное образование и вступаете на самостоятельный жизненный путь. Этот путь интересен и тернист. В связи с этим нам хотелось бы напомнить три кратких, но сакрально емких напутствия, которые помогут вам в преодолении трудностей на этом долгом пути.

Во-первых, старайтесь следовать в жизни мудрому совету Конфуция – великого учителя Востока: *«Кто повторяет старое и узнает новое, тот может быть предводителем»*. Это напутствие имеет прямое отношение и к глубокому усвоению предмета физики. Ведь 80% материала данного учебника основывается на ваших знаниях, полученных по физике в средних классах, новый материал составляет не более 20%. Поэтому вам следует в обязательном порядке восстановить пробелы в своих знаниях, повторив пройденный материал. Это даст гарантию более легкого и успешного изучения материала данного учебника.

Во-вторых, извлеките для себя из мудрейших слов великого учителя Запада Аристотеля самые важные житейские выводы: *«Ум заключается не только в знании, но и в умении применять знание на деле»*. Это изречение также имеет прямое отношение и к глубокому изучению физики. Физика – это фундаментальная разносторонняя наука, поэтому только тот человек, который владеет и теорией, и практическими методами ее применения, может стать высококвалифицированным специалистом.

В-третьих, образовательный и учебно-воспитательный процессы будут по-новому организованы на основе коллективного обучения по принципу: *«Один – за всех, все – за одного»*. Те люди, которые скорее осознают глубину этого гуманистического принципа и будут реализовывать его в жизни, станут самыми успешными членами современного общества. Поэтому и вы, следуя этому принципу, старайтесь делиться своими знаниями и практическими навыками друг с другом. Такое коллективное взаимообучение станет гарантией интенсивного приобретения и знания, и практических навыков на высоком уровне, обеспечив каждому из вас достойное завершение средней школы.




Авторы

Глава 1



МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  исследовать гармонические колебания $[x(t), v(t), a(t)]$ экспериментально, аналитически и графически;
-  описывать условия возникновения свободных и вынужденных колебаний;
-  проводить аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
тербелістер	колебания	oscillation
механикалық тербелістер	механические колебания	mechanical oscillation
гармоникалық тербелістер	гармонические колебания	harmonic oscillation
серіппелі маятник	пружинный маятник	spring pendulum
математикалық маятник	математический маятник	mathematical pendulum
электрмагниттік тербелістер	электромагнитные колебания	electromagnetic oscillation
еркін тербелістер	свободные колебания	free oscillation
еріксіз тербелістер	вынужденные колебания	forced oscillation
тербелмелі контур	колебательный контур	oscillatory circuit

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «колебания», «механические колебания», «гармонические колебания», «пружинный маятник», «математический маятник», «электромагнитные колебания», «свободные колебания», «вынужденные колебания», «колебательный контур».

§ 1.1

Уравнения и графики гармонических колебаний

1. Колебаниями называются движения или процессы, обладающие в той или иной степени повторяемостью во времени.

Колебательные движения часто встречаются в природе и технике. Например, совершают колебания ветви деревьев, маятники часов, струны гитары, грузы на пружине, крылья насекомых во время полета, земная кора во время землетрясения, переменный электрический ток и т.д.

Колебательные явления различной физической природы подчиняются общим закономерностям. Различные колебательные процессы описываются одинаковыми характеристиками и одинаковыми уравнениями. Общность колебательных закономерностей позволяет рассматривать колебательные процессы различной природы с единой точки зрения.

2. В физике особенно выделяют колебания двух видов – механические и электромагнитные и их электромеханические комбинации, поскольку они чрезвычайно актуальны для жизнедеятельности человека.

Механические колебания, как и колебательные процессы любой другой физической природы, могут быть свободными и вынужденными. Свободные колебания совершаются под действием внутренних сил системы после того, как система была выведена из состояния равновесия. Колебания груза на пружине или колебания математического маятника являются свободными колебаниями (рис. 1.1.1). Колебания, происходящие под действием внешних, периодически изменяющихся сил, называются вынужденными.

Для колебаний характерно превращение одного вида энергии в другую – кинетической в потенциальную, магнитной в электрическую и т.д.

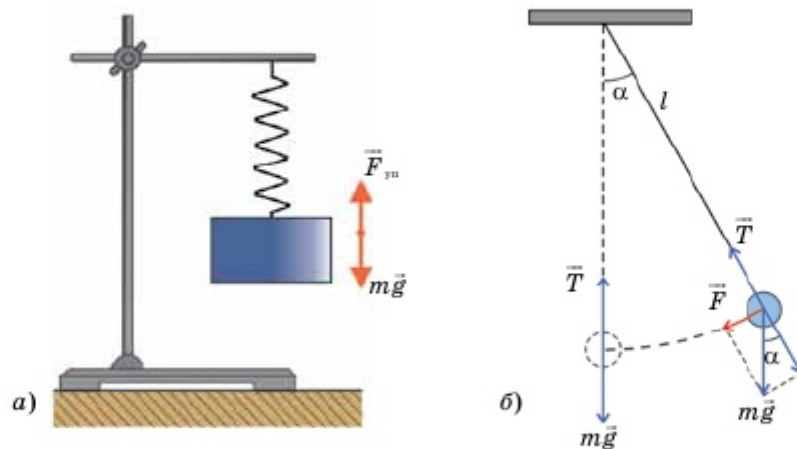


Рис. 1.1.1. Пружинный и математический маятники

Уравнение движения тела, совершающего колебания, задается с помощью некоторой периодической функции времени: $x = f(t)$.

Графическое изображение этой функции (рис. 1.1.2), конкретные уравнения которой представлены ниже, дает наглядное представление о протекании колебательного процесса во времени.

3. Простейшим видом колебательного процесса являются гармонические колебания.

Гармоническими колебаниями называются колебания, при которых физическая величина, характеризующая то или иное колебание, изменяется с течением времени по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ или } x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.1)$$

где x – любая физическая величина, характеризующая колебательный процесс; например, для переменного тока такими величинами служат напряжение или сила тока; для механического колебания такими величинами могут быть либо смещение тела от положения равновесия, либо его скорость или ускорение (рис. 1.1.2), а также другие физические величины; A – амплитуда колеблющейся величины; ω_0 – циклическая (круговая) частота колебаний; φ_0 – начальная фаза колебания в момент времени $t = 0$; $(\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебания в момент времени t . Фаза колебаний определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы (значение координаты, скорости и ускорения) в любой момент времени. Так как синус (косинус) изменяется в пределах от $+1$ до -1 , то x может принимать значения от $+A$ до $-A$.

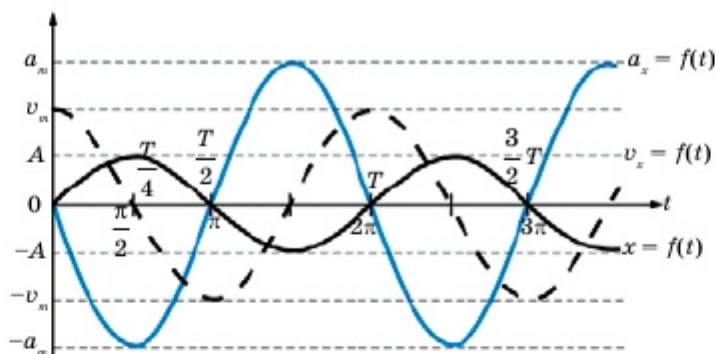


Рис. 1.1.2. Графики зависимости x , v_x и a_x от времени

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через равный промежуток времени, называемый **периодом колебания** (T):

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (1.2)$$

Единицей измерения периода в системе СИ является **секунда** (с).

Зная период, можно определить **частоту колебаний**, т.е. число полных колебаний за единицу времени (т.е. за 1 с):

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.3)$$

В системе СИ единицей измерения частоты является **герц** (Гц).

Сравнивая (1.2) и (1.3), получим циклическую частоту ω_0 , измеряемую в рад/с:

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

4. Найдем, как зависят от времени *скорость* и *ускорение* тела, совершающего гармонические колебания. *Проекция скорости* на ось OX определяется как производная смещения $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ по времени t :

$$v_x(t) = x'(t) = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (1.4)$$

Проекция ускорения на ось OX есть производная скорости по времени:

$$a_x(t) = v'(t) = x''(t) = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi). \quad (1.5)$$

Сравнивая выражения (1.1), (1.4) и (1.5), делаем следующий вывод. Во-первых, амплитуды, смещения, скорости и ускорения соответственно равны A ; $A\omega_0$ и $A\omega_0^2$.

Во-вторых, фаза скорости (1.4) отличается от фазы смещения (1.1) на $\frac{\pi}{2}$, а фаза ускорения (1.5) отличается от фазы смещения (1.1) на π .

Таким образом, как это наглядно видно из графика, скорость движения колеблющегося тела по фазе обгоняет его смещение на величину $\frac{\pi}{2}$, а величины смещения и ускорения колеблются в противофазе.

В-третьих, скорость колебаний тела максимальна и равна амплитуде скорости в момент прохождения через положение равновесия ($x = 0$). При максимальном смещении ($x = \pm A$) скорость равна нулю. Ускорение равно нулю при прохождении телом положения равновесия и достигает наибольшего значения, равного амплитуде ускорения при наибольших смещениях.

5. Примерами простых колебательных систем могут служить маятники. *Маятником* называют твердое тело, совершающее колебания под действием приложенной силы относительно точки равновесия, не совпадающей с центром массы тела.

Примерами систем, совершающих колебания, являются физический, пружинный и математический маятники, колебательный контур.

Физический маятник – это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси подвеса.

Пружинным маятником называют груз массой m , прикрепленный к пружине жесткостью k , второй конец которой закреплен неподвижно (рис. 1.1.1, а).

Экспериментально установленная циклическая (круговая) частота колебаний груза равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.6)$$

а период колебаний согласно (1.2) определяется *формулой Гюйгенса*:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1.7)$$

где k – коэффициент жесткости пружины; m – масса груза.

Математическим маятником называется материальная точка, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити. Это идеальная модель. В реальности можно

данную модель заменить телом небольших размеров, подвешенным на тонкой нерастяжимой невесомой нити длиной l (рис. 1.1.1, б).

Экспериментально установленная круговая частота математического маятника равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (1.8)$$

а период колебаний согласно (1.2) определяется *формулой Галилея*:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.9)$$

На математический маятник действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити \vec{T} (рис. 1.1.1, б). Результирующая этих сил \vec{F} и является той силой, под действием которой маятник совершает свободные гармонические колебания. При этом угол отклонения α не должен превышать 5° .

Дополнительный материал



Маятник Фуко является математическим маятником, плоскость колебаний которого медленно поворачивается относительно земной поверхности в сторону, противоположную направлению вращения Земли. Это явление послужило признанием того, что Земля вращается вокруг своей оси. В противном случае маятник колебался бы в одной и той же плоскости. Первая публичная демонстрация была осуществлена в марте 1851 года в Париже. Под куполом Пантеона Жан Бернар Леон Фуко подвесил металлический шар массой 28 кг с прикрепленным к нему острием на стальной проволоке длиной 67 м (рис. 1.1.3). Крепление маятника позволяло ему свободно колебаться во всех направлениях, под точкой крепления было сделано круговое ограждение диаметром 6 м, по краю ограждения была насыпана песчаная дорожка таким образом, чтобы маятник при своем движении мог, пересекая ее, прочерчивать на песке отметки. Чтобы избежать бокового толчка при пуске маятника, его отвели в сторону и привязали веревкой, после чего веревку пережгли. Период колебания маятника при такой длине подвеса составлял 16,4 секунды, при каждом колебании отклонение от предыдущего пересечения песчаной дорожки составляло около 3 мм, за час плоскость колебаний маятника поворачивалась более чем на 11° по часовой стрелке, то есть примерно за 32 часа совершала полный оборот и возвращалась в прежнее положение.



Рис. 1.1.3

**Вопросы**

1. Что такое колебания? Свободные колебания? Вынужденные колебания? Механические колебания? Гармонические колебания?
2. Какими уравнениями и параметрами (величинами) характеризуются гармонические колебания? Каковы их графики?
3. Что называется пружинным маятником? Что называется математическим маятником? Как определяются их периоды?
4. Какова физическая природа сил, вызывающих колебания пружинного маятника? Математического маятника?
5. Как, используя математический маятник, убедиться, что ускорение свободного падения в разных местах земной поверхности различно?

**Задание (экспериментальное исследование)**

1. Определите неизвестную массу тела m_1 , имея секундомер, пружину и другое тело известной массы m_2 .
2. Составьте алгоритм сравнения масс двух различных тел, подвесивая эти тела к пружине и измеряя частоты колебаний тел.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Уравнение колебаний материальной точки имеет вид $x = 0,06 \cos 100\pi t$. Чему равна амплитуда A , период T и частота колебаний ν этой точки? Найдите зависимость скорости и ускорения точки от времени. Найдите максимальную скорость и максимальное ускорение. Все величины выражены в единицах СИ.

<p>Дано:</p> $x = 0,06 \cos 100\pi t$	<p>Решение:</p> <p>Запишем уравнение гармонических колебаний в общем виде:</p> $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1)$ <p>Сопоставим это уравнение с уравнением, данным нам в условии задачи:</p> $x = 0,06 \cos 100\pi t. \quad (2)$
<p>$A = ?$ $T = ?$ $\nu = ?$</p> <p>$v = v(t) = ?$</p> <p>$a = a(t) = ?$</p> <p>$v_m = ?$ $a_m = ?$</p>	

Из сопоставления мы делаем вывод, что величина 0,06, стоящая в уравнении (2) между знаком равенства и косинусом, является амплитудой колебания, следовательно, $A = 0,06$ м, так как все величины даны в единицах СИ. Продолжая сравнивать уравнения (1) и (2), делаем вывод, что выражение, стоящее между \cos и временем t , равное 100π , является циклической частотой колебаний. Значит, $\omega_0 = 100\pi$ рад/с.

Циклическая частота колебаний ω связана с периодом колебаний T соотношением:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \text{ следовательно, } T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

$$\text{Вычислим } T: T = \frac{2\pi}{100\pi} = 0,02 \text{ (с)}.$$

Поскольку период T и частота колебаний ν – обратные величины, то

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ (Гц)}.$$

Продолжая сравнивать уравнения (1) и (2), делаем вывод, что начальная фаза колебаний материальной точки равна нулю: $\varphi_0 = 0$.

Чтобы найти зависимость скорости колебаний v от времени t , возьмем первую производную уравнения (2), поскольку скорость есть первая производная смещения точки x по времени t :

$$v = x' = (0,06 \cos 100\pi t)' = -100\pi \cdot 0,06 \sin 100\pi t = -6\pi \sin 100\pi t.$$

Мы знаем, что синус любого угла, в том числе и $\sin 100\pi t$, может изменяться от -1 до 1 . Когда он станет равен -1 , скорость достигнет своего максимального значения:

$$v_m = 6\pi = 6 \cdot 3,14 = 18,8 \text{ (м/с)}.$$

Чтобы найти зависимость ускорения точки от времени, нужно взять первую производную от скорости по времени. Получим:

$$a = v' = (-6\pi \sin 100\pi t)' = -100\pi \cdot 6\pi \cos 100\pi t = -600\pi^2 \cos 100\pi t.$$

Поскольку значение косинуса любого угла, в том числе и $\cos 100\pi t$, может изменяться только от -1 до 1 , то когда $\cos 100\pi t$ станет равен -1 , ускорение точки станет максимальным и равным $600\pi^2$. Следовательно,

$$a_m = 600\pi^2 = 600 \cdot 3,14^2 = 5,9 \cdot 10^3 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Ответ: $A = 0,06$ (м); $T = 0,02$ (с); $\nu = 50$ (Гц); $v = -6\pi \sin 100\pi t$;
 $v_m = 18,8$ (м/с); $a = -600\pi^2 \cos 100\pi t$; $a_m = 5,9 \cdot 10^3$ (м/с²).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 1.1.1. По графику (рис. 1.1.4) для тел А и В определите: 1) амплитуду колебаний; 2) период колебаний; 3) частоту колебаний; 4) уравнение координаты. (*Ответ:* 1) 2 см; 1 см; 2) 0,8 с; 0,4 с; 3) 1,25 Гц; 2,5 Гц; 4) $x_1 = 0,02 \sin 2,5\pi t$; $x_2 = 0,01 \sin 5\pi t$.)
- 1.1.2. Точка совершает гармонические колебания по закону $x = A \sin \omega t$. При этом амплитуда колебаний равна 5 см, частота – 2 с^{-1} , начальная фаза колебаний равна 0. Определите максимальную скорость точки. (*Ответ:* 0,628 м/с.)
- 1.1.3. Гирия массой 2 кг подвешена на пружине жесткостью 50 Н/м. Определите период свободных колебаний груза. (*Ответ:* 1,256 с.)

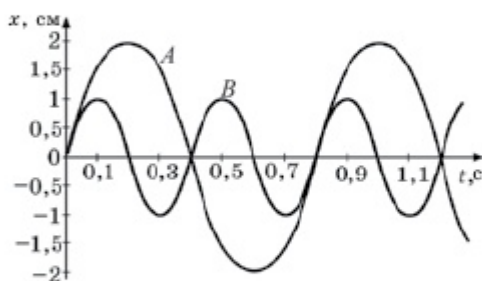


Рис. 1.1.4

Уровень В

- 1.1.4. Точка совершает гармонические колебания по закону $x = A \sin \omega t$. В некоторый момент времени смещение точки равно 5 см. При увеличении фазы колебаний вдвое смещение стало равным 8 см. Определите амплитуду колебаний. Учтем, что $\arccos 0,8 = 0,64$ и $\sin 0,64 = 0,6$. (Ответ: 8,3 см.)
- 1.1.5. Пружинный маятник совершает колебания с амплитудой 10 см. Масса тела равна 1 кг, коэффициент жесткости пружины равен 400 Н/м. Определите максимальную скорость тела. (Ответ: 2 м/с.)
- 1.1.6. Если длину нити математического маятника увеличить на 30 см, то период колебаний увеличится в 2 раза. Определите первоначальную длину нити. (Ответ: 10 см.)

§ 1.2**Свободные и вынужденные электромагнитные колебания**

1. Электромагнитными колебаниями называют взаимосвязанные колебания электрической напряженности (\vec{E}) и магнитной индукции (\vec{B}) единого электромагнитного поля.

Электромагнитные колебания на практике возбуждаются в колебательных контурах (рис. 1.2.1); поэтому периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения в таких контурах также называются *электромагнитными колебаниями*.

При электромагнитном колебании заряд q в каком-либо контуре совершает периодические гармонические колебания по закону:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1.10)$$

где q_m – амплитуда колебаний заряда конденсатора с циклической частотой ω_0 , которая называется *собственной частотой контура*:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.11)$$

Следовательно, период колебательного контура определяется по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (1.12)$$

Последнее выражение называют *формулой Томсона*, где L – индуктивность катушки; C – емкость конденсатора в контуре.

Сила тока в колебательном контуре определяется как производная заряда по времени:

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.13)$$

где $I_m = \omega_0 q_m$ – амплитудное значение силы тока. *Напряжение* на конденсаторе:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1.14)$$

где $U_m = \frac{q_m}{C}$ – амплитудное значение напряжения.

Из анализа выражений (1.10) и (1.13) следует, что колебания силы тока i опережают по фазе колебания заряда q на $\frac{\pi}{2}$: если сила тока достигнет максимального значения, то заряд конденсатора, как и напряжение, обращается в ноль, и наоборот.

Вспомним формулу для вычисления емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (1.15)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; S – площадь обкладки конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

2. Колебания силы тока и напряжения в колебательном контуре происходят с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний. Поэтому для их наблюдения и исследования самым подходящим прибором является *электронный осциллограф* (рис. 1.2.2).

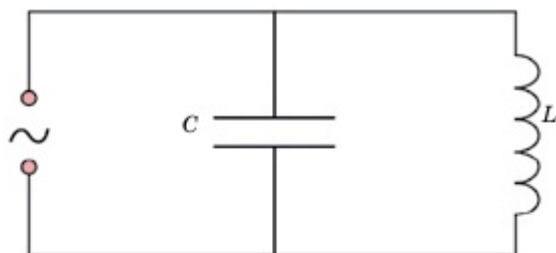


Рис. 1.2.1. Колебательный контур



Рис. 1.2.2. Электронный осциллограф

Электромагнитные колебания, как и механические, делятся на *свободные* и *вынужденные* колебания.

Свободными колебаниями называют колебания, которые совершаются за счет накопленной энергии самой системы.

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют колебания, которые совершаются системой за счет энергии от внешнего источника.

3. Простейшая система, в которой могут происходить электромагнитные колебания, называется *колебательным контуром*. Он состоит из конденсатора емкостью C и катушки с индуктивностью L , присоединенной к его обкладкам (рис. 1.2.1).

Рассмотрим, почему в идеальном электрическом контуре (рис. 1.2.3) возникают колебания. Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое время к батарее

с помощью переключателя 1 (рис. 1.2.3, а). При этом заряженный конденсатор получит энергию, определяемую формулой:

$$W_{\text{эл}} = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (1.16)$$

где q_m – полный заряд конденсатора; C – его емкость. Между обкладками конденсатора возникает разность потенциалов U_m .

Переведем переключатель в положение 2. Конденсатор начнет разряжаться, и в цепи появится электрический ток (рис. 1.2.3, б). Сила тока не сразу достигает максимального значения, а увеличивается постепенно. Это обусловлено явлением самоиндукции. При появлении тока возникает переменное магнитное поле. Это переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле в проводнике. Вихревое электрическое поле при нарастании магнитного поля действует против тока и препятствует его мгновенному увеличению.

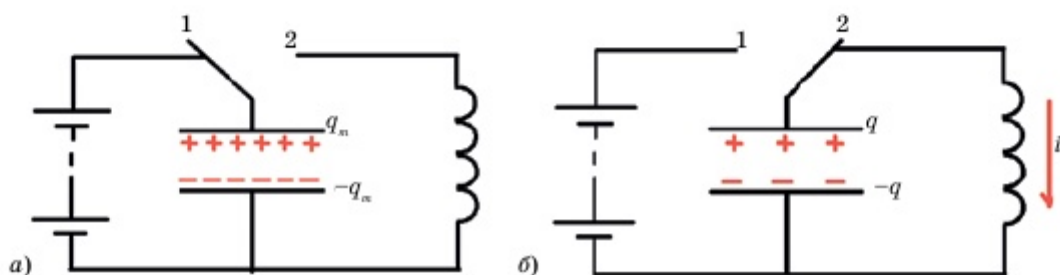


Рис. 1.2.3. Схема идеального колебательного контура с $R = 0$

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля между обкладками конденсатора уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля катушки, которая определяется формулой:

$$W_{\text{м}} = \frac{Li^2}{2}, \quad (1.17)$$

где i – сила переменного тока, L – индуктивность катушки.

Полная энергия W электромагнитного поля контура при неполной разрядке конденсатора равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \quad (1.18)$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Энергия же магнитного поля тока согласно закону сохранения энергии будет максимальной $\frac{LI_m^2}{2}$. В этот момент сила тока также достигает максимального значения I_m .

Несмотря на то что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Этому снова препятствует явление самоиндукции. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает вихревое электрическое поле, которое поддерживает ток. В результате конденсатор перезаряжается до тех пор, пока сила тока, уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент (т.е., когда $i = 0$) также будет равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

После этого конденсатор вновь начнет разряжаться, и вышеописанный процесс вновь повторяется. Если бы не было потерь энергии, как в идеальном колебательном контуре $R = 0$ (рис. 1.2.3), то этот процесс продолжался бы сколь угодно долго. Колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состояние системы в точности повторялось бы. **Полная энергия** при этом сохранялась бы, и ее значение в любой момент времени было бы равно максимальной энергии электрического поля или максимальной энергии магнитного поля:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Но в действительности потери энергии неизбежны. Так, в частности, катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R (рис. 1.2.2), а это ведет к постепенному превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводника согласно закону Джоуля – Ленца ($Q = I^2Rt$). В результате чего в реальном контуре электромагнитные колебания без внешней подпитки постепенно затухают.



Вопросы

1. Из каких частей состоит колебательный контур? Начертите схему колебательного контура.
2. Какова роль катушки и конденсатора в колебательном контуре?
3. Благодаря каким процессам возникают свободные и вынужденные электромагнитные колебания?
4. Как происходит процесс превращения энергии при электромагнитных колебаниях?
5. Почему электромагнитные колебания в реальном колебательном контуре затухают?



Задание (теоретическое исследование)

Подготовьте доклад в виде реферата или презентации о приборе, предназначенном для исследований амплитудных и временных параметров электрического сигнала – осциллографе.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Амплитуда напряжения на конденсаторе колебательного контура $U_m = 220$ В, а амплитуда силы тока в катушке $I_m = 2$ мА. Чему равны сила тока i и напряжение u в тот момент, когда энергия электрического поля конденсатора $W_{эл}$ равна энергии магнитного поля катушки W_m ?

Дано:	СИ	Решение:
$U_m = 220$ В		По закону сохранения энергии максимальная энергия электрического поля равна:
$I_m = 2$ мА	$2 \cdot 10^{-3}$ А	$W_{эл\ max} = W_{эл} + W_m = 2W_{эл},$
$W_{эл} = W_m$		поскольку $W_{эл} = W_m$ согласно условию задачи.
$i = ?$		
$u = ?$		

Здесь $W_{эл\ max} = \frac{CU_m^2}{2}$ и $W_{эл} = \frac{Cu^2}{2}$, поэтому $\frac{CU_m^2}{2} = 2 \frac{Cu^2}{2}$, сокращая $U_m^2 = 2u^2$, откуда $u = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Кроме того, по тому же закону сохранения энергии максимальная энергия магнитного поля равна:

$$W_{m\ max} = W_{эл} + W_m = 2W_m, \text{ ведь } W_{эл} = W_m.$$

Но $W_{m\ max} = \frac{LI_m^2}{2}$, а $W_m = \frac{Li^2}{2}$, поэтому $\frac{LI_m^2}{2} = 2 \frac{Li^2}{2}$, сокращая $I_m^2 = 2i^2$, откуда $i = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

Произведем вычисления:

$$u = \frac{220}{\sqrt{2}} = 156 \text{ (В)}; \quad i = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ (А)}.$$

Ответ: $u = 156$ (В); $i = 1,4 \cdot 10^{-3}$ (А).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 1.2.1. Частота колебаний в контуре равна 10 МГц. Если колебания заряда происходят по закону косинуса, определите время, через которое заряд на обкладках конденсатора q станет равен половине амплитуды заряда q_m . (Ответ: $1,7 \cdot 10^{-8}$ с.)
- 1.2.2. Изменение электрического тока в контуре происходит по закону $i = 0,01 \cos 20t$. Определите период колебаний заряда. (Ответ: $\pi/10$ с.)
- 1.2.3. Определите индуктивность катушки, подключенной к конденсатору емкостью 2,5 мкФ, чтобы в колебательном контуре возникали колебания с периодом 1,57 мс. (Ответ: 25 мГн.)

Уровень В

- 1.2.4. Контур радиоприемника настроен на длину волны 500 м. Как нужно изменить индуктивность катушки колебательного контура, чтобы длина волны стала 250 м? (*Ответ:* уменьшить в 4 раза.)
- 1.2.5. В идеальном колебательном контуре колебания заряда происходят по закону $q = q_m \cos \omega t$. Определите, через какой промежуток времени энергия электрического поля конденсатора будет в 3 раза больше энергии магнитного поля катушки. (*Ответ:* $T/12$.)
- 1.2.6. Определите период колебаний колебательного контура, если максимальный заряд конденсатора в процессе колебаний равен $2 \cdot 10^{-8}$ Кл, а максимальный ток в катушке составляет 1 А. (*Ответ:* 125,6 нс.)

§ 1.3**Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями**

1. Механические колебания, например колебания математического маятника, имеют сходство с электромагнитными колебаниями, возникающими в электрическом контуре. В двух указанных случаях физическая природа колеблющихся величин разная, но их изменения происходят по одинаковым законам.

При механических колебаниях периодически изменяются координата тела x (в случае математического маятника – высота) и проекция его скорости v_x , а при электромагнитных колебаниях изменяются заряд конденсатора q и сила тока i в цепи. В связи с этим полезно провести аналогию механических и электромагнитных колебаний. Итак, сравнивая представленные ниже картины в *таблице 1.3.1*, мы можем установить аналогию между механическими и электромагнитными величинами.

1) В начальный момент $t = 0$ отклонение математического маятника от положения равновесия максимальное h_m . В данный момент скорость маятника равна нулю, следовательно, его кинетическая энергия также равна нулю $W_k = 0$, а потенциальная энергия максимальна и равна $W_n = mgh_m$. Аналогично в начальный момент в колебательном контуре в момент времени $t = 0$ конденсатор максимально заряжен q_m , следовательно, между его обкладками возникнет электрическое поле с максимальной энергией $W_{эл} = \frac{1}{2C}q_m^2$, а энергия магнитного поля $W_m = 0$.

В этом случае уместно установить аналогию между механической потенциальной энергией W_n и энергией электрического поля $W_{эл}$, а также между высотой h и зарядом q_m .

2) Через промежуток времени, равный $t = \frac{1}{4}T$, маятник проходит положение равновесия (высота $h = 0$, следовательно, $W_n = 0$) с максимальной скоростью v_m , при этом кинетическая энергия $W_k = \frac{1}{2}mv_m^2$. За четверть периода конденсатор пол-

ностью разрядился, и энергия электрического поля уменьшилась до нуля ($W_{эл} = 0$), в то же время энергия магнитного поля достигла своего максимального значения $W_{м} = \frac{1}{2} LI_m^2$.

В этом случае существует аналогия между механической кинетической энергией ($W_{к}$) и энергией магнитного поля ($W_{м}$), а также между величинами массы тела (m) и индуктивностью катушки (L).

3) В момент, когда $t = \frac{1}{2} T$, маятник достигает своего крайнего правого положения (высота максимальна). При максимальной высоте $W_{п} = mgh_m$ и $W_{к} = 0$, т.е. вся запасенная энергия тела опять преобразуется в потенциальную энергию. В этот период с $t = \frac{1}{4} T$ до $t = \frac{1}{2} T$ сила тока в контуре будет убывать, что повлечет за собой ослабление магнитного поля катушки. Конденсатор начнет перезаряжаться, возникнет электрическое поле, стремящееся ослабить ток, который в итоге станет равен нулю $W_{м} = 0$, а заряд на обкладках конденсатора достигнет максимума $W_{эл} = \frac{1}{2C} q_m^2$.

В этом случае аналогия между механическими и электромагнитными величинами будет такой же, как это было отмечено выше в первом пункте.

4) В момент времени, когда $t = \frac{3}{4} T$, происходит обратный колебательный процесс, описанный во втором пункте. Следовательно, в этом случае аналогия между механическими и электромагнитными величинами будет такой же, как во втором пункте.

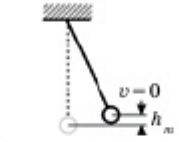
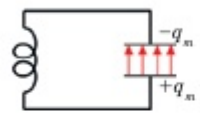
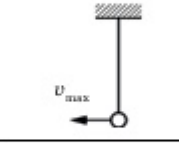
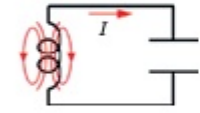
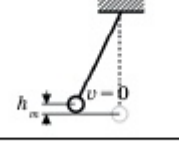
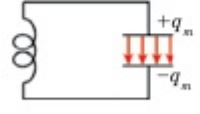
5) Аналогичные процессы начнут протекать и в обратном направлении, и к моменту $t = T$ система возвращается в исходное состояние. Колебательный процесс повторяется в вышеописанной последовательности.

Таблица 1.3.1

Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями

Время	Механические колебания маятника		Электромагнитные колебания в колебательном контуре	
$t = 0$		$W_{п} = mgh_m$ $W_{к} = 0$		$W_{эл} = \frac{1}{2C} q_m^2$ $W_{м} = 0$
$t = \frac{1}{4} T$		$W_{п} = 0$ $W_{к} = \frac{1}{2} mv_m^2$		$W_{эл} = 0$ $W_{м} = \frac{1}{2} LI_m^2$

Окончание таблицы 1.3.1

$t = \frac{1}{2} T$		$W_a = mgh_m$ $W_k = 0$		$W_{эп} = \frac{1}{2C} q_m^2$ $W_m = 0$
$t = \frac{3}{4} T$		$W_a = 0$ $W_k = \frac{1}{2} mv_m^2$		$W_{эп} = 0$ $W_m = \frac{1}{2} LI_m^2$
$t = T$		$W_a = mgh_m$ $W_k = 0$		$W_{эп} = \frac{1}{2C} q_m^2$ $W_m = 0$

Мы рассмотрели электромагнитные колебания, сопоставляя с механическими колебаниями маятника, сопровождающимися взаимными превращениями потенциальной и кинетической энергий маятника. В рассмотренном нами случае энергия электрического поля конденсатора аналогична потенциальной энергии маятника, энергия магнитного поля катушки – кинетической энергии, сила тока в контуре – скорости движения маятника, индуктивность – массе маятника.

В таблице 1.3.2 отражены более полные величины, характеризующие механические и электромагнитные колебания, между которыми устанавливается аналогия.

Таблица 1.3.2

Аналогии между физическими величинами, характеризующими механические и электромагнитные колебания

Механические колебания	Электромагнитные колебания
Координата x	Заряд q
Амплитуда A	Максимальный заряд q_m
Скорость $v = x'$	Сила тока $i = q'$
Ускорение $a = v' = x''$	Скорость изменения силы тока $i' = q''$
Масса m	Индуктивность L

Окончание таблицы 1.3.2

Жесткость пружины k	Обратная величина емкости $\frac{1}{C}$
Сила F	Напряжение U
Потенциальная энергия деформированной пружины $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля конденсатора $W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия груза $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля катушки $W_{\text{м}} = \frac{Li^2}{2}$



Вопросы

1. В чем проявляется аналогия между электромагнитными колебаниями в контуре и колебаниями математического маятника?
2. За счет какого явления электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю?
3. Какую величину для электромагнитных колебаний можно сопоставить с трением в процессе механических колебаний? Между какими разными физическими явлениями рассматриваются аналогии на основании этих величин?

Работа в группах

Каждая группа получает конверт, в который вложены фрагменты формул из данной главы, записанные на отдельных листах. Необходимо сопоставить левые и правые части формул. Группы по очереди демонстрируют полученные формулы. Побеждает та группа, у которой максимальное количество правильных формул.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 1

- **Колебаниями** называются движения или процессы, обладающие в той или иной степени повторяемостью во времени.
- **Гармоническими колебаниями** называются колебания, при которых физическая величина, характеризующая то или иное колебание, изменяется с течением времени по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ или } x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

- **Пружинным маятником** называют груз массой m , прикрепленный к пружине жесткостью k , второй конец которой закреплен неподвижно. Период пружинного маятника определяется по **формуле Гюйгенса**: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$.
- **Математическим маятником** называют материальную точку, подвешенную на невесомой и нерастяжимой нити. Период математического маятника определяется по **формуле Галилея**: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.
- **Электромагнитными колебаниями** называют взаимосвязанные колебания электрической напряженности (\vec{E}) и магнитной индукции (\vec{B}) единого электромагнитного поля.
- Возбудителем электромагнитных колебаний в колебательном контуре является **электрический заряд q** , колебания которого подчиняются синусоидальному (косинусоидальному) закону:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$
- Период электромагнитных колебаний определяется **формулой Томсона**:








$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$
- **Колебательный контур** – это электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности L и конденсатора емкостью C .
- **Свободными колебаниями** называют колебания, которые совершаются за счет накопленной энергии самой системы.
- **Вынужденными электромагнитными колебаниями** называют колебания, которые совершаются системой за счет энергии от внешнего источника.

Глава 2

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

ГЛАВА 2. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  исследовать принцип работы генератора переменного тока, используя модель генератора;
-  характеризовать переменный ток, используя такие физические величины, как период, частота, максимальное и эффективное/действующее значение напряжения тока и электродвижущая сила;
-  объяснять условие резонанса и называть сферы его применения;
-  рассчитывать резонансную частоту;
-  объяснять экономические преимущества переменного тока высокого напряжения при передаче электрической энергии;
-  экспериментально определять число витков в обмотках трансформатора;
-  оценивать преимущества и недостатки источников электроэнергии в Казахстане.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
генератор	генератор	generator
айнымалы электр тогы	переменный электрический ток	alternating electric current
электрлік резонанс	электрический резонанс	electric resonance
сапалылық	добротность	quality factor
трансформатор	трансформатор	transformer
электр энергетикасы	электроэнергетика	electrical power engineering
жылу электр станциясы	тепловая электростанция	thermal power plant
су электр станциясы	гидроэлектростанция	hydroelectric power plant
атом электр станциясы	атомная электростанция	nuclear power plant

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «генератор», «переменный электрический ток», «электрический резонанс», «добротность», «трансформатор», «электроэнергетика», «тепловая электростанция», «гидроэлектростанция», «атомная электростанция».

§ 2.1

Генератор переменного тока

1. Генераторами переменного тока называются устройства, преобразующие энергию того или иного вида в электрическую.

В истории развития источников электрического тока различают их следующие виды (рис. 2.1.1 и 2.1.2).

Гальванический элемент – химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов или их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока.

Электростатическая машина преобразует механическую энергию, используя явление электростатической индукции, при этом на полюсах машины (лейденских банках) накапливаются электрические заряды, разность потенциалов на разрядниках достигает нескольких сотен тысяч вольт.

Солнечная батарея – объединение фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) – полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в электромагнитную, которая в свою очередь трансформируется в постоянный электрический ток, в отличие от солнечных коллекторов, производящих нагрев материала-теплоносителя.

Термобатарея преобразует тепловую энергию в электрическую. В термобатареях используется несколько термопар, подключенных последовательно или параллельно.

Область применения перечисленных источников электрического тока различна и определяется их характеристиками. Так, например, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но они не способны создать в цепи сколько-нибудь значимую силу тока. Гальванические же элементы, наоборот, могут дать большой ток, но продолжительность их работы невелика.



а) гальванический элемент



б) электростатическая машина



в) солнечная батарея



г) термобатарея

Рис. 2.1.1. Виды источников электрического тока

2. В современной энергетике применяют индукционные генераторы переменного тока, в которых используется явление электромагнитной индукции.

Такие генераторы позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении. Простейшая модель такого генератора – рамка с током, вращающаяся в однородном магнитном поле вокруг своей оси (рис. 2.1.2).

В настоящее время имеется много различных типов индукционных генераторов. Но все они состоят из одних и тех же основных частей:

- 1) **статор** – неподвижное устройство, создающее магнитное поле. Это может быть либо постоянный магнит, либо электромагнит;
- 2) **ротор** – обмотка, в которой индуцируется ЭДС;
- 3) **кольца со щетками** – устройство, с помощью которого снимают с вращающихся частей индукционный ток или подают ток питания электромагнитам.

ЭДС, индуцируемая в последовательно соединенных витках, будет складываться из суммы ЭДС в каждом из них, поэтому обмотка якоря состоит из множества витков.

3. Электромеханический генератор переменного тока работает по принципу получения индукционного тока в плоском контуре при его вращении в магнитном поле. Неподвижная часть генератора, аналогичная магниту, называется **статором**, а вращающаяся, т.е. рамка, – **ротором** (рис. 2.1.2).

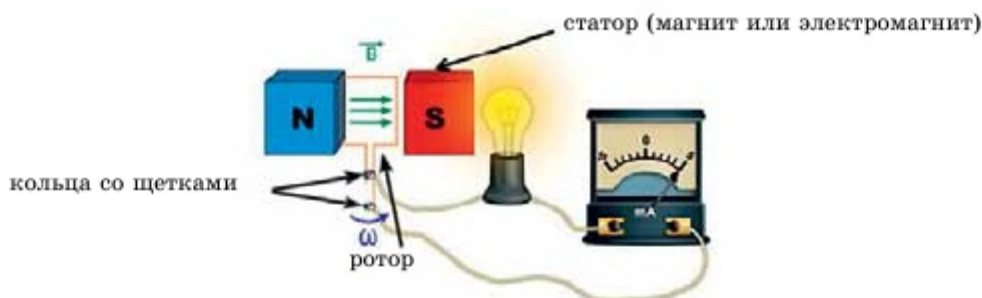


Рис. 2.1.2. Модель источника индукционного тока

В мощных промышленных генераторах (рис. 2.1.3) вместо постоянного магнита используется электромагнит.

Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим для увеличения потока вектора магнитной индукции.

Статор промышленного генератора представляет собой стальную станину цилиндрической формы (**станина** – это основная несущая часть машины, на которой монтируются различные рабочие узлы, механизмы и пр.). Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые укладывается толстый медный провод. Именно в них и индуцируется переменный электрический ток при изменении пронизывающего их магнитного потока. Магнитное поле создается **ротором**. Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надеты обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток

удобнее снимать с неподвижных обмоток; а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Ток к этой обмотке подводится через *щетки* и *кольца* от постороннего источника постоянного тока, называемого *возбудителем*.

На *рис. 2.1.3* представлена полная схема генератора переменного тока. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора, периодически меняется, в результате чего в них индуцируется переменный ток.

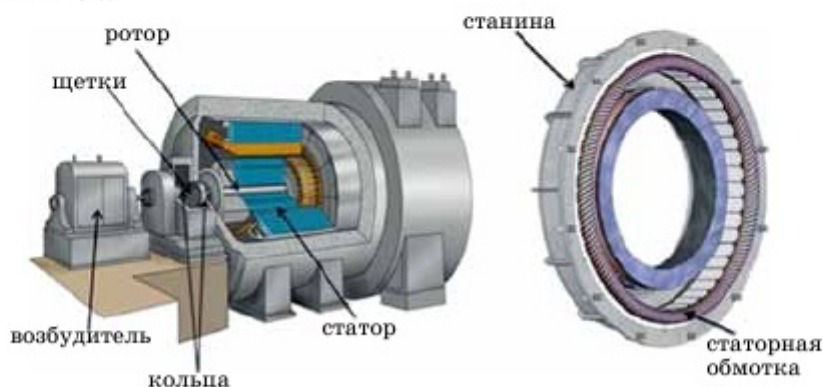


Рис. 2.1.3. Промышленный генератор переменного тока



Вопросы

1. Какова роль источников электрического тока в жизнедеятельности человека?
2. В чем заключается отличие принципов работы исторических видов источников электрического тока?
3. Каковы основные части индукционных генераторов? В чем заключается их роль?
4. Какова принципиальная разница между статором и ротором? Объясните их роль в работе генератора.



Задание (практическое исследование)

С помощью модели школьного генератора исследуйте принцип работы генератора переменного тока.

§ 2.2

Переменный ток

1. Переменным электрическим током называется ток, периодически изменяющийся со временем по величине и направлению.

Получение переменного тока основано на процессе, который вызывает вынужденное электромагнитное колебание. В этом можно убедиться, рассмотрев нижеописанный процесс получения переменного электрического тока. Поместим в постоянное и однородное магнитное поле виток проволоки $abcd$ (рис 2.2.1).

При равномерном вращении этого витка вокруг оси OO' магнитный поток, пронизывающий его площадь, будет постоянно меняться как по величине, так и по направлению (см. также рис. 2.1.2). Вследствие этого, согласно закону электромагнитной индукции, в витке возникает переменная по величине и направлению ЭДС индукции.

Когда плоскость вращающегося витка становится перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, пронизывающий ее магнитный поток наибольший ($\Phi = \Phi_{max}$), скорость же изменения его равна нулю ($\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$), так как при прохождении через это положение проводники витка ab и cd скользят вдоль силовых линий поля, не пересекая их (рис. 2.2.1, а). Следовательно, ЭДС индукции, возникающая в витке, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока, будет равна нулю:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = 0. \quad (2.1)$$

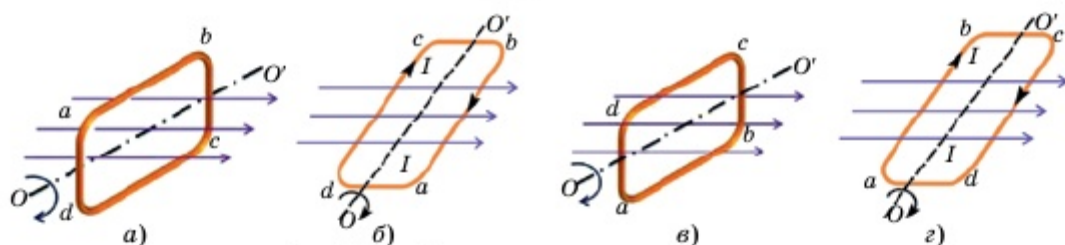


Рис. 2.2.1. Индуцирование переменного тока

Когда же плоскость витка параллельна силовым линиям поля (рис. 2.2.1, б – вид сверху), поток, пронизывающий ее, равен нулю ($\Phi = 0$), скорость же изменения его при прохождении через это положение наибольшая ($\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = max$), так как в этом случае проводники витка ab и cd движутся перпендикулярно к силовым линиям поля. ЭДС, возникшая в этом случае в витке, имеет наибольшее значение:

$$\varepsilon_{max} = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (2.2)$$

При этом в части ab витка ЭДС будет направлена от чертежа к наблюдателю, а в части cd наоборот – от наблюдателя за чертеж.

При дальнейшем вращении витка (рис. 2.2.1, в) ЭДС, сохраняя неизменным свое направление, будет уменьшаться до тех пор, пока опять не станет равной нулю ($\varepsilon_i = 0$), т.е. в том положении, когда величина магнитного потока будет наибольшей ($\Phi = \Phi_{max}$), а скорость его изменения (следовательно, и ЭДС) равна нулю:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = 0. \quad (2.3)$$

При дальнейшем вращении витка (рис. 2.2.1, z – вид сверху) скорость изменения потока, пронизывающего виток, будет увеличиваться до максимума; следовательно, и ЭДС по абсолютной величине будет возрастать до максимального значения:

$$\varepsilon_{\max} = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (2.4)$$

Но так как теперь виток движется навстречу магнитным силовым линиям другой стороной плоскости, то направление в нем ЭДС изменяется на противоположное: в части ab ЭДС направлена от наблюдателя за чертеж, а в части cd – из-за чертежа к наблюдателю. И опять это направление ЭДС сохранится и при дальнейшем движении витка, при этом абсолютная ее величина будет убывать.

При последующих оборотах витка все эти явления будут повторяться вновь.

Таким образом, *максимальная величина ЭДС индукции во вращающемся витке за один его оборот изменяется от минус ε_{\max} до плюс ε_{\max} .*

2. Вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения (или ЭДС), изменяются с циклической частотой по закону синуса или косинуса:

<i>Напряжение</i>	<i>ЭДС</i>
$u = U_m \sin \omega t;$	$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t;$
$u = U_m \cos \omega t;$	$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t;$

где U_m – амплитуда напряжения, ε_m – амплитуда ЭДС, ω – циклическая частота.

Если в цепи напряжение меняется с циклической частотой ω , то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Однако *фазы колебания силы тока в цепи не обязательно должны совпадать с фазами колебания напряжения*. Поэтому в общем случае мгновенное значение силы тока будет определяться по формулам:

$$\begin{aligned} \text{Сила тока: } i &= I_m \sin(\omega t + \varphi); \\ i &= I_m \cos(\omega t + \varphi); \end{aligned} \quad (2.6)$$

где I_m – амплитуда силы тока, ω – циклическая частота, φ – сдвиг фаз.

Действующим значением силы переменного электрического тока называют величину, которая в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.7)$$

Действующее значение силы тока равно силе такого постоянного тока, при котором средняя мощность, выделяющаяся в проводнике в цепи переменного тока, равна мощности, выделяющейся в том же проводнике в цепи постоянного тока.

Действующее значение переменного напряжения в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.8)$$

Средняя мощность переменного тока при совпадении фаз колебаний силы тока и напряжения равна произведению действующих значений силы тока и напряжения:

$$P = IU. \quad (2.9)$$

3. Рассмотрим еще две основные характеристики переменного тока – *период и частоту*.

Периодом переменного тока T называют промежуток времени, в течение которого ЭДС (или напряжение, или сила тока) совершает одно полное колебание.

Частотой переменного тока ν называется число колебаний переменного тока за одну секунду.

Активным сопротивлением переменного тока называют физическую величину R , определяемую отношением средней мощности P , которая выделяется на участке электрической цепи, к квадрату значения силы тока I на этом участке:

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (2.10)$$

Стандартная частота переменного тока, применяемого в промышленности и осветительной сети в Республике Казахстан, равна 50 Гц. Частота в 50 Гц означает, что на протяжении 1 секунды ток 50 раз течет в одну сторону и 50 раз в другую.



Вопросы



1. Какой ток называется переменным электрическим током? Какое явление лежит в основе получения переменного электрического тока?
2. Как происходит процесс получения переменного электрического тока?
3. Какими формулами описываются изменения напряжения, ЭДС и силы переменного электрического тока?
4. Как определяют действующие значения силы и напряжения переменного электрического тока? Чему равны его средняя мощность и активное сопротивление?
5. Каким образом можно получить переменный ток в неподвижной рамке?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Рамка, содержащая 600 витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 25$ мТл относительно неподвижной оси, перпендикулярной линиям магнитной индукции, совершая $\nu = 360$ об/мин. Площадь поперечного сечения рамки $S = 100$ см². Определите максимальную ЭДС индукции вращающейся рамки; время одного оборота рамки.

Дано:

$$N = 600$$

$$B = 25 \text{ мТл}$$

$$\nu = 360 \text{ мин}^{-1}$$

$$S = 100 \text{ см}^2$$

$$\varepsilon_{i, \max} = ?$$

$$T = ?$$

СИ

$$2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$6 \text{ с}^{-1}$$

$$10^{-2} \text{ м}^2$$

Решение:

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в рамке, содержащей N витков:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где магнитный поток через один виток (с учетом $\omega = 2\pi\nu$) равен:

$$\Phi = BS \cos \omega t = BS \cos 2\pi\nu t, \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d(BS \cos 2\pi\nu t)}{dt} = 2\pi\nu NBS \sin 2\pi\nu t,$$

$\varepsilon_i = \varepsilon_{i \max}$ при $\sin 2\pi vt = 1$. Тогда искомая максимальная ЭДС индукции вращающейся рамки равна:

$$\varepsilon_{i \max} = 2\pi v NBS,$$

$$\varepsilon_{i \max} = 2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 600 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2} = 5,65 \text{ (В)}.$$

Время одного оборота рамки и величина, обратная частоте, называются периодом: $T = \frac{1}{v}$, следовательно, $T = \frac{1}{6} = 0,167 \text{ (с)}$.

Ответ: $\varepsilon_{i \max} = 5,65 \text{ (В)}$; $T = 0,167 \text{ (с)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 2.2.1. Определите число витков в круглом проводящем контуре радиусом 20 см, вращающемся в однородном магнитном поле с индукцией 0,25 Тл и частотой 10 с^{-1} , если амплитудное значение ЭДС равно 19,7 В. (*Ответ:* 10 витков.)
- 2.2.2. Конденсатор включен в цепь переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Напряжение в цепи равно 220 В. Максимальная сила тока составляет 4 А. Определите емкость конденсатора. (*Ответ:* 58 мкФ.)
- 2.2.3. Сила тока в открытом колебательном контуре изменяется по закону $i = 0,2 \cos 5 \cdot 10^5 \pi t$. Определите длину излучаемой электромагнитной волны в воздухе. (*Ответ:* 1200 м.)

Уровень В

- 2.2.4. Сила тока, проходящего через резистор, меняется по закону $i = 36 \sin 128t$. Определите действующее значение силы тока. (*Ответ:* 25,5 А.)
- 2.2.5. Определите мощность тока в электрической лампе, включенной в сеть напряжением 220 В, если известно, что сопротивление нити накала лампы равно 484 Ом. (*Ответ:* 100 Вт.)
- 2.2.6. Во сколько раз уменьшится индуктивное сопротивление катушки, если ее включить в цепь переменного тока с частотой 50 Гц вместо 10 кГц? (*Ответ:* в 200 раз.)

§ 2.3

Резонанс в цепи переменного тока

1. Резонанс при последовательном соединении элементов электрической цепи переменного тока. Полное сопротивление последовательной электрической цепи переменного тока зависит не только от параметров цепи, но и от частоты переменного тока. Если в электрическую цепь включить амперметр переменного тока

и исследовать зависимость амплитуды колебаний силы тока от частоты при постоянной амплитуде колебаний напряжения, то обнаружится зависимость, представленная на рис. 2.3.1. Из графика видно, что при некотором значении частоты $\nu_{рез}$ сила тока резко возрастает.

Электрическим резонансом называют явление резкого возрастания амплитуды колебаний силы электрического тока при некотором значении частоты $\nu_{рез}$. Резонансной частотой называют частоту, при которой амплитуда колебаний силы тока достигает максимального значения.

Такая зависимость силы электрического тока в цепи от частоты объясняется следующим образом. На низких частотах $\nu \ll \nu_{рез}$ емкостное сопротивление конденсатора $\left(X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C} \right)$ переменному току очень велико.

С увеличением частоты это сопротивление убывает, а сила тока в цепи возрастает. Индуктивное сопротивление катушки $(X_L = \omega L)$ на низких частотах мало, но возрастает с увеличением частоты. При резонансной частоте $\omega_{рез}$ индуктивное сопротивление катушки оказывается равным емкостному сопротивлению конденсатора:

$$X_L = X_c, \text{ или } \frac{1}{\omega C} = L\omega, \quad (2.11)$$

и амплитуда силы тока становится максимальной (I_m). При более высоких частотах индуктивное сопротивление превышает емкостное ($X_L > X_c$). Возрастание индуктивного сопротивления с частотой приводит к убыванию силы тока в цепи на частотах, больших резонансной ($\nu \gg \nu_{рез}$).

Так как колебания напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности при их последовательном соединении происходят в противофазе, а электрический ток через все элементы цепи протекает один и тот же, то при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений ($X_L = X_c$) напряжения на них в любой момент времени одинаковы по модулю, но имеют противоположные знаки:

$$u_L = -u_c. \quad (2.12)$$

Резонанс в электрической цепи переменного тока при последовательном соединении ее элементов, определяемый условием (2.12), называют резонансом напряжений.

При резонансе мгновенное напряжение на резисторе согласно условию оказывается равным приложенному напряжению:

$$u = u_R + u_L + u_c = u_R. \quad (2.13)$$

Отсюда можно найти мгновенные и действующие значения силы тока в цепи при наступлении резонанса:

$$i_{рез} = \frac{u}{R}, \quad (2.14)$$

$$I_{рез} = \frac{U_m}{R}. \quad (2.15)$$

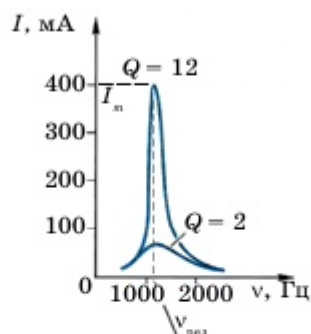


Рис. 2.3.1. График зависимости силы тока от частоты при последовательном соединении

Тот же результат можно получить, используя условие резонанса (2.11). **Это условие позволяет определить резонансную частоту $\omega_{\text{рез}}$** по известным значениям индуктивности катушки и емкости конденсатора. Из равенства (2.11) следует:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0. \quad (2.16)$$

Таким образом, **резонанс наступает при совпадении частоты переменного тока с частотой свободных колебаний в контуре.**

2. Индуктивное сопротивление катушки и емкостное сопротивление конденсатора при резонансе можно выразить через значения индуктивности и емкости:

$$X_L = X_C = L\omega_{\text{рез}} = \frac{L}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.17)$$

Определим амплитуду колебаний напряжения на катушке индуктивности и на конденсаторе при наступлении резонанса:

$$U_{Lm} = U_{Cm} = I_m X_L = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) показывает, что при наступлении резонанса амплитуды колебаний напряжения на катушке и конденсаторе могут значительно превышать амплитуду колебаний приложенного напряжения.

Физическую величину $\sqrt{\frac{L}{C}}$ называют волновым сопротивлением электрического колебательного контура и обозначают буквой ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.19)$$

Из выражений (2.17) – (2.19) следует, что отношение амплитуды колебаний напряжения на катушке (или на конденсаторе) к амплитуде колебаний приложенного напряжения при наступлении резонанса равно отношению волнового сопротивления контура к его активному сопротивлению:

$$\frac{U_{Lm}}{U_m} = \frac{U_{Cm}}{U_m} = \frac{I_m \rho}{I_m R} = \frac{\rho}{R}. \quad (2.20)$$

Это отношение называется добротностью электрического колебательного контура и обозначается буквой Q :

$$Q = \frac{\rho}{R}. \quad (2.21)$$

Добротность может достигать значений порядка 100 и даже выше. Зная добротность контура, можно определить амплитуду вынужденных колебаний напряжения на катушке или на конденсаторе в резонансе при включении источника переменного напряжения с известной амплитудой напряжения. Если,

например, в колебательный контур с добротностью $Q = 100$ включен источник переменного напряжения амплитудой 1 В, то при наступлении резонанса амплитуда вынужденных колебаний напряжения на катушке и конденсаторе достигает 100 В.

Явление увеличения амплитуды колебаний напряжения при настройке контура в резонанс с источником колебаний широко используют в радиотехнике, например: в схемах радиоприемников, усилителей, генераторов высокочастотных колебаний. С увеличением добротности контура уменьшается ширина резонансного пика. Вид резонансных кривых, полученных при двух различных значениях добротности контура, представлен на *рис. 2.3.1*.

3. Резонанс при параллельном соединении элементов электрической цепи переменного тока. При параллельном соединении резистора, конденсатора и катушки напряжение на всех элементах цепи изменяется по одинаковому закону $[u = U_m \cos \omega t]$, а полный ток в общей цепи в любой момент времени равен сумме мгновенных значений силы тока в параллельных ветвях. Амплитуда колебаний силы электрического тока в общей цепи определяется по формуле:

$$I_m = \sqrt{I_{Rm}^2 + (I_{Cm} - I_{Lm})^2} = U_m \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}. \quad (2.22)$$

Величины, обратно пропорциональные к реактивному (R), емкостному $\left(\frac{1}{\omega C}\right)$ и индуктивному (ωL) сопротивлениям, называются проводимостью резистора $\left(\frac{1}{R}\right)$, конденсатора (ωC) и катушки $\left(\frac{1}{\omega L}\right)$.

4. При некотором значении частоты ω индуктивное сопротивление катушки равно емкостному сопротивлению конденсатора:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (2.23)$$

При такой частоте токи через катушку и конденсатор в любой момент времени равны по модулю и противоположны по направлению (или по фазе колебания). Их сумма равна нулю, а сила тока в общей цепи равна силе тока через активное сопротивление:

$$i = i_R, \quad I_{min} = I_R = \frac{U_m}{R}. \quad (2.24)$$

При выполнении условия (2.24) полное сопротивление электрической цепи принимает максимальное значение $Z = R$. Максимальному значению полного сопротивления параллельной электрической цепи соответствует минимальное значение силы электрического тока. Следовательно, при выполнении условия (2.24), называемого **условием резонансов токов** в колебательном контуре, сила тока в общей цепи минимальна.

На *рис. 2.3.2* представлена зависимость амплитуды колебаний силы электрического тока в общем участке цепи от частоты при постоянной амплитуде коле-

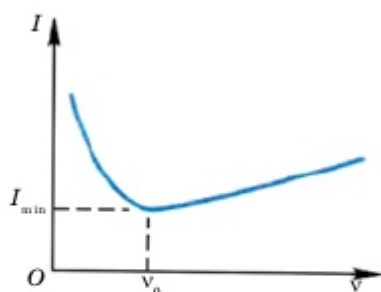


Рис. 2.3.2. График зависимости силы тока от частоты при параллельном соединении

баний напряжения на параллельно соединенных катушке, конденсаторе и элементе с активным сопротивлением.



Дополнительный материал

Резонанс напряжений и токов – интересное явление, которое наблюдается только в индуктивно-емкостных цепях. В цепях с большим активным сопротивлением он не может возникнуть. Пример полезного применения резонанса напряжений: входной контур приемника настраивается конденсатором переменной емкости таким образом, что в нем возникает резонанс напряжений. Этим достигается необходимое для нормальной работы приемника большое повышение напряжения на катушке по сравнению с напряжением в цепи, созданным антенной. Наряду с полезным использованием явления резонанса напряжений в электротехнике часто бывают случаи, когда резонанс напряжений вреден. Большое повышение напряжения на отдельных участках цепи (на катушке или на конденсаторе) по сравнению с напряжением генератора может привести к порче отдельных деталей и измерительных приборов.



Вопросы

1. Какой процесс называется электрическим резонансом? Какая частота называется резонансной частотой?
2. При каком соединении электрических цепей возникает резонанс напряжений? Каковы условия возникновения резонансов?
3. Какие величины называются волновым сопротивлением, добротностью электрического колебательного контура?
4. Какие величины называются проводимостью?
5. При каком соединении электрических цепей возникают резонансы токов? Каковы условия возникновения резонансов токов?



Задание (экспериментальное исследование)

Даны источники постоянного и переменного напряжений одинаковой величины; лампочка, рассчитанная на это напряжение; три одинаковых закрытых ящика с реостатом, конденсатором и катушкой индуктивности. На ящиках имеются наружные зажимы, к которым подключены реостат, конденсатор и катушка. Как, не открывая ящиков, узнать, что находится в каждом из них?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Катушка индуктивностью 100 мГн и сопротивлением 150 Ом соединена последовательно с конденсатором емкостью 0,068 мкФ. Вычислите резонансную частоту, волновое сопротивление и добротность колебательного контура.

Дано:	СИ	Решение:
$C = 0,068 \text{ мкФ}$	$6,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$	Находим резонансную частоту контура:
$L = 100 \text{ мГн}$	$0,1 \text{ Гн}$	$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,1 \cdot 6,8 \cdot 10^{-8}}} = 1,21 \cdot 10^4 \text{ (рад/с).}$
$R = 150 \text{ Ом}$		Волновое сопротивление:
$\omega_{\text{рез}} - ?$		$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,1}{6,8 \cdot 10^{-8}}} = 0,121 \cdot 10^4 = 1210 \text{ (Ом).}$
$\rho - ?$		
$Q - ?$		

Добротность контура: $Q = \frac{\rho}{R}$. Произведем вычисления: $Q = \frac{1210}{150} = 8$.

Ответ: $\omega_{\text{рез}} = 1,21 \cdot 10^4 \text{ (рад/с)}$;
 $\rho = 1210 \text{ (Ом)}$; $Q = 8$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 2.3.1. Определите резонансную частоту в цепи из катушки индуктивностью 4 Гн и конденсатора электроемкостью 9 Ф. (Ответ: 1/6 рад/с.)
- 2.3.2. В цепь переменного тока с частотой 400 Гц включена катушка индуктивностью 0,1 Гн. Конденсатор какой емкости надо включить в эту цепь, чтобы осуществился резонанс? (Ответ: 1,6 мкФ.)

Уровень В

- 2.3.3. Конденсатор емкостью $2,4 \cdot 10^3 \text{ пФ}$ соединен с катушкой индуктивности 32 мкГн и сопротивлением 2 Ом. Определите резонансную частоту контура. (Ответ: 0,57 МГц.)
- 2.3.4. В электрическую цепь включены конденсатор емкостью 2 мкФ и катушка индуктивностью 0,005 Гн. При какой частоте тока наступит резонанс в этой цепи? (Ответ: 0,04 Гц.)

§ 2.4

Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор

1. Электрическую энергию производят на *электростанциях* генераторы, роторы которых вращаются с помощью турбины. Так, например, на тепловых электростанциях ротор генератора вращается с помощью паровой турбины. Однако электроэнергию необходимо еще доставить до потребителя. В связи с этим от станции до потребителя строят линии электропередачи.

При передаче электроэнергии неизбежны потери, связанные с нагреванием проводов. Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя.

Из закона Джоуля – Ленца ($Q = I^2 R \Delta t$) следует, что уменьшить потери можно либо за счет уменьшения сопротивления проводов $R = \frac{\rho l}{S}$, либо уменьшения силы тока в них. *Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление металла, из которого они изготовлены.* В линиях электропередачи используют провода из меди или алюминия, так как они обладают наименьшим удельным сопротивлением среди относительно недорогих металлов. *Однако увеличивать же толщину проводов экономически невыгодно*, т.к. это ведет к перерасходу дорогостоящего цветного металла, а также к возникновению трудностей при закреплении проводов на столбах. Следовательно, такой способ снижения потерь практически невыгоден.

2. Поэтому существенного снижения потерь можно добиться только за счет уменьшения силы тока. Но при данной мощности ($P = IU$) уменьшение силы тока возможно лишь при увеличении напряжения. Без такого преобразования силы тока и напряжения передача электроэнергии на большие расстояния становится невыгодной из-за существенных потерь.

Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения трансформатора – устройства, служащего для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Простейший трансформатор представляет собой две изолированные друг от друга катушки (их еще называют обмотками), намотанные на общий замкнутый сердечник. По одной из обмоток (первичной) пропускается преобразуемый переменный ток, а вторичная обмотка соединяется с потребителем (рис. 2.4.1).

Переменный ток в первичной обмотке создает в сердечнике переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в витках каждой обмотки. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле так, что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

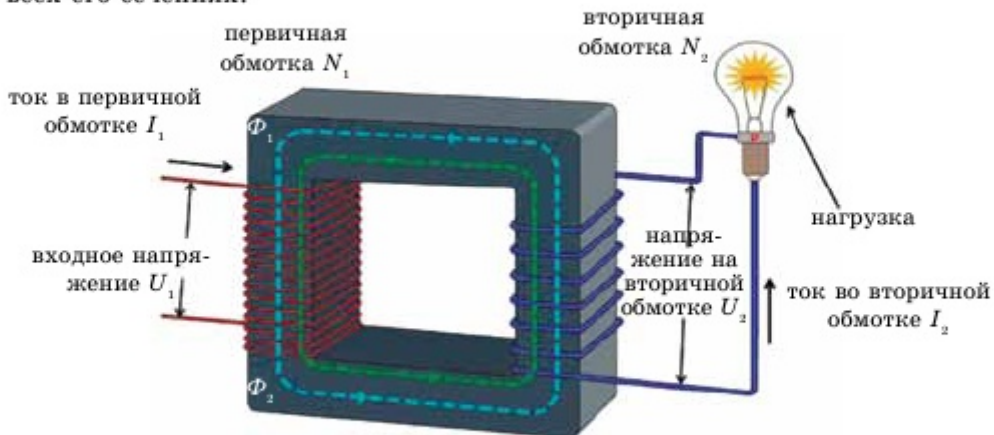


Рис. 2.4.1. Принцип работы трансформатора

Мгновенное значение ЭДС индукции во всех витках первичной или вторичной обмотки одинаково. Согласно закону Фарадея, оно будет определяться формулой:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.25)$$

где Φ – поток магнитной индукции.

3. Если первичная обмотка имеет N_1 витков, а вторичная – N_2 витков, то в обмотках индуцируются (без учета потерь на рассеивание магнитного потока) соответственно ε_1 и ε_2 , а их отношение будет равно:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (2.26)$$

т.е. возникающие в катушках ЭДС индукции (или самоиндукции) прямо пропорциональны числу витков в них.

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало ($R \approx 0$), и им можно пренебречь. В этом случае модуль напряжения на зажимах первичной обмотки примерно равен модулю суммарной ЭДС индукции:

$$|U_1| \approx |\varepsilon_1|. \quad (2.27)$$

При разомкнутой цепи вторичной обмотки трансформатора ток в ней не идет, поэтому суммарная ЭДС индукции равна напряжению на зажимах вторичной обмотки:

$$|U_2| \approx |\varepsilon_2|. \quad (2.28)$$

Изменение мгновенных значений ЭДС происходит так, что они одновременно достигают максимума и одновременно проходят через ноль, т.е. изменяются синфазно. Поэтому их отношения можно заменить отношением действующих значений этих ЭДС или отношением действующих значений напряжений:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \quad (2.29)$$

Величину, представляющую отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной, называют коэффициентом трансформации k . В зависимости от того, какое значение принимает коэффициент трансформации, различают *повышающий* ($k < 1$) и *понижающий* ($k > 1$) трансформаторы.

4. При включении во вторичную цепь какой-либо нагрузки (это рабочий ход трансформатора) в ней начинает проходить переменный ток нагрузки. Этот ток создает в сердечнике магнитный поток, направленный по правилу Ленца навстречу потоку первичной обмотки. В результате суммарный поток магнитной индукции в первичной катушке уменьшается, уменьшается и ЭДС, а, следовательно, сила тока будет увеличиваться. Это увеличение силы тока в первичной цепи приводит к увеличению магнитного потока, ЭДС индукции и силы тока во вторичной цепи. Но, как мы знаем, увеличение тока во вторичной цепи сопровождается увеличением тока самоиндукции и, следовательно, уменьшением магнитного потока, который только что возрастал.

В конце концов при постоянной нагрузке устанавливаются определенные магнитный поток, ЭДС индукции во вторичной цепи и ток в первичной цепи. Получается, что *трансформатор сам автоматически регулирует потребление энергии в зависимости от нагрузки во вторичной цепи.*

При рабочем ходе трансформатора происходит непрерывная передача энергии из первичной цепи во вторичную.

Мощность, потребляемая в первичной цепи, будет определяться формулой:

$$P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1, \quad (2.30)$$

а выделяемая на нагрузке мощность равна:

$$P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2, \quad (2.31)$$

где φ представляет собой сдвиг фаз между силой тока и напряжением в соответствующих цепях трансформатора. Если сдвиг фаз между током и напряжением отсутствует ($\varphi = 0$), то $\cos \varphi = 1$.

Коэффициент полезного действия трансформатора будет определяться отношением выделяемой мощности на нагрузке к потребляемой мощности в первичной цепи η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}. \quad (2.32)$$

5. Однако не вся энергия, вырабатываемая генератором, передается потребителю. При работе трансформатора имеются потери на нагревание обмоток трансформатора, на рассеивание магнитного потока в пространство, на вихревые токи Фуко в сердечнике и его перемагничивание.

Для уменьшения этих потерь принимаются следующие меры:

- 1) обмотка катушки низкого напряжения делается большего сечения, так как по ней проходит ток большей силы;
- 2) сердечник делают замкнутым, что уменьшает рассеивание магнитного потока;
- 3) сердечник делают из изолированных пластин для уменьшения токов Фуко.

Благодаря этим мерам *коэффициент полезного действия современных трансформаторов достигает 95–99%, а сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения близок к нулю.*

Если иногда можно пренебречь потерями в трансформаторе, т.е. считать его коэффициент полезного действия равным 100%, то мощность, потребляемая в первичной цепи, будет равна мощности, выделяемой на нагрузке. Тогда *отношение силы тока в первичной обмотке к силе тока во вторичной обмотке будет обратно пропорционально соответствующим напряжениям.* А это значит, что, увеличивая с помощью трансформатора напряжение, во столько же раз будем уменьшать силу тока, и наоборот:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.33)$$

В настоящее время трансформаторы нашли широкое применение не только в технике, но и в быту.



Дополнительный материал

В записях Майкла Фарадея от 29 августа 1831 года упоминается о том, что на железное кольцо диаметром 15 см и толщиной 2 см было намотано

отдельно два провода длиной 15 м и 18 м. При прохождении тока по одной из обмоток стрелки гальванометра на зажимах другой отклонялись! Так появился первый прототип трансформатора.



Вопросы

1. В чем заключается роль трансформатора при передаче электрической энергии?
2. На основе какого явления можно объяснить принцип работы трансформатора?
3. Как объясняется физическая разница первичной и вторичной обмоток трансформатора?
4. Как определяется коэффициент трансформации?
5. Как вычисляется коэффициент полезного действия трансформатора?
6. Почему использование переменного тока высокого напряжения при передаче электрической энергии экономически выгоднее? Какие меры принимаются для минимизации потери электрической энергии при передаче на дальние расстояния?



Задание (теоретическое исследование)

Подготовьте доклад в виде реферата или презентации на одну из данных тем:

- «Виды трансформаторов»;
- «Самый мощный в мире силовой трансформатор в настоящее время»;
- «Применение трансформаторов».

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 10$ включена в сеть переменного тока с напряжением $U_1 = 120$ В. Сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 1,2$ Ом, ток в ней $I_2 = 5$ А. Найдите напряжение на нагрузке трансформатора U_n и сопротивление нагрузки R_n . Найдите число витков во вторичной обмотке N_2 , если первичная обмотка содержит $N_1 = 10\,000$ витков. Чему равен КПД η этого трансформатора?

Дано:	Решение:
$k = 10$	Зная коэффициент трансформации трансформатора k , мы легко найдем число витков во вторичной обмотке N_2 . Так как
$U_1 = 120$ В	
$R_2 = 1,2$ Ом	$k = \frac{N_1}{N_2}$, откуда $N_2 = \frac{N_1}{k}$.
$I_2 = 5$ А	Найдем напряжение на нагрузке R_n (нагрузкой может служить какая-нибудь лампа радиоприемника или другое устройство, требующее пониженного напряжения). Для этого учтем следующее важное обстоятельство: такое напряжение $U_2 = \frac{U_1}{k}$ было бы на выходе трансформатора (т.е. на нагрузке R_n), если бы вторичная обмотка трансформатора не имела сопротивления R_2 (т.е. если бы оно было столь малым, что им можно было бы пренебречь). Но из-за наличия у вторичной обмотки сопротивления R_2
$N_1 = 10\,000$	
$U_n = ?$	
$N_2 = ?$	
$R_n = ?$ $\eta = ?$	

на нагрузку «пойдет» меньшее напряжение U_n , поскольку на сопротивлении R_2 будут иметь место потери напряжения ΔU из-за потерь энергии на джоулево тепло. Поэтому на нагрузке R_n напряжение U_n будет меньше напряжения U_2 на величину этих потерь ΔU :

$$U_n = U_2 - \Delta U. \quad (1)$$

Потерю напряжения ΔU на сопротивлении R_2 найдем, воспользовавшись законом Ома для участка цепи сопротивлением R_2 , по которому течет ток I_2 (заметим, что такой же ток течет и в нагрузке R_n):

$$I_2 = \frac{\Delta U}{R_2}, \text{ откуда } \Delta U = I_2 R_2. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем $U_n = U_2 - I_2 R_2$, где $U_2 = \frac{U_1}{k}$, поэтому

$$U_n = \frac{U_1}{k} - I_2 R_2.$$

Сопротивление нагрузки R_n определим, также воспользовавшись законом Ома, но уже применительно к нагрузке $I_2 = \frac{U_n}{R_n}$, откуда $R_n = \frac{U_n}{I_2}$.

КПД – это отношение полезной работы A_n ко всей затраченной A_s . В нашем случае полезной работой будет работа тока в нагрузке, а затраченная – работа тока в первичной обмотке:

$$\eta = \frac{A_n}{A_s} 100\%. \quad (3)$$

Работу тока A_n на зажимах вторичной обмотки определим по известной формуле работы тока:

$$A_n = U_n I_2 t. \quad (4)$$

Работа тока в первичной обмотке: $A_s = U_1 I_1 t$. Так как $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$, где $\frac{U_1}{U_2} = k$, поэтому $k = \frac{I_2}{I_1}$. Отсюда $I_1 = \frac{I_2}{k}$. Тогда

$$A_s = U_1 \frac{I_2}{k} t. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (3), мы найдем КПД:

$$\eta = \frac{U_n I_2 t}{U_1 \frac{I_2}{k} t} 100\% = \frac{U_n k}{U_1} 100\%.$$

Произведем вычисления:

$$N_2 = \frac{10000}{10} = 1000;$$

$$U_{\text{н}} = \frac{120}{10} - 5 \cdot 1,2 = 6 \text{ (В)};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ (Ом)};$$

$$\eta = \frac{6 \cdot 10}{120} 100\% = 50\%.$$

Ответ: $N_2 = 1000$; $U_{\text{н}} = 6$ (В);

$R_{\text{н}} = 1,2$ (Ом); $\eta = 50\%$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

2.4.1. Сколько витков должна иметь первичная катушка трансформатора, чтобы повысить напряжение от 10 до 50 В, если во вторичной обмотке 80 витков? (Ответ: 16 витков.)

2.4.2. Первичная обмотка повышающего трансформатора содержит 100 витков, а вторичная – 1000. Напряжение в первичной цепи равно 120 В. Каково напряжение во вторичной цепи, если потерь энергии нет? (Ответ: 1200 В.)

Уровень В

2.4.3. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 300 витков, включен в сеть напряжением 220 В. Во вторичную цепь трансформатора, имеющую 165 витков, включен резистор сопротивлением 50 Ом. Найдите силу тока во вторичной цепи, если падение напряжения на ней равно 50 В. (Ответ: 1,42 А.)

2.4.4. Понижающий трансформатор дает ток 20 А при напряжении, равном 120 В. Первичное напряжение равно 22 000 В. Чему равны ток в первичной обмотке, а также входная и выходная мощности трансформатора, если его КПД равен 90%? (Ответ: 0,12 А; 2670 Вт; 2400 Вт.)

Лабораторная работа № 1.

Определение числа витков в обмотках трансформатора

Цель работы: определить число витков в обмотках трансформатора.

Оборудование: трансформатор лабораторный разборный; источник переменного напряжения 12 В; авометр АВО-63; провод изолированный.

Краткая теория. Для определения числа витков в обмотке трансформатора с неизвестными параметрами можно воспользоваться тем свойством трансформатора, что в режиме холостого хода отношение напряжений на первичной U_1 и вторичной U_2 его обмотках равно отношению числа витков N_1 в первичной обмотке к числу витков N_2 во вторичной обмотке:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Намотав на сердечник трансформатора вторичную обмотку с известным числом витков N_2 и измерив напряжение U_2 на первичной обмотке, можно определить число витков N_1 в первичной обмотке:

$$N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2}.$$

Порядок работы:

1. Снимите одну из катушек трансформатора. Намотайте непосредственно на сердечник исследуемого трансформатора 20–40 витков с выведенными концами изолированного провода, которые служат как вторичная обмотка.
2. Подключите выводы первичной обмотки трансформатора к источнику переменного напряжения $U_1 = 12$ В, измерьте напряжение на вторичной обмотке.
3. По измеренным значениям напряжения и известному числу витков во вторичной обмотке определите число витков в первичной обмотке.
4. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

№ опыта	U_1	U_2	N_1	N_2
1				
2				
3				

5. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения. Для определения абсолютной погрешности воспользуемся понятием абсолютной погрешности $\Delta x_n = x_{cp} - x_n$, где x_{cp} – средняя величина, равная среднему арифметическому значению всех полученных значений $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$. Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta x_n}{x_{cp}} \cdot 100\%$. Среднее значение абсолютной и относительной погрешностей определяют как среднее арифметическое всех величин.
6. Запишите вывод: что вы измеряли, какой получен результат. Для осмысления принципа работы трансформатора и его роли обсудите в группах приведенные ниже вопросы.
7. Для осмысления проделанной работы ответьте на следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 1

1. Что называют трансформатором?
2. На каком явлении основан принцип действия трансформатора?
3. Что называют коэффициентом трансформации?
4. Что называется КПД трансформатора?
5. Что будет с трансформатором, если его включить в цепь постоянного тока?
6. Почему при разомкнутой вторичной цепи (холостой ход) трансформатор почти не потребляет энергии?

7. Для чего около электростанций устанавливают повышающий трансформатор?
8. Какой трансформатор устанавливают около потребителей электрической энергии?

§ 2.5

Производство и использование электрической энергии в Казахстане и мире

1. Электроэнергетика – базовая инфраструктурная отрасль, снабжающая электричеством и теплом все остальные секторы народного хозяйства страны.

С энергопотреблением прямо связаны и уровень социально-экономического развития, и жизнь каждого человека.

Электроэнергетика связана со всеми секторами экономики, снабжая их произведенными электричеством и теплом, получает от некоторых из них ресурсы для своего функционирования.

Особенностями развития энергетики на современном уровне являются резкое ужесточение экологических требований (в частности, Киотский протокол по выбросам парниковых газов), переход на высокоэффективные и ресурсосберегающие энергетические технологии и попытки поиска альтернативных (без использования традиционного органического топлива) источников энергии. Тем не менее сегодня главный вклад в мировое производство электроэнергии дает **уголь (40%)**, заметно меньше – **газ (19%)** и далее по **16% атомная и гидроэнергетика**.

Казахстан обладает крупными запасами энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, уран) и является энергетической державой. По итогам 2019 года объем производства электроэнергии в Казахстане составил 106 млрд кВт · ч. Наша республика является экспортером электроэнергии. Около 70% электроэнергии в Казахстане вырабатывается из угля, 14,6% – из гидроресурсов, 10,6% – из газа и 4,9% – из нефти.

2. Производится электроэнергия на больших и малых электрических станциях в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов.

Основными производителями электроэнергии являются:

- **тепловые электростанции (ТЭС)**, где тепловая энергия, образующаяся при сжигании органического топлива (уголь, газ, мазут, торф, сланцы и т.д.), используется для вращения турбин, приводящих в движение электрогенератор;
- **гидроэлектростанции (ГЭС)**, где в электроэнергию преобразуется механическая энергия потока воды с помощью гидравлических турбин, вращающих электрогенераторы;
- **атомные электростанции (АЭС)**, где в электроэнергию преобразуется

тепловая энергия, полученная при цепной ядерной реакции радиоактивных элементов в реакторе.

Три основных типа электростанций определяют виды используемых энергоносителей. Их принято подразделять на *первичные* и *вторичные, возобновляемые* и *невозобновляемые*.

Первичные энергоносители – это сырьевые материалы в их естественной форме до проведения какой-либо технологической обработки, например: каменный уголь, нефть, природный газ и урановая руда. К ним также относятся солнечное излучение, ветер, водные ресурсы. *Вторичные энергоносители* – это продукты переработки, например: бензин, мазут, ядерное топливо.

Некоторые виды ресурсов могут относительно быстро восстанавливаться в природе, они называются *возобновляемыми*: дрова, камыш, торф и прочие виды биотоплива, гидропотенциал рек. Ресурсы, не обладающие таким качеством, называются *невозобновляемыми*: уголь, сырая нефть, природный газ, нефтеносный сланец, урановая руда. По большей части они являются полезными ископаемыми. *Энергия солнца, ветра, морских приливов относится к неисчерпаемым возобновляемым энергетическим ресурсам.*

3. Рассмотрим процесс производства электроэнергии на ТЭС (рис. 2.5.1).

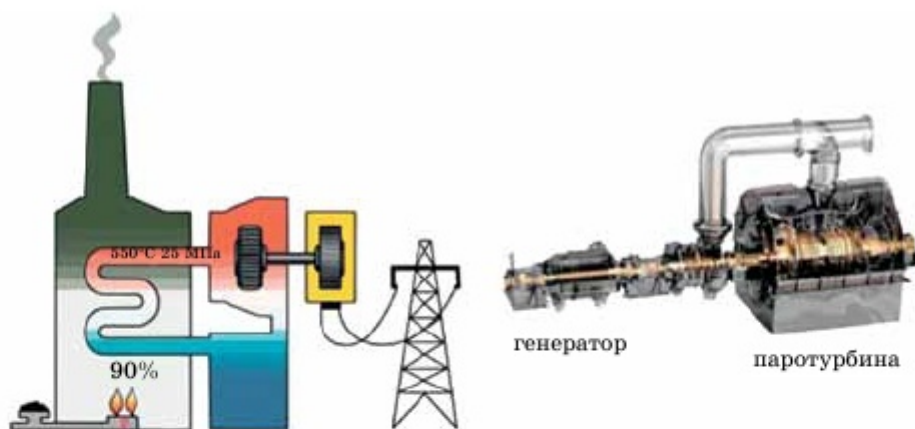


Рис. 2.5.1. Схема тепловой электрической станции

Роторы электрических генераторов на тепловых электростанциях приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. Конечно, наиболее экономичными являются крупные тепловые паротурбинные электростанции. В паровом котле *свыше 90% выделяемой топливом энергии передается пару*. В турбине кинетическая энергия струй пара передается ротору, число оборотов которого достигает нескольких тысяч в минуту. Однако

коэффициент полезного действия ТЭС остается невысоким – порядка **40%**. Большая часть энергии теряется вместе с горячим отработанным паром.

Производство электрической энергии в Казахстане осуществляют 138 электрических станций. Общая установленная мощность электростанций Казахстана составляет 21 673 МВт. 25 декабря 2018 года был зафиксирован годовой максимум нагрузки по республике (за 2018 г.), который составил 14 823 МВт при располагаемой мощности 18 895 МВт. Объем выработки электроэнергии за 2018 год составил 106,8 млрд кВт · ч (104,4% к 2017 г.). Объем потребления электроэнергии в 2018 году составил 103,2 млрд кВт · ч (105,4% к 2017 г.).

Электрические станции в нашей стране разделяются на электростанции национального, промышленного и регионального значений.

К *электрическим станциям национального значения* относятся крупные тепловые и гидравлические электрические станции.

К *электростанциям промышленного значения* относятся тепловые электрические станции с комбинированным производством электрической и тепловой энергии, служащие для электро- и теплоснабжения крупных промышленных предприятий и близлежащих населенных пунктов.

Электростанции регионального значения – это электростанции, интегрированные с территориями, которые осуществляют реализацию электрической энергии через сети региональных электросетевых компаний и энергопередающих организаций, а также теплоснабжение близлежащих городов.

К концу 2018 года располагаемая мощность электростанций увеличилась на 2470 МВт, или на 15% от уровня 2013 года, в основном за счет увеличения мощности тепловых станций и возобновляемых источников энергии.

Большую экономичность и практическое значение имеют тепловые электростанции – так называемые *теплоэлектроцентрали* (сокращенно ТЭЦ), которые позволяют значительную часть энергии отработанного пара использовать на промышленных предприятиях и для бытовых нужд (например, для отопления и горячего водоснабжения). В результате этого КПД ТЭЦ достигает 60–70%. В настоящее время ТЭЦ дают около 40% всей электроэнергии и снабжают теплом и электроэнергией города.

4. Большое значение в структуре источников электроэнергии сохраняют *гидроресурсы*, хотя их доля за последние десятилетия несколько сократилась. *Преимущества этого источника в его возобновляемости и относительной дешевизне.*

Но возведение *гидростанций оказывает необратимое воздействие на окружающую среду*, так как обычно требует затопления значительных территорий при создании водохранилищ. Кроме того, неравномерность распределения водных ресурсов на территории Республики Казахстан и зависимость от климатических условий ограничивают их гидроэнергетический потенциал.

На гидроэлектростанциях для вращения роторов генераторов *используется потенциальная энергия воды*. Мощность такой станции зависит от создаваемой плотинной разности уровней воды и от массы воды, проходящей через турбину каждую секунду.

Для выработки энергии все большее распространение получает использование *урана*. Это топливо обладает колоссальной эффективностью по сравнению с прочими сырьевыми источниками энергии. *Однако применение радиоактивных веществ сопряжено с риском масштабного загрязнения окружающей среды в случае аварии*. Кроме того, *возведение АЭС и утилизация отработанного топлива чрезвычайно капиталоемки*. Развитие этого вида энергетики осложняется и тем, что пока немногие страны могут обеспечить подготовку научных и технических специалистов, способных разработать технологии и обеспечить квалифицированную эксплуатацию АЭС.

В последнее время растет интерес к *возобновляемым* источникам энергии (рис. 2.5.2). В частности, активно разрабатываются технологии использования энергии солнца и ветра, потенциал которых огромен. В 2018 году запущена в эксплуатацию солнечная электростанция «Бурное» мощностью 100 МВт в Жамбылской области. Это крупнейшая солнечная электростанция в СНГ, построенная на основе совместного казахстанско-британского проекта.

В среднем по республике в зависимости от ветрового климата *ветровые электростанции* целесообразно устанавливать в местах, где скорость ветра превышает



Рис. 2.5.2. Солнечные батареи (Алматинская область, г. Капшагай)

шает 5 м/с. Между тем на 80–90% территории страны скорость ветра превышает 6 м/с. Имеются регионы, где ветры дуют круглогодично и круглосуточно: в южной зоне – Алматинская, Жамбылская, Южно-Казахстанская области; в западной – богаты ветрами Атырауская и Мангыстауская области; в северной – Акмолинская; в центральной – Карагандинская область. По оценкам экспертов, ветроэнергетический потенциал страны оценивается в 1820 млрд кВт · ч электроэнергии в год.

Что касается энергии ветра, то ее применение в электроэнергетике Казахстана значительно увеличилось. Например, в декабре 2011 года в Жамбылской области была введена в эксплуатацию первая в Казахстане ветроэлектростанция – Кордайская ВЭС (первая очередь) мощностью 1500 кВт. В декабре 2014 года был построен первый этап из 9 ветрогенераторов, который увеличил мощность до 9 МВт.

5. Главным потребителем электроэнергии является *промышленность*, на долю которой приходится около 70% производимой электроэнергии. Также крупным потребителем электроэнергии является *транспорт*. В настоящее время все большее количество *железнодорожных линий* переводится на электрическую тягу. Почти все деревни и села получают электроэнергию от электростанций для производственных и бытовых нужд. Электроэнергия применяется для освещения жилищ и в бытовых электроприборах.

Большая часть используемой электроэнергии сейчас превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электрическими двигателями, т.к. они удобны, компактны и допускают возможность автоматизации процесса.

Помимо этого, около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для технологических целей, таких как электросварка, электрический нагрев и плавление металлов, электролиз и т.п.

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что *современная цивилизация немислима без широкого использования электроэнергии*. А нарушение снабжения электроэнергией крупного города при аварии парализует его жизнь.

В настоящее время потребность в электроэнергии постоянно увеличивается как в промышленности, на транспорте, в научных учреждениях, так и в быту.

Возможности для более эффективного использования электроэнергии имеются, и немалые, которые «ждут» своих будущих исследователей.



Вопросы

1. Каково значение слова «электроэнергетика» с социально-экономической и научно-технической точек зрения? Какие требования накладываются на производство современной электрической энергии?
2. Каковы основные источники производимой электроэнергии? Чем они отличаются друг от друга?

3. Как осуществляется процесс производства электроэнергии на ТЭС? Какие меры принимаются для повышения КПД ТЭС?
4. Какая работа проводится в Казахстане для производства экологически чистой энергии?

Работа в группах

Учащиеся делятся на группы. Каждая группа составляет кроссворд, используя понятия из главы «Переменный ток». Группы обмениваются кроссвордами с вопросами. Побеждает та команда, которая первой правильно ответит на все вопросы кроссворда.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 2

- **Генератор переменного тока** – устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.
- **Переменный электрический ток** – это ток, периодически изменяющийся со временем по величине и направлению.
- **Действующее значение силы переменного тока** – величина, которая в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

- **Действующее значение переменного напряжения** – величина, которая в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

- **Средняя мощность переменного тока** при совпадении фаз колебаний тока и напряжения равна произведению действующих значений силы тока и напряжения:

$$P = IU.$$

- **Электрический резонанс** – явление резкого возрастания амплитуды колебаний силы электрического тока при некотором значении частот $\nu_{\text{рез}}$.

- **Условие резонанса:** резонанс имеет место, когда емкостное сопротивление конденсатора $\left(X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C} \right)$ становится равным индуктивному сопротивлению катушки $(X_L = \omega L)$, т.е. $\frac{1}{\omega C} = \omega L$.

- **Резонансная частота:** $\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

- **Волновое сопротивление:** $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

- **Добротностью** электрического колебательного контура называется физическая величина Q , определяемая отношением волнового сопротивления контура ρ к его активному сопротивлению R :

$$Q = \frac{\rho}{R}.$$

- **Трансформатор** – устройство, служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте. С помощью трансформатора, увеличивая напряжение, во столько же раз можно уменьшить силу тока, и наоборот: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$.

- **Коэффициент трансформации:** $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$.






- **Коэффициент полезного действия трансформатора:**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}.$$

Глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять условия возникновения электромагнитных волн и описывать их свойства;
-  описывать модуляцию и детектирование высокочастотных электромагнитных колебаний;
-  объяснять принцип работы радиосвязи;
-  объяснять преимущества передачи сигнала в цифровом формате по сравнению с аналоговым сигналом;
-  систематизировать средства связи и предлагать возможные пути их совершенствования.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
электромагниттік өріс	электромагнитное поле	electromagnetic field
магнит өрісі	магнитное поле	magnetic field
толқын	волна	wave
электромагниттік толқындар	электромагнитные волны	electromagnetic waves
контур	контур	circuit
толқындық беттер	волновые поверхности	wave surfaces
радиобайланыс	радиосвязь	radio communication
радиолокация	радиолокация	radiolocation
телевизия, теледидар	телевидение	television
Герц вибраторы	вибратор Герца	Hertzian dipole
магнит өрісінің кернеулігі	напряженность магнитного поля	magnetic field strength
магнит өрісінің индукциясы	индукция магнитного поля	magnetic field induction

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «электромагнитное поле», «магнитное поле», «волна», «электромагнитные волны», «контур», «волновые поверхности», «радиосвязь», «радиолокация», «телевидение», «вибратор Герца», «напряженность магнитного поля», «индукция магнитного поля».

§ 3.1

Излучение и прием электромагнитных волн

1. Электромагнитные волны. Заряженная частица (кратко заряд) совершает колебательное движение подобно телу, подвешенному на пружине, но только колебания его происходят со значительно большей частотой. Представьте себе, что электрический заряд, расположенный в начале координатной системы (рис. 3.1.1), совершает быстрые колебания с очень большой частотой.

В этом случае вектор напряженности \vec{E} электрического поля в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать, как это теоретически доказал Дж. Максвелл, периодически меняющееся магнитное поле с вектором магнитной индукции \vec{B} (рис. 3.1.1). В дальнейшем эти поля, обуславливая друг друга как единое электромагнитное поле, все дальше и дальше распространяются от источника колебания. Вследствие чего образуется так называемая *электромагнитная волна*, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

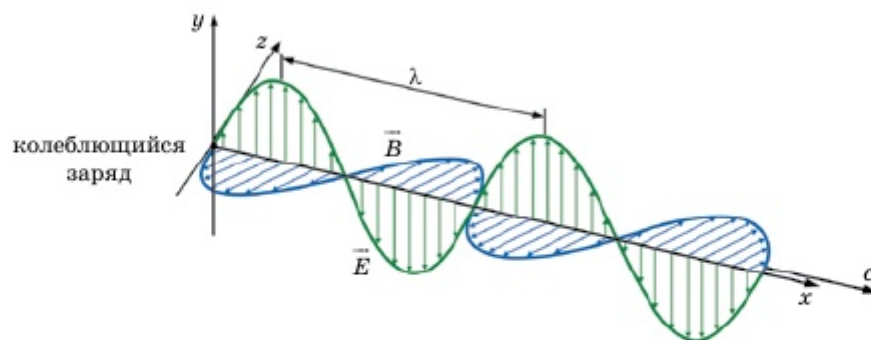


Рис. 3.1.1. График взаимосвязанного колебания векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитных волн

Электромагнитными волнами называют электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью. Скорость распростра-

нения электромагнитной волны зависит от свойств среды. В отличие от механической волны, электромагнитная волна распространяется и в вакууме со скоростью 300 000 км/с. Эта скорость является самой большой предельной скоростью; наряду с гравитационной постоянной (G) и постоянной Планка (h) она является мировой константой.

В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут ее колебания полей. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания происходят с различными фазами.

Колебания векторов напряженности электрического поля \vec{E} и индукции магнитного поля \vec{B} в любой точке совпадают по фазе (рис 3.1.1). Расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания происходят в одинаковых фазах, есть *длина волны* λ .

Направления колеблющихся векторов напряженности электрического поля и индукции магнитного поля перпендикулярны к направлению распространения волны. Следовательно, электромагнитная волна является поперечной.

2. Излучение электромагнитных волн. Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т.е. они движутся с ускорением. *Наличие ускорения – главное условие излучения электромагнитных волн.*

Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом быстром изменении его скорости. Интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Наглядно это можно представить себе так. При движении заряженной частицы с постоянной скоростью созданные ею электрическое и магнитное поля подобно развевающемуся шлейфу сопровождают частицу. При ускорении частицы обнаруживается присущая электромагнитному полю *инертность*. Вследствие чего поле «отрывается» от частицы и начинает самостоятельное существование в форме электромагнитных волн.

Энергия электромагнитного поля, переносимая волной со скоростью c , также меняется периодически в пространстве с изменением векторов \vec{E} и \vec{B} .

Максвелл был глубоко убежден в реальности существования электромагнитных волн. Однако он не дождался их экспериментального обнаружения. Лишь через 8 лет после его смерти электромагнитные волны были экспериментально получены Г. Герцем.

3. Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн. Электромагнитные волны возникают благодаря тому, что переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, а переменное магнитное поле в свою очередь порождает переменное электрическое поле.

Для образования интенсивных электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты в колебательном контуре, состоящем из конденсатора с емкостью C и катушки с индуктивностью L (рис. 3.1.2).

Однако большая частота электромагнитных колебаний еще не гарантирует интенсивного излучения электромагнитных волн. В обычном контуре (рис. 3.1.2) почти все магнитное поле сосредоточено внутри катушки, а электрическое – внутри конденсатора. Вдали от контура электромагнитного поля практически нет. Такой контур очень слабо излучает электромагнитные волны, поэтому называется **закрытым контуром**.

Для практического применения необходимо более интенсивное электромагнитное излучение. В 1887 году Г. Герц продемонстрировал простое устройство для получения электромагнитных волн, впоследствии названное **вибратором Герца**. Это устройство представляет собой **открытый колебательный контур**.

К открытому контуру можно перейти от закрытого, если постепенно раздвигать пластины конденсатора (рис. 3.1.2), уменьшая их площадь и одновременно уменьшая число витков в катушке. В конце концов получится просто прямой провод (рис. 3.1.3). Это и есть открытый колебательный контур. Емкость C и индуктивность L вибратора Герца были малы. Поэтому частота колебаний $\left(\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$

оказалась весьма велика.

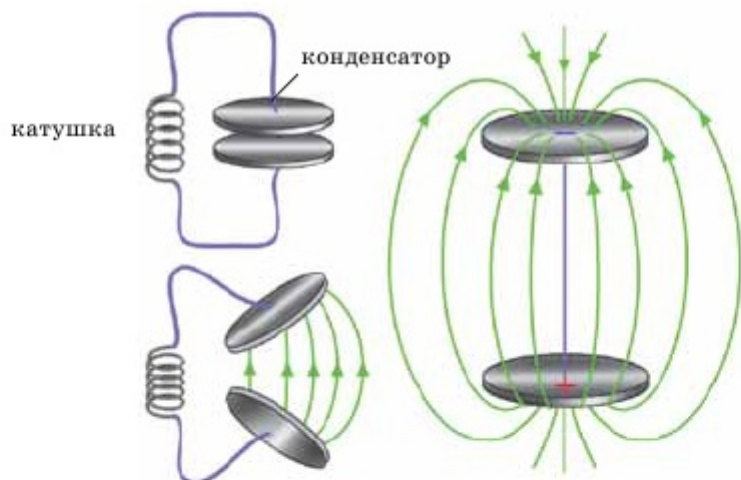


Рис. 3.1.2. Колебательные контуры разного формата

Для возбуждения колебаний в таком контуре во времена Герца поступали следующим образом. Провод разрезали посередине так, чтобы остался небольшой воздушный промежуток, называемый **искровым** (рис. 3.1.3). Обе части проводника заряжали до высокой разности потенциалов. Когда разность потенциалов превышала некоторое предельное значение, проскакивала искра (рис. 3.1.4), цепь замыкалась и в открытом контуре возникали колебания.

Колебания в открытом контуре затухают по двум причинам: во-первых, энергия контура затрачивается на выделение тепла Джоуля – Ленца ($Q = I^2Rt$) вследствие наличия у него активного сопротивления, во-вторых, из-за того, что вибратор излучает электромагнитные волны, которые уносят с собой лучистую энергию ($E = h\nu$). После того как колебания прекратятся, оба проводника вновь заряжаются от источника до наступления пробоя искрового промежутка, и все повторяется сначала.

В настоящее время для получения незатухающих колебаний в открытом колебательном контуре его связывают индуктивно с колебательным контуром генератора на транзисторе или с генераторами других типов.

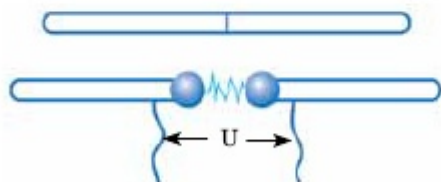


Рис. 3.1.3. Искровой промежуток

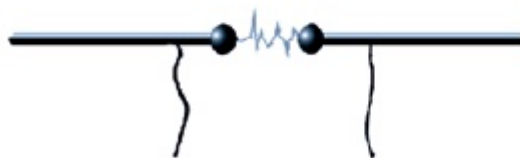


Рис. 3.1.4. Электромагнитное колебание в искровом промежутке

4. Плотность потока электромагнитного излучения. Электромагнитные волны, т.е. распространяемые излучения (рис. 3.1.5) несут с собой энергию. Энергетическую характеристику излучения представляет физическая величина, называемая *плотностью потока излучения*.

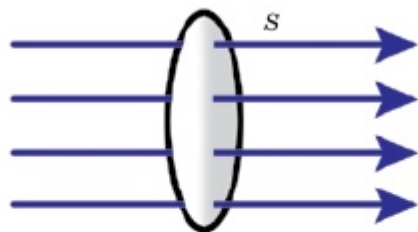


Рис. 3.1.5. Поток излучения

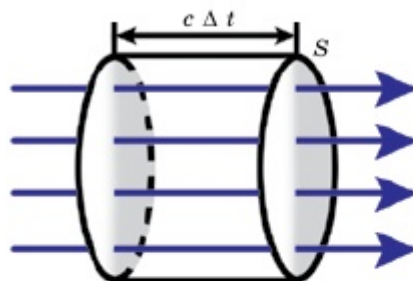


Рис. 3.1.6. Волновой цилиндр

Плотностью потока электромагнитного излучения I называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S , к произведению площади S на время Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}. \quad (3.1)$$

Фактически это мощность электромагнитного излучения (энергия в единицу времени), проходящего через единицу площади поверхности. Плотность потока излучения в СИ выражают *в ваттах на квадратный метр (Вт/м²)*. Иногда эту величину называют *интенсивностью* волны.

Величину I можно также выразить через плотность электромагнитной энергии w и скорость ее распространения c . Выберем поверхность площадью S , перпендикулярную лучам, и построим на ней, как на основании, цилиндр с образующей $c\Delta t$ (рис. 3.1.6). Объем цилиндра $\Delta V = Sc\Delta t$. Энергия электромагнитного поля внутри цилиндра равна произведению плотности энергии на объем: $\Delta W = wc\Delta tS$. Вся эта энергия за время Δt пройдет через правое основание цилиндра. Поэтому из (3.1) получаем:

$$I = \frac{wc\Delta tS}{S\Delta t} = wc. \quad (3.2)$$

Из этого вытекает вывод, что *плотность потока излучения равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения*.

5. Звезды излучают свет, т.е. электромагнитные волны. Так как расстояния до звезд в огромное число раз превышают их размеры, то именно *звезды представляют собой лучшую модель точечных источников*.

Энергия точечного источника излучения, которую несут с собой электромагнитные волны, с течением времени распределяется по все большей и большей поверхности. Поэтому энергия, переносимая через единичную площадку за единицу времени, т.е. плотность потока излучения, уменьшается по мере удаления от источника.

Выяснить *зависимость плотности потока излучения от расстояния до источника* можно, поместив точечный источник в центр сферы радиусом R . Тогда площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2$. Если считать, что источник по всем направлениям за время Δt излучает энергию ΔW , то формулу (3.2) можно представить следующим образом:

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}. \quad (3.3)$$

Из формулы вытекает следующий вывод: *плотность потока излучения от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника*.



Вопросы

1. Какое поле называется электромагнитным? Какими физическими величинами характеризуется электромагнитное поле? С какой скоростью оно распространяется?
2. Как излучаются электромагнитные волны? Как определяется частота электромагнитных волн, излучаемых колебательным контуром?

3. Кто впервые ввел понятие «электромагнитные волны» и предположил электромагнитную природу света? Кто на эксперименте доказал существование электромагнитной волны?
4. Какая величина называется плотностью потока электромагнитного излучения? Какова ее формула?
5. Как зависит плотность излучения от расстояния до точечного источника?

§ 3.2

Свойства электромагнитных волн

Электромагнитные волны *поглощаются, отражаются и преломляются* подобно всем другим видам волн, наблюдать эти явления нетрудно.

Современные радиотехнические устройства позволяют провести очень наглядные опыты по наблюдению свойств электромагнитных волн (рис. 3.2.1).

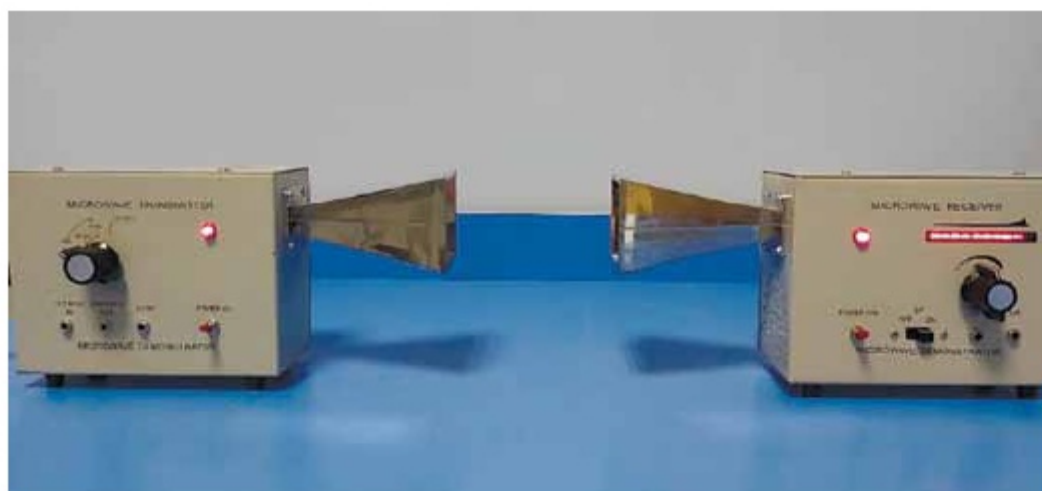


Рис. 3.2.1. Приборы для исследования свойств электромагнитных волн

При этом лучше всего пользоваться волнами сантиметрового диапазона. Эти волны излучаются специальным генератором сверхвысокой частоты (СВЧ). Электрические колебания генератора модулируют звуковой частотой. Принятый сигнал после детектирования подается на громкоговоритель.

Электромагнитные волны излучаются рупорной антенной в направлении оси рупора. Приемная антенна в виде такого же рупора улавливает волны, которые распространяются вдоль его оси. Общий вид такой установки изображен на рис. 3.2.1.



Генрих Герц (1857–1894) – немецкий физик, впервые экспериментально доказавший существование электромагнитных волн. Исследуя электромагнитные волны, Герц установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн. Работы Герца послужили экспериментальным доказательством справедливости теории электромагнитного поля и, в частности, электромагнитной теории света. Уравнения Максвелла в современной форме были записаны Герцем.

В 1886 г. Герц впервые наблюдал фотоэффект.

Поглощение электромагнитных волн.

Располагают рупоры друг против друга, добившись хорошей слышимости звука в громкоговорителе, помещают между рупорами различные диэлектрические тела. При этом замечают уменьшение громкости.

Отражение электромагнитных волн.

Если диэлектрик заменить металлической пластиной, то звук перестанет быть слышимым. Волны не достигают приемника вследствие отражения. Отражение происходит под углом, равным углу падения, как и в случае световых и механических волн. Чтобы убедиться в этом, рупоры располагают под одинаковыми углами к большому металлическому листу (рис. 3.2.2). Звук исчезает, если убрать лист или повернуть его.

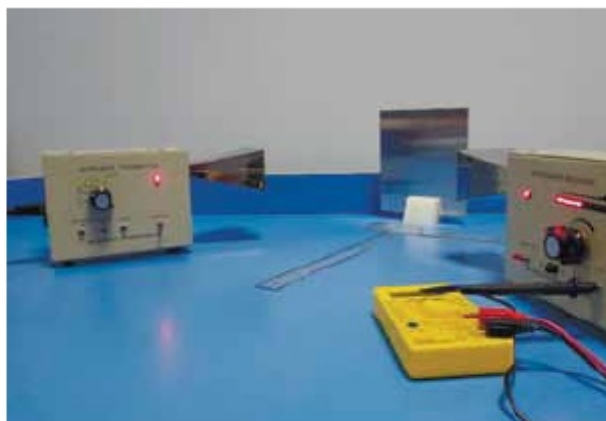


Рис. 3.2.2. Отражение электромагнитных волн

Преломление электромагнитных волн. Электромагнитные волны изменяют свое направление (преломляются) на границе диэлектрика. Это можно обнаружить с помощью большой треугольной призмы из парафина. Рупоры располагают под углом друг к другу, как и при демонстрации отражения. Металлический лист заменяют призмой. Убирая призму или поворачивая ее, наблюдают исчезновение звука.

Поперечность электромагнитных волн. Электромагнитные волны являются поперечными. Это означает, что векторы \vec{E} и \vec{B} электромагнитного поля волны перпендикулярны к направлению ее распространения. Колебания напряженности электрического поля волны, выходящей из рупора, происходят в определенной плоскости, а колебания вектора магнитной индукции – в плоскости, ей перпендикулярной. Волны с определенным направлением колебаний называются *поляризованными*. Приемный рупор с детектором принимает только поляризованную в определенном направлении волну. Это можно обнаружить, повернув передающий или приемный рупор на 90° . Звук при этом исчезает.

Электромагнитные волны также обладают свойствами интерференции и дифракции волн. Поляризация, интерференция и дифракция электромагнитных волн более подробно будут рассмотрены при изучении световой волны в следующей главе. Ниже будут показаны лишь условия возникновения интерференции и дифракции электромагнитных волн.

Интерференция и дифракция электромагнитных волн. Излученные из двух или более антенн электромагнитные волны в пространстве накладываются друг на друга. *Явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух волн с одинаковыми частотами называется интерференцией волн.*

При достижении одной и той же точки пространства двух электромагнитных волн, колеблющихся в одинаковой фазе, в результате интерференции амплитуда результирующего колебания будет максимальной при выполнении условия:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (3.4)$$

здесь $\Delta l = l_1 - l_2$ – разность хода волн; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; λ – длина волны.

Если разность хода волн равна:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (3.5)$$

то наблюдается минимум интерференции. Амплитуда результирующего колебания в этой точке будет минимальной. Для наблюдения интерференции электромагнитных волн рупоры передающей и принимающей антенн направим противоположно друг другу и начнем двигать горизонтально расположенный между ними металлический лист сверху вниз. Тогда услышим то усиливающийся, то ослабевающий звук. Передвигая металлический лист вверх или вниз, изменяем разность хода прямой и отраженной волн. В зависимости от того, какое из условий интерференции максимума или минимума выполняется, звук усиливается или ослабевает.

Отклонение волн от прямолинейного распространения или огибание волнами препятствий называется дифракцией. Дифракция волн проявляется особенно отчетливо в случаях, когда размеры препятствий соизмеримы с длиной волны или меньше нее: $d \leq \lambda$.

**Вопросы**

1. Какими свойствами обладают электромагнитные волны?
2. Как на опыте можно наблюдать такие свойства электромагнитных волн, как отражение, поглощение и преломление?
3. Какими еще свойствами обладают электромагнитные волны? Какие явления называются поляризацией, интерференцией и дифракцией волн?
4. Каковы условия возникновения интерференции и дифракции электромагнитных волн?



5. Закрытый колебательный контур превращен в открытый. Почему при этом свободные электромагнитные колебания в контуре быстрее затухают?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. катушка приемного контура радиоприемника имеет индуктивность 1 мкГн. Какова емкость конденсатора, если он настроен на частоту сигнала в приемнике, работающую на длине волны 1000 м?

Дано:	СИ	Решение:
$L = 1 \text{ мкГн}$	10^{-6} Гн	Частота сигнала в приемнике:
$\lambda = 1000 \text{ м}$		$v = \frac{c}{\lambda}.$
$C = ?$		(1)

Она должна быть равна собственной частоте ν_0 колебательного контура приемника:

$$\nu = \nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Из этих формул следует выражение для емкости конденсатора:

$$C = \left(\frac{\lambda}{2\pi c}\right)^2 \frac{1}{L}. \quad (3)$$

Вычисления:

$$C = \left(\frac{1000 \text{ м}}{6,28 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}\right)^2 \frac{1}{10^{-6} \text{ Гн}} \approx 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Ответ: $C \approx 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 3.2.1. Плотность энергии электромагнитной волны равна $4 \cdot 10^{-11} \text{ Дж/м}^3$. Найдите плотность потока излучения. (*Ответ:* 12 мВт/м^2 .)
- 3.2.2. На расстоянии 300 м от телевизионной башни Алматы плотность потока электромагнитного излучения (интенсивность) максимальна: 40 мВт/м^2 .

Найдите плотность потока излучения на расстоянии уверенного приема 120 км. (Ответ: 0,25 мкВт/м².)

Уровень В

- 3.2.3. Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре, если индуктивность катушки и емкость конденсатора увеличить в два раза? (Ответ: увеличится в 2 раза.)
- 3.2.4. Электромагнитные волны распространяются в некоторой однородной среде со скоростью $2 \cdot 10^8$ м/с. Какую длину волны имеют электромагнитные колебания в этой среде, если их частота в вакууме составляет 1 МГц? (Ответ: 200 м.)



Задание (теоретическое исследование)

Звуковая волна в воздухе и электромагнитная волна в воздухе имеют одинаковую длину 10 см. Опишите характер обеих волн (слышимая; неслышимая; свет, радиоволна и т.д.). Почему две волны одинаковой длины имеют столь разные свойства?

§ 3.3

Радиосвязь. Детекторный радиоприемник

1. Опыты Герца, описание которых появилось в 1888 г., заинтересовали физиков всего мира. Ученые стали искать пути усовершенствования излучателя и приемника электромагнитных волн. В России одним из первых занялся изучением электромагнитных волн преподаватель офицерских курсов в Кронштадте Александр Степанович Попов. Начав с воспроизведения опытов Герца, он затем использовал более надежный и чувствительный способ регистрации электромагнитных волн.

В качестве детали, непосредственно «чувствующей» электромагнитные волны, А. С. Попов применил так называемый *когерер*. Этот прибор представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. В трубке помещены мелкие металлические опилки. Действие прибора основано на влиянии электрических разрядов на металлические порошки. В обычных условиях когерер обладает большим сопротивлением, так как опилки имеют плохой контакт друг с другом. Пришедшая электромагнитная волна создает в когерере переменный ток высокой частоты. Между опилками проскакивают мельчайшие искорки, которые спекают опилки. В результате сопротивление когерера резко падает (в опытах А. С. Попова со 100 000 до 1000–500 Ом, т.е. в 100–200 раз). Снова вернуть прибору большое сопротивление можно, если встряхнуть его. Чтобы обеспечить автоматичность приема, необходимую для осуществления беспроводной связи, А. С. Попов использовал звоноковое устройство для встряхивания когерера после приема сигнала. Цепь электрического звонка замыкалась с помощью чувствительного реле в момент прихода электромагнитной волны. С окончанием приема волны работа звонка сразу прекращалась, так

как молоточек звонка ударял не только по звонковой чашечке, но и по когереру. С последним встряхиванием когерера аппарат был готов к приему новой волны. Схема приемника А. С. Попова приведена на *рис. 3.3.1*, взятом из его статьи в «Журнале Русского физико-химического общества».

Чтобы повысить чувствительность аппарата, А. С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки, создав *первую приемную антенну* для беспроводной связи. Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приема.

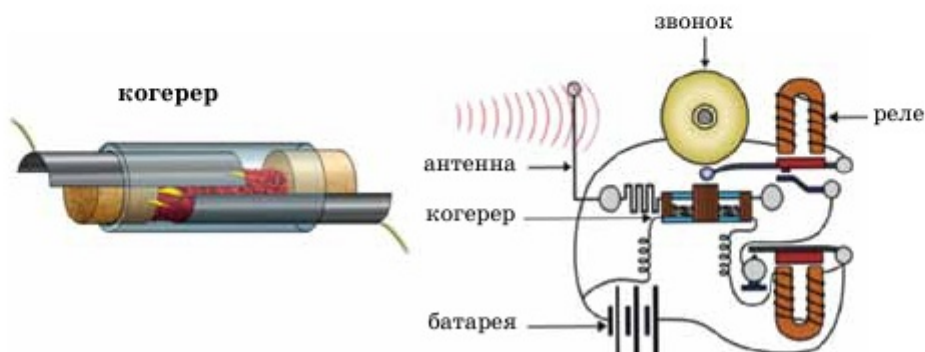


Рис. 3.3.1. Схема приемника Попова



**Александр
Степанович Попов**

(1859–1906) – русский физик, изобретатель радио. Убеденный в возможности связи без проводов с помощью электромагнитных волн, Попов построил первый в мире радиоприемник, применив в его схеме чувствительный элемент – когерер. Во время опытов по радиосвязи с помощью приборов А. Попова было впервые обнаружено отражение радиоволн от кораблей.

Хотя современные радиоприемники очень мало напоминают приемник А. С. Попова, основные принципы их действия те же, что и в его приборе. Современный приемник также имеет антенну, в которой приходящая волна вызывает очень слабые электромагнитные колебания. Как и в приемнике А. С. Попова, энергия этих колебаний не используется непосредственно для приема. Слабые сигналы лишь управляют источниками энергии, питающими последующие цепи. Сейчас такое управление осуществляется с помощью полупроводниковых приборов.

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал действие своего прибора, явившегося, по сути дела, первым в мире радиоприемником.

А. С. Попов продолжал настойчиво совершенствовать приемную и передающую аппаратуру. Он ставил своей непосредственной задачей построить прибор для передачи сигналов на большие расстояния.

В Европе усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили впервые осуществить радиотелеграфную передачу через Атлантический океан.

2. Принцип радиосвязи. Принцип радиосвязи заключается в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстро меняющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. генератора незатухающих электромагнитных колебаний.

Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов электромагнитных волн, стала возможной надежная и высококачественная *радиотелефонная связь* – передача речи или музыки с помощью электромагнитных волн.

При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне преобразуются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно будет передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн, однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что колебания звуковой частоты представляют собой сравнительно медленные колебания, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты почти совсем не излучаются. Поэтому используется другой способ, называемый *модуляцией*.

Модуляция – медленное по сравнению с периодом колебаний изменение амплитуды или частоты волны по определенной закономерности.

Примером модуляции является изменение по определенному закону амплитуды, частоты или фазы гармонических колебаний с целью внесения в колебательный процесс требуемой информации.

В рамках одного устройства для передачи информации используются низкочастотные колебания, передача которых на расстояние свыше нескольких метров крайне затруднительна, в силу быстрого ослабления. При этом путем модуляции высокочастотного сигнала возможно передавать сигналы на большие расстояния.

Простейшим видом модуляции высокочастотного сигнала является *амплитудная модуляция*.

Амплитудной модуляцией называется изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.

На *рис. 3.3.2* показаны три графика: а) график колебаний высокой частоты, которую называют несущей частотой; б) график колебаний звуковой частоты, т.е. модулирующих колебаний; в) график модулированных по амплитуде колебаний. Без модуляции нет ни телеграфной, ни телефонной, ни телевизионной передачи.

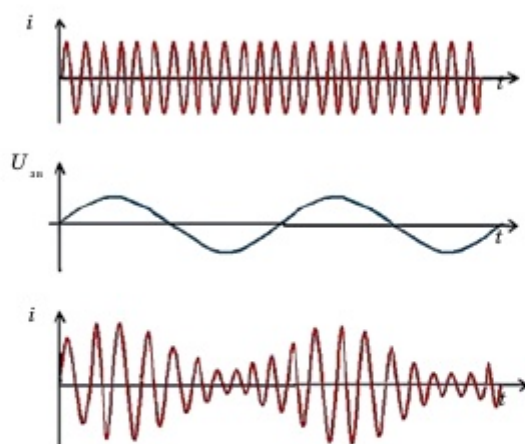


Рис. 3.3.2. Графики колебаний; а) график колебаний высокой частоты; б) график колебаний звуковой частоты; в) график модулированных по амплитуде колебаний

Принятый приемником модулированный высокочастотный сигнал даже после усиления не способен непосредственно вызвать колебания мембраны телефона или рупора громкоговорителя со звуковой частотой. Он может вызвать только высокочастотные колебания, не воспринимаемые нашим ухом. Поэтому в приемнике необходимо сначала из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты. Для этого к модулированным колебаниям применяют другой способ, называемый *детектированием (или демодуляцией)*.

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью – детектор. Таким элементом может быть электронная лампа (вакуумный диод) или полупроводниковый диод. В приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания.

Детектированием (демодуляцией) называется выделение из колебаний высокой частоты колебаний низкой частоты.

Осуществление радиосвязи основано на вышеописанных принципах модуляции и детектирования электромагнитных волн. Основные принципы радиосвязи представлены блок-схемой на *рис. 3.3.3*.

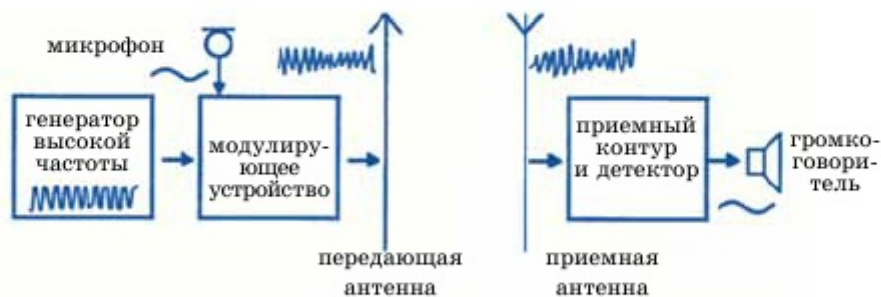


Рис. 3.3.3. Блок-схема радиосвязи

Простейший радиоприемник состоит из колебательного контура, связанного с антенной, присоединенной к контуру цепи, состоящей из детектора, конденсатора и телефона (рис. 3.3.4).

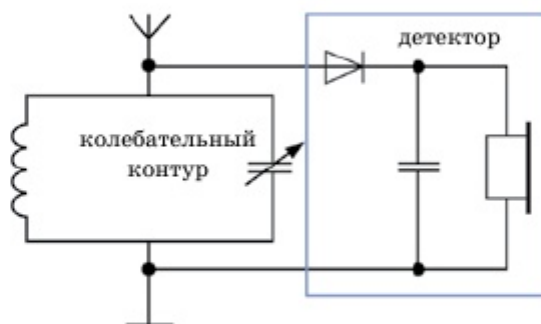


Рис. 3.3.4. Блок-схема простого радиоприемника

В колебательном контуре радиоволной возбуждаются модулированные колебания. Катушки телефонов играют роль нагрузки. Через них течет ток звуковой частоты. Небольшие пульсации высокой частоты не сказываются заметно на колебаниях мембраны и не воспринимаются на слух.

Модулировать можно *амплитуду* или *частоту* колебаний. Проще всего осуществляется амплитудная модуляция. При детектировании переменный ток выпрямляется и высокочастотные пульсации сглаживаются фильтром.

3. Распространение радиоволн. При использовании электромагнитных волн для радиосвязи как источник, так и приемник радиоволн чаще всего располагаются вблизи земной поверхности. Форма и физические свойства земной поверхности, а также состояние атмосферы сильно влияют на распространение радиоволн.

Особенно существенное влияние на распространение радиоволн оказывают слои ионизированного газа в верхних частях атмосферы на высоте 100–300 км над поверхностью Земли. Эти слои называют **ионосферой**. Ионизация воздуха верхних слоев атмосферы вызывается электромагнитным излучением Солнца и потоком заряженных частиц, излучаемых им.

Ионосфера отражает радиоволны с длиной волны $\lambda > 10$ м, как обычная металлическая пластина. Но способность ионосферы отражать и поглощать радиоволны существенно меняется в зависимости от времени суток и времени года.

Устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами на земной поверхности вне прямой видимости оказывается возможной благодаря отражению волн от ионосферы и способности радиоволн огибать выпуклую земную поверхность. Это огибание выражено тем сильнее, чем больше длина волны. Поэтому радиосвязь на больших расстояниях за счет огибания волнами Земли оказывается возможной лишь при длинах волн, значительно превышающих 100 м (средние и длинные волны).

Короткие волны (диапазон длин волн от 10 до 100 м) распространяются на большие расстояния только за счет многократных отражений от ионосферы

и поверхности Земли (рис. 3.3.5). Именно с помощью коротких волн можно осуществить радиосвязь на любых расстояниях между радиостанциями на Земле.

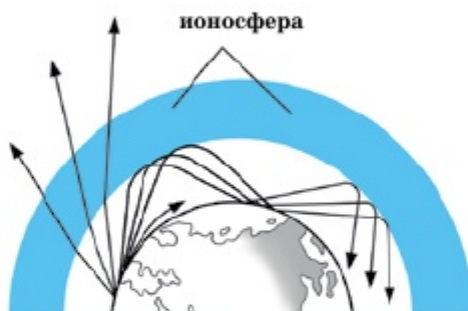


Рис. 3.3.5. Отражение коротких волн в ионосфере

Длинные радиоволны для этой цели менее пригодны из-за значительного поглощения поверхностными слоями Земли и ионосферой. Все же наиболее надежная радиосвязь на ограниченных расстояниях при достаточной мощности передающей радиостанции обеспечивается на длинных волнах.

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли. Поэтому они используются для радиосвязи между пунктами в пределах прямой видимости, а также для связи с космическими кораблями.

Распространение радиоволн существенно зависит от длины их волны. Короткие волны ($\lambda \sim 10\text{--}100$ м) многократно отражаются от ионосферы и поверхности Земли. Длинные волны ($\lambda > 100$ м) «скользят» вдоль поверхности Земли. Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу.

4. Радиолокация. В современной технике отражение радиоволн различными препятствиями находит широкое применение. Высокочувствительные приемники улавливают и усиливают отраженный сигнал с целью получить информацию о том, где находится тот предмет, от которого отразилась волна.

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют радиолокацией.

Радиолокационная установка – радиолокатор (или радар) – состоит из передающей и приемной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты ($10^8\text{--}10^{11}$ Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создается антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие сложения волн. Антенна устроена так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях при сложении волн происходит полное или частичное их взаимное гашение. Отраженная волна улавливается той же излучающей антенной либо другой,

тоже остронаправленной приемной антенной. Ярко выраженная направленность излучения позволяет говорить о «луче» радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приема отраженного сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отраженные волны.

Определение расстояния R производится путем измерения общего времени t прохождения радиоволн до цели и обратно. Так как скорость радиоволн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна, то $R = \frac{ct}{2}$.

Вследствие рассеяния радиоволн до приемника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Поэтому приемники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов (10^{12}) раз. Такой чувствительный приемник, разумеется, должен быть отключен на время отправки импульса передатчиком.

В момент отправки импульса светлая точка, равномерно движущаяся по экрану, отклоняется (рис. 3.3.6). На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности. Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приема слабого отраженного сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране вновь пропорционально времени t прохождения сигнала и, следовательно, пропорционально расстоянию R до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.

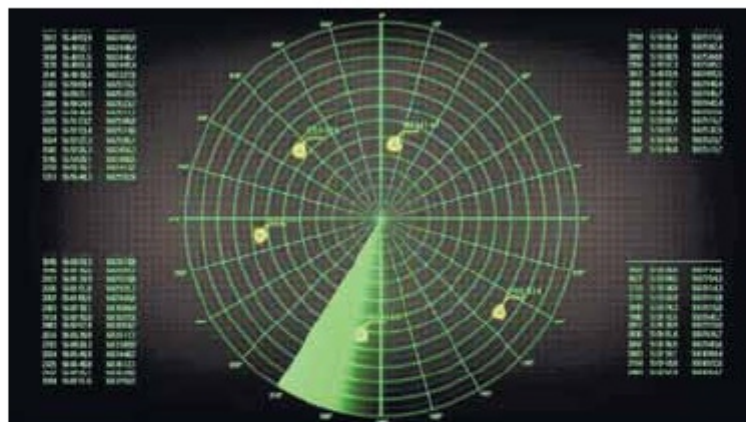


Рис. 3.3.6. Экран радиолокационной установки

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолеты на расстояниях до нескольких сотен километров. На их работу мало влияют условия погоды и время суток. В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими-

ми и идущими на посадку самолетами. Наземная служба передает по радио пилотам необходимые указания и таким образом обеспечивает безопасность полетов. Внешний вид локатора показан на *рис. 3.3.7*. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны. Оператор имеет перед глазами радиолокационную карту местности.



Рис. 3.3.7. Наземная радиолокационная служба

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. С помощью локаторов наблюдают метеоры в верхних слоях атмосферы. Локаторы используются службой погоды для наблюдения за облаками. Наконец, локаторы используются в космических исследованиях. Каждый космический корабль обязательно имеет на борту несколько радиолокаторов. В 1949 г. в США и Венгрии был осуществлен эксперимент по приему сигнала, отраженного от поверхности Луны. В 1961 г. советскими учеными произведена радиолокация планеты Венера, что позволило оценить период вращения планеты вокруг своей оси. В настоящее время осуществляется локация и других планет Солнечной системы.

28 апреля 2017 года Казахстан и Франция открыли совместное предприятие по производству радиолокационного оборудования «Groud Master 400» (казахстанский индекс – «NUR»), которое производит трехкоординатные радиолокационные станции. Радиолокационная техника в Казахстане является одной из лучших в мире по своим тактическим характеристикам, предназначена для радиолокационных исследований и контроля воздушного пространства.



Вопросы

1. Когда была осуществлена первая радиосвязь? Кто впервые разработал радио?
2. На основании каких принципов осуществляется радиосвязь?
3. В чем заключается физический смысл модуляции по амплитуде?
4. Для чего нужно детектирование электромагнитных колебаний? Как осуществляется детектирование с точки зрения физики?

5. Как можно представить блок-схему простого радиоприемника и объяснить принцип его работы?
6. Каковы особенности распространения различных радиоволн на поверхности Земли и в околоземном пространстве?
7. На каких свойствах радиоволн основан принцип работы радиолокатора? Где и для каких целей используется радиолокация?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне с длиной волны 300 м за время, равное периоду звуковых колебаний с частотой 2000 Гц?

Дано:

$$\lambda_a = 300 \text{ м}$$

$$\nu_a = 2000 \text{ Гц}$$

$$N = ?$$

Решение:

Период электромагнитной волны:

$$T_a = \frac{\lambda_a}{c},$$

где λ_a – длина электромагнитной волны.

Период звуковой волны:

$$T_z = \frac{1}{\nu_a},$$

где ν_a – частота звуковых колебаний.

Из этих формул находим число электромагнитных колебаний за период звукового колебания:

$$N = \frac{T_a}{T_z} = \frac{c}{\lambda_a \nu_a}.$$

$$N = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{300 \text{ м} \cdot 2000 \text{ Гц}} = 500.$$

Ответ: $N = 500$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 3.3.1. Чему равно расстояние до самолета, если посланный наземным радиолокатором сигнал после отражения от самолета возвратился через $2,0 \cdot 10^{-4}$ с? (Ответ: 30 км.)
- 3.3.2. Сигнал радиолокатора возвратился от объекта за $3 \cdot 10^{-4}$ с. Какое расстояние до объекта? (Ответ: 45 км.)

Уровень В

- 3.3.3. Определите период и частоту радиопередатчика, работающего на волне длиной 30 м. (Ответ: 10^{-7} с; 10 МГц.)
- 3.3.4. Определите частоту и длину волны радиопередатчика, если период его электромагнитных колебаний равен 10^{-6} с. (Ответ: 1 МГц; 300 м.)

**Задание (теоретическое исследование)**

Подготовьте доклад на тему «История радио», используя инфографику.

§ 3.4**Аналого-цифровые преобразователи. Каналы связи**

1. Аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (с англ. *Analog-to-digital-converter, ADC*) называют устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал, т.е. в «дискретный код». Как правило, АЦП – электронное устройство, преобразующее напряжение в двоичный цифровой код.

Обратное преобразование сигнала осуществляется с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Радиоволны используются не только для передачи звука, но и для передачи изображения (телевидение).

Принцип передачи изображений на расстояние состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Затем этими сигналами модулируют колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приемнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение. Для передачи движения используют принцип кино: немного отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадра) передают десятки раз в секунду (в телевидении 50 раз).

Телевизионные радиосигналы могут быть только в диапазоне ультракоротких (метровых) волн. Такие волны распространяются обычно лишь в пределах прямой видимости антенны. Поэтому для охвата телевизионным вещанием большой территории необходимо размещать телепередатчики чаще и поднимать их антенны выше. Алматинская телевизионная башня (Коктобе) высотой 372 метра является самой высокой в Казахстане. В настоящее время телевизионная сеть в нашей стране насчитывает несколько тысяч вещательных станций; их передачи принимают около 10 млн телевизоров.

Зона уверенного приема телевидения непрерывно увеличивается, особенно благодаря использованию ретрансляционных спутников.

2. Для передачи видеосигналов и их приема используются *аналого-цифровые преобразователи со специальными сигналами (рис. 3.4.1)*.

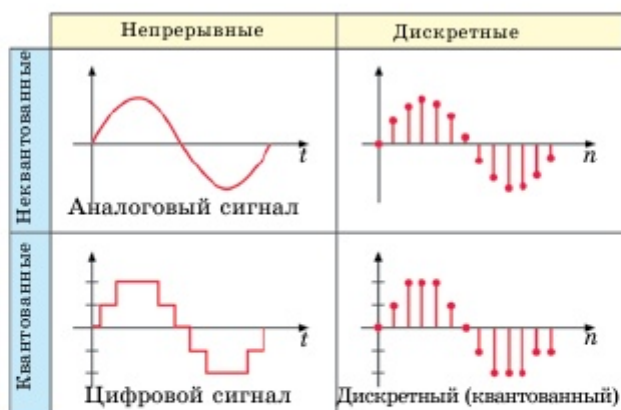


Рис. 3.4.1. Виды сигналов

Аналоговый сигнал представляет собой сигнал данных, у которого каждый из представляющих параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений.

Аналоговые сигналы часто используют для представления непрерывно изменяющихся физических величин. Например, аналоговый электрический сигнал, снимаемый с термопары, несет информацию об изменении температуры, сигнал с микрофона – о быстрых изменениях давления в звуковой волне. Аналоговое телевидение – один из видов телевидения.

В некоторых странах эфирное аналоговое телевидение заменяется цифровым.

Дискретный сигнал (от лат. *discretus* – «прерывистый», «разделенный») – сигнал, который является прерывистым (в отличие от аналогового) и который изменяется во времени и принимает любое значение из списка возможных значений. Список возможных значений может быть непрерывным или квантованным.

Существует путаница между понятиями дискретного и цифрового сигналов. Часто цифровой сигнал называют дискретным, потому что он состоит из дискретных (отдельных) частей (*samples*), несмотря на то, что цифровой сигнал не является прерывистым сигналом.

Дискретность применяется в вычислительной технике для пакетной передачи данных.

Цифровой сигнал – сигнал, который можно представить в виде последовательности дискретных (цифровых) значений. В наше время наиболее распространены двоичные цифровые сигналы (битовый поток) в связи с простотой кодирования и использованием в двоичной электронике. Для передачи цифрового сигнала по аналоговым каналам (например, электрическим или радиоканалам) используются различные виды манипуляции (модуляции).

Важным свойством цифрового сигнала, определившего его доминирование в современных системах связи, является его способность к полной регенерации в ретрансляторе. Действительно, когда в ретранслятор приходит сигнал с небольшими помехами, он преобразуется в цифровую форму, и ретранслятор

заново формирует сигнал, полностью убирая искажения. Аналоговый же сигнал удастся усилить лишь вместе с наложившимися на него шумами.

С другой стороны, если цифровой сигнал приходит с большими помехами, восстановить его невозможно, в то время как из искаженного аналогового сигнала можно извлечь часть информации, хотя и с трудом. Если сравнивать сотовую связь аналогового формата (AMPS, NMT) с цифровой связью (GSM, CDMA), то при помехах на цифровой линии из разговора выпадают порой целые слова, а на аналоговой можно вести разговор, хотя и с помехами.

Выход из данной ситуации осуществляется, в частности, регенерированием цифрового сигнала путем вставления регенераторов в разрыв линии связи или уменьшения длины линии связи (например, уменьшение расстояния от сотового телефона до базовой станции, что достигается более частым расположением базовых станций на местности).

Использование в цифровых системах алгоритмов проверки и восстановления цифровой информации позволяет существенно увеличить надежность передачи информации.

Основное различие между аналоговым и цифровым сигналами заключается в структуре передаваемого сигнала. Аналоговые сигналы представляют собой непрерывный поток колебаний с изменяющимися амплитудой и частотой. Цифровой сигнал представляет собой дискретные колебания, значения которых зависят от передающей среды.



Вопросы

1. Как осуществляются передача и прием изображений (видеосигналов)? Какие преобразователи для этого используются?
2. Какие специальные сигналы применяются для передачи и приема звука и изображения? В чем заключается их особенность?
3. Какие меры принимаются для расширения дальности сигнала и повышения качества его приема?

§ 3.5

Развитие средств связи

1. В современном мире существуют различные средства связи, которые постоянно развиваются и совершенствуются. **Связь – это важнейшее звено в системе хозяйства страны, способ общения людей, удовлетворения их производственных, духовных, культурных и социальных потребностей.**

К основным направлениям развития средств связи относятся: 1) радиосвязь; 2) телефонная связь; 3) телевизионная связь; 4) сотовая связь; 5) Интернет; 6) космическая связь; 7) фототелеграф (факс); 8) видеотелефонная связь; 9) телеграфная связь.

Радиосвязь – передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Имеются следующие виды радиосвязи: 1) радиотелеграфная; 2) радиотелефонная; 3) радиовещание; 4) телевидение.

28 апреля 2014 г. с космодрома Байконур был запущен национальный спутник связи и вещания «KazSat-3» (рис. 3.5.1).

Ввод в эксплуатацию спутника «KazSat-3» стал важным моментом для социально-экономического развития Республики Казахстан. Наличие собственных национальных спутников связи и вещания позволяет удовлетворить потребности страны в каналах фиксированной спутниковой связи, обеспечить информационную безопасность страны, устранить «цифровое неравенство» на территории государства.

В 2016 году полностью завершился переход национальных телеоператоров Республики Казахстан с иностранных на отечественные спутники связи и вещания.

Сегодня на базе спутника «KazSat-3» обеспечено цифровое телерадиовещание в форматах HD, DTH, IPTV по всей территории нашей республики.

Национальный оператор в области телерадиовещания страны АО «Казтелерадио» транслирует пакет программ спутникового телерадиовещания «OTAU TV».

Крупнейшим оператором фиксированной телефонии и национальной сети передачи данных в Казахстане является национальная компания «Казахтелеком». Компания предоставляет услуги широкополосного доступа в Интернет, интерактивного телевидения, сотовой связи, телеграфа, местной и дальней телефонной связи.

Оператор Caspio HD транслирует пакет телеканалов в HD-формате в любую точку страны, используя технологическую платформу «KazSat-3».

Ресурсы «KazSat-3» использует оператор «Алма ТВ», вещающий в формате HEVC. Данный формат позволяет увеличить количество каналов, улучшить качество и яркость картинки вещания, транслировать HD и Ultra HD (4K) каналы.

При создании спутника «KazSat-3» были использованы современные технические решения, позволяющие обеспечивать заданные характеристики аппарата и необходимый уровень надежности.



Рис. 3.5.1. Казахстанский спутник

2. В современных средствах связи широкое применение находит высокоскоростной Интернет. Доступ в широкополосный, или высокоскоростной Интернет осуществляется с использованием проводных, оптоволоконных и беспроводных линий связи различных типов.

Существуют различные типы подключения к сети Интернет. Это модемное подключение через телефонную сеть. Для настройки необходимо иметь домашний телефон и оператора связи, оборудование которого достаточно мощное для обеспечения доступа в Сеть.

Неудобство коммутируемой связи заключается в том, что соединение с Сетью происходит через ту же линию, что и дозвон. Поэтому одновременное использование Интернета и телефона невозможно. Кроме того, в среднем такое соединение позволяет выходить в Сеть с низкой скоростью передачи данных до 56 Кбит/с. При таком соединении скачивание файлов может растянуться на несколько недель.

ADSL – это еще один тип модемного соединения. Для него тоже требуется телефонная линия, но цифровой модем позволяет одновременно дозваниваться и выходить в Сеть. Пропускная способность линии при этом типе подключения к сети Интернет выше, чем в способе, описанном выше. Она обеспечивает абоненту достаточно высокую скорость доступа в Сеть – в среднем до 24 Мбит/с. Нагрузка на линию распределяется асимметрично – входящее соединение происходит быстрее, чем исходящее (скорость до 1,4 Мбит/с) (рис. 3.5.2). Из-за этого загружать файлы на сервер приходится дольше.



Рис. 3.5.2. Подключение через асимметричную цифровую абонентскую линию

Тип доступа, который обеспечивается по стандарту **DOCSIS** – передача данных через телевизионный кабель. Обычно его используют при отсутствии возможности использования услуг интернет-провайдеров. С его помощью можно получить скорость от 27 до 50 Мбит/с. Для настройки доступа необходимо наличие в доме кабельного телевидения и специального модема (рис. 3.5.3).



Рис. 3.5.3. Подключение через кабельное телевидение

Ethernet используется для подключения компьютера к Сети напрямую или через Wi-Fi-роутер (рис. 3.5.4). Пропускная способность такого канала выше, чем в случае с ADSL или телевизионным кабелем. Скорость передачи данных от 50 Мбит/с в обоих направлениях – как от компьютера к серверу, так и обратно.

Подключиться можно только при наличии широкополосного Интернета в доме абонента.



Рис. 3.5.4. Доступ через Ethernet-кабель

GPON – это технология настройки доступа в Сеть через персональную оптоволоконную линию (рис. 3.5.5). Она проводится от оборудования провайдера непосредственно в квартиру абонента. Этот тип настройки соединения с Сетью обеспечивает максимальную скорость передачи данных – до 1 Гб/с. Для подключения необходимо протянуть от общей линии кабель в квартиру абонента и установить оптический модем.



Рис. 3.5.5. Подключение через GPON



Рис. 3.5.6. Настройка доступа через антенну

Более распространенным, чем GPON, является подключение по *оптоволокну и витой паре*. При этом оптический кабель тянут до многоквартирного дома, а по абонентам Интернет разводят с помощью витой пары. Пропускная способность такого канала ниже.

К этой группе относятся *радио-, мобильный, спутниковый Интернет*. Для настройки доступа с помощью перечисленных каналов необходимы антенны (рис. 3.5.6).

Радиоинтернет работает через точку доступа, обеспечиваемую провайдером. Сигнал от нее распространяется на определенный радиус и поступает на оборудование абонента через антенну, установленную в квартире. Далее с помощью модема сигнал поступает на компьютер. Если точка доступа находится далеко, сигнал может оказаться слишком слабым. В таком случае, помимо антенны, используют усилители сигнала.

Мобильная связь работает через антенны, установленные в сотовых телефонах или USB-модемах, дополнительное оборудование не требуется. Этот тип подключения к сети Интернет самый доступный, но отличается невысокой пропускной способностью в сравнении с проводным подключением по выделенной линии.

Спутниковая связь устанавливается через уличные антенны, направленные на спутник. Из-за больших расстояний, которые должен преодолевать сигнал, обычно он поступает с задержкой. К другим недостаткам подключения относятся невысокая скорость соединения, нестабильная работа в плохую погоду, высокая

стоимость оборудования и абонентской платы. Однако в некоторых местностях спутниковая связь является единственным доступным каналом подключения (рис. 3.5.7).



Рис. 3.5.7. Антенна спутникового Интернета

Сотовый телефон – мобильный телефон, который предназначен для работы в сетях сотовой связи; использует радиоприемопередатчик, а также традиционную телефонную коммутацию для осуществления телефонной связи на территории зоны покрытия сотовой сети.

В настоящее время сотовая связь является самой распространенной из всех видов мобильной связи. Поэтому обычно мобильным телефоном называют именно сотовый телефон, хотя мобильными (кроме сотовых) являются еще и спутниковые телефоны, радиотелефоны и аппараты магистральной связи.

Мобильные телефоны являются беспроводными аппаратами (рис. 3.5.8). Это означает, что они не подключены к какой-либо стационарной электрической линии.



Рис. 3.5.8. Мобильные телефоны



Вопросы

1. По каким направлениям развиваются средства связи?
2. Что называется радиосвязью? Какие виды радиосвязи вы знаете?
3. Когда был запущен национальный спутник связи и вещания «KazSat-3»? В каких форматах осуществляется цифровое телерадиовещание на базе «KazSat-3»?

4. Какие виды интернет-связи существуют?
5. Какие виды сотовой связи существуют? В чем заключается особенность работы сотового телефона?



Задание (экспериментальное исследование)

Поместите карманный радиоприемник в ведро или кастрюлю и прикройте крышкой; радиоприем сразу прекратится. Объясните почему.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 3

- **Электромагнитными волнами** называют электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью.
- **Плотностью потока электромагнитного излучения I** называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S , к произведению площади S на время Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

- **Плотность потока излучения** равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения:




$$I = wc.$$

- **Интерференцией электромагнитных волн** называется явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух волн с одинаковыми частотами.
- **Условие максимума интерференции:** $\Delta l = k\lambda$; ($k = 0, 1, 2, \dots$).
- **Условие минимума интерференции:** $\Delta l = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$; ($k = 0, 1, 2, \dots$).
- **Дифракцией электромагнитных волн** называется отклонение волн от прямолинейного распространения или огибание волнами препятствий.
- **Условие возникновения дифракции:** $d \leq \lambda$.
- **Модуляция** – медленное по сравнению с периодом колебаний изменение амплитуды или частоты волны по определенной закономерности.
- **Амплитудной модуляцией** называется изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.
- **Детектированием** называется выделение из колебаний высокой частоты колебаний низкой частоты.
- Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют **радиолокацией**.
- **Радиосвязь** – передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.
- **Аналого-цифровым преобразователем** называется устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал, т.е. в «дискретный код».

Глава 4

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  описывать условия, необходимые для наблюдения интерференции и дифракции световых волн;
-  описывать применение дифракционной решетки для определения длины волны;
-  экспериментально исследовать поляризацию света.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
жарық интерференциясы	интерференция света	interference of light
жарықтың когеренттілігі	когерентность света	coherence of light
интерференциялық көрініс	интерференционная картина	interference pattern
жарық дифракциясы	дифракция света	diffraction of light
дифракциялық тор	дифракционная решетка	diffraction grating
тор тұрақтысы (периоды)	постоянная решетки (период)	lattice constant (period)
табиғи жарық	естественный свет	natural light
жарық поляризациясы	поляризация света	polarization of light
поляризацияланған жарық	поляризованный свет	polarized light

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «интерференция света», «когерентность света», «интерференционная картина», «дифракция света», «дифракционная решетка», «постоянная решетки», «естественный свет», «поляризация света», «поляризованный свет».

§ 4.1

Интерференция света. Дифракция света

1. Свет представляет собой электромагнитную волну. Электромагнитная волновая природа света проявляется в таких явлениях, как *интерференция*, *дифракция* и *поляризация волн*.

Мы познакомимся с явлением интерференции света, но прежде всего вспомните основные сведения об интерференции волн (см. главу 3).

Выясним, при каких условиях наблюдается интерференция световых волн. Для этого, исходя из аналогии механических и электромагнитных колебаний, рассмотрим более подробно сложение волн, образуемых на поверхности воды. В любой точке M на поверхности воды (рис. 4.1.1) будут складываться колебания,

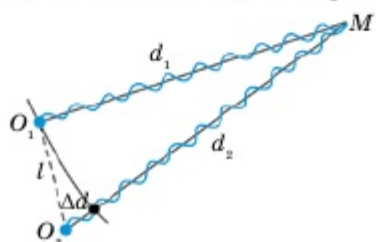


Рис. 4.1.1. Сложение двух волн

вызванные двумя волнами (от источников O_1 и O_2).

Результат сложения волн, приходящих в точку M , зависит от разности фаз между ними. Пройдя различные расстояния d_1 и d_2 , волны имеют разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$. Если разность хода равна длине волны λ , то вторая волна запаздывает по сравнению с первой на один период (именно за период волна проходит путь, равный ее длине волны λ). Следовательно, в этом случае гребни (как и впадины) обеих волн совпадают.

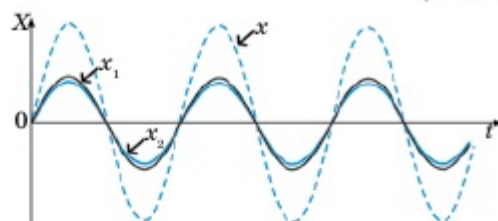


Рис. 4.1.2. Интерференция двух синфазных волн $A_x = A_{x1} + A_{x2} = A_{max}$

Условие максимумов. На рис. 4.1.2 изображена зависимость от времени смещений x_1 и x_2 , вызванных двумя волнами при $\Delta d = \lambda$. Разность фаз колебаний в этом случае равна нулю (или, что то же самое, 2π , так как период синуса равен 2π). В результате сложения этих колебаний возникают результирующие колебания с удвоенной амплитудой.

Колебания результирующего смещения x на рисунке показаны штриховой линией. То же самое будет происходить, если на отрезке Δd укладывается не одна, а любое целое число длин волн, которое определяет *условие максимумов* суперпозиции (сложения) волн.

Амплитуда колебаний максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в данной точке, равна целому числу длин волн:

$$\Delta d = \pm k\lambda, \quad (4.1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

Условие минимумов. Пусть теперь на отрезке Δd укладывается половина длины волны. Очевидно, что при этом вторая волна отстает от первой на половину

периода. Разность фаз оказывается равной π , т.е. колебания будут происходить в противофазе. В результате сложения этих колебаний амплитуда результирующих колебаний ($x = |x_1| + |x_2|$) равна нулю, т.е. в рассматриваемой точке колебаний нет (рис. 4.1.3). То же самое произойдет, если на отрезке Δd укладывается любое *нечетное* число *полуволин*, которое определяет условие минимумов суперпозиции волн.

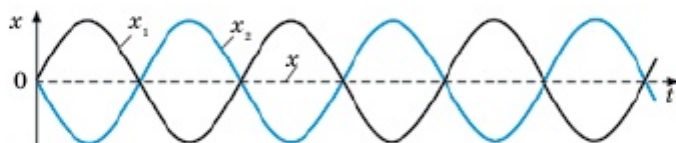


Рис. 4.1.3. Интерференция двух противофазных волн

$$A_x = A_{x_1} - A_{x_2} = A_{\text{max}} = 0$$

Амплитуда колебаний минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в данной точке, равна *нечетному* числу *полуволин*:

$$\Delta d = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (4.2)$$

Если разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$ принимает промежуточное значение между λ и $\frac{\lambda}{2}$, то и амплитуда результирующих колебаний принимает некоторое промежуточное значение между удвоенной амплитудой и нулем. Но важно то, что во всех случаях амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени; в результате будет наблюдаться *интерференционная картина*.

Интерференция света – частный случай, доказывающий его электромагнитную волновую природу. **Интерференцией света называется пространственное перераспределение светового потока при наложении двух или более когерентных световых волн, в результате которого в одних местах возникают максимумы интенсивности результирующей волны, а в других – минимумы.**

При каких условиях можно наблюдать интерференцию света? Необходимым условием для наблюдения интерференции света является **когерентность световых волн**, т.е. волны должны иметь *одинаковую частоту (длину волны)* и *постоянную разность фаз* во времени.

В 1802 г. английский ученый Томас Юнг поставил опыт, в котором наблюдал интерференцию света. Свет из узкой щели S падал на экран с двумя близко расположенными щелями S_1 и S_2 (рис. 4.1.4). Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширялся, и на белом экране световые пучки перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась

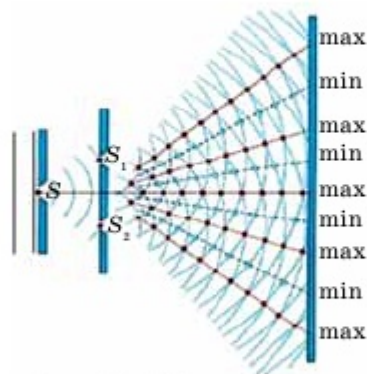


Рис. 4.1.4. Интерференция двух световых волн

интерференционная картина (аналогично как для механических волн) в виде чередующихся светлых и темных полос, представляющих максимумы и минимумы интенсивности света.

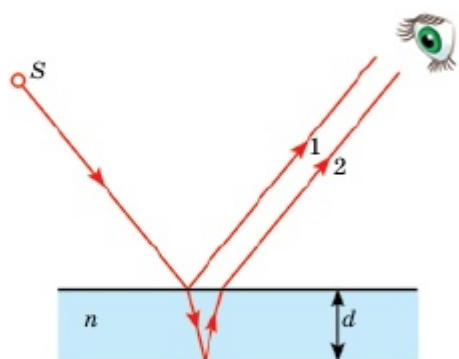


Рис. 4.1.5. Интерференция световых волн на тонких пленках

Явление интерференции света в тонких пленках широко наблюдается в естественных условиях, например: к интерференционным картинам света относятся такие явления, как радужная окраска мыльных пузырей, нефтяных пленок, масляных пятен на поверхности воды, крыльев насекомых, перламутр раковин, «игра» света в пленках голографических этикеток торговых фирм и т.д. Эти явления возникают в результате интерференции света, отраженного от передней и задней границ тонкой пленки (рис. 4.1.5).

Усиление света произойдет в том случае, если преломленная волна 2 отстанет от отраженной 1 на четное число длин волн. В результате сложения этих волн наблюдается интерференционная картина света. Если толщина пленки d меняется, то изменяется и вид интерференционных картин.

Различные цвета тонких пленок зависят от: толщины пленки; вещества, соприкасающегося с пленкой; угла падения; длины световой волны. Там, где пленка тоньше, усиливаются лучи с малой длиной волны (синие, фиолетовые), там, где толще – с большей длиной волны (оранжевые, красные).

Интерференционная картина возникает также в прослойке воздуха между плоской стеклянной пластиной и плоско-выпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис. 4.1.6). Эта интерференционная картина имеет вид концентрических колец, называемых **кольцами Ньютона**. Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы и частично отражается от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора между линзой и пластиной.

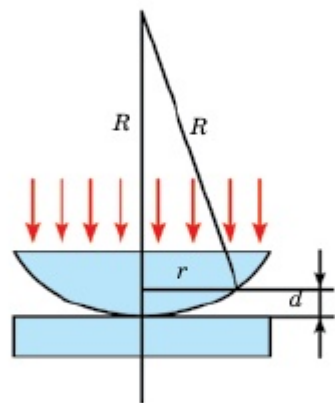


Рис. 4.1.6. Частный случай интерференции световых волн

2. Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и **дифракция света**. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной рассматриваемой волны, а длина световой волны, как известно, очень мала.

Для механических волн дифракцией называли огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути. Например, звук хорошо слышен за углом дома, т.е. звуковая волна его огибает; волна на поверхности воды также огибает препятствия, соизмеримые с собственной длиной волны.

Для наблюдения дифракции световых лучей нужны особые условия, это связано с малой длиной световых волн.

Дифракция света – огибание световыми волнами препятствий и захождение в область геометрической тени.

Условие наблюдения дифракции света: $d \leq \lambda$, где d – размер препятствия; λ – длина световых волн.

3. Между интерференцией и дифракцией нет существенных физических различий. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн. Но при интерференции происходит наложение лучей от дискретных когерентных источников, а при дифракции встречаются лучи от одного источника.

Исследование дифракции было завершено в работах О. Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и разработал количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля *каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причем все вторичные волны когерентны. Это положение позже стало называться принципом Гюйгенса – Френеля.*

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света замкнутой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства. Такие расчеты позволили понять, каким образом свет от точечного источника S , испускающего сферические волны, достигает произвольной точки B пространства (рис. 4.1.7).

Если рассмотреть вторичные источники на сферической волновой поверхности радиусом R , то результат интерференции вторичных волн от этих источников в точке B определяется лишь вторичными волнами на малом сферическом сегменте ab .

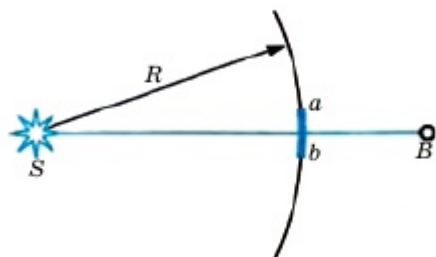


Рис. 4.1.7. Прямолинейное распространение пучка света

Действительно, вторичные волны, испущенные источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому все происходит так, как если бы свет распространялся вдоль прямой SB , т.е. прямолинейно.

На основе этой теории Френель доказал прямолинейность распространения света и рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях.

4. На *рис. 4.1.8* для примера представлены *дифракционные картины* света от различных препятствий: дифракция от нити (а); дифракция на диске (б); дифракция на круглом отверстии (в).

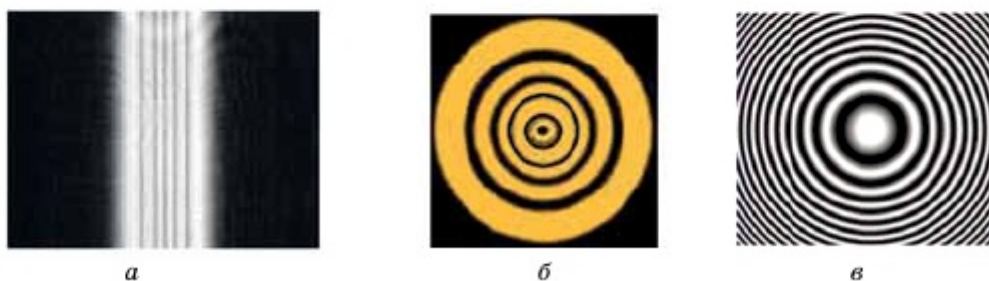


Рис. 4.1.8. Световые дифракционные картины

Как видно из рисунка, дифракционная картина может быть в виде светлых и темных полос или концентрических колец.

Волновая природа света налагает предел на возможность различия деталей предмета или очень мелких предметов, т.к. свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Поэтому изображения получаются нечеткими. Это возникает в том случае, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны. Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики. Огибание светом препятствий налагает предел на разрешающую способность важнейших оптических инструментов – телескопа и микроскопа.

Дополнительный материал



Радуга – оптическое явление, наблюдаемое при освещении ярким источником света (в природе Солнцем или Луной) множества водяных капель.

Радуга выглядит как разноцветная дуга или окружность, составленная из цветов спектра видимого излучения. Чтобы радуга смогла сформироваться, солнечный свет должен попасть в дождевую каплю под углом примерно 42° . Радугу можно увидеть и после наступления темноты. Такое явление называют лунной радугой. В этом случае лучи света преломляются при отражении от Луны, а не напрямую от Солнца.

Свет, преломленный в каплеобразной призме, всегда рассеивается в виде кольца – гало. Проверить это возможно, поднявшись над дождевыми облаками, взобравшись на горную вершину или взлетев на самолете. Свет, отраженный от определенных дождевых капель, отражается от других капель с совершенно разного угла для каждого из нас. Это и создает разные образы радуги.



Вопросы

1. Какие волны называют когерентными?
2. Что называют интерференцией света?
3. Почему для получения интерференционной картины в пленках они должны быть тонкими?
4. При освещении пленки монохроматическим светом в одних местах видны светлые пятна, а в других – темные? Как это можно объяснить?
5. Что такое кольца Ньютона? Как образуются?
6. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
7. Что называется дифракцией света?
8. Почему дифракцию механических волн наблюдать легче, чем дифракцию света?



Задание (экспериментальное исследование)

1. На проволочном кольце получите мыльную пленку и расположите ее вертикально. Что вы наблюдаете? Объясните наблюдаемое явление. Сравните ширину полос в верхней части пленки и в нижней. Объясните различие.
2. Рассмотрите лазерный диск. Что вы наблюдаете? Объясните наблюдаемое явление.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Сколько длин волн монохроматического света с частотой колебаний $5 \cdot 10^{14}$ Гц уложится на пути длиной 1,2 мм в вакууме?

Дано:
 $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц
 $l = 1,2$ мм

$N = ?$

СИ

$1,2 \cdot 10^{-3}$ м

Решение:

Число длин волн, укладываемых на пути длиной l , равно:

$$N = \frac{l}{\lambda},$$

где $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Следовательно: $N = \frac{l \cdot \nu}{c}$.

$$N = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{14}}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^3.$$

Ответ: $N = 2 \cdot 10^3$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 4.1.1. Сколько длин волн светового излучения с частотой $4 \cdot 10^{14}$ Гц укладывается на отрезке 1,5 м? (*Ответ: $2 \cdot 10^6$.*)
- 4.1.2. Разность хода двух когерентных лучей составляет 2,5 мкм. Определите длину волн видимого света (от 700 до 400 нм), которые дадут интерференционные максимумы. (*Ответ: 417 нм; 500 нм; 625 нм.*)
- 4.1.3. Найдите все длины волн света в интервале от $\lambda_1 = 400$ нм до $\lambda_2 = 600$ нм, которые будут максимально ослаблены в результате интерференции при разности хода лучей $\Delta d = 1,5$ мкм. (*Ответ: 429 нм; 600 нм.*)

Уровень В

- 4.1.4. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Расстояние между отверстиями равно 1 мм, расстояние от отверстий до экрана составляет 3 м. Найдите расстояние от центрального максимума до первой светлой полосы. (*Ответ: 1,8 мм.*)

§ 4.2**Дифракционные решетки**

1. Начиная с середины XIX века *дифракционная решетка* стала важнейшим инструментом спектроскопии. С ее помощью ученые исследуют спектры излучения светящихся объектов и спектры поглощения различных веществ и по ним определяют их химический состав. Одним из важнейших открытий Фраунгофера стало обнаружение темных линий в спектре Солнца. Сегодня мы знаем, что они возникают в результате поглощения световых волн определенной длины относительно холодным веществом солнечной короны, и благодаря этому можем судить о химическом составе нашего светила.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками.

Чтобы изготовить решетку, на стеклянную пластинку алмазным резцом с помощью делительной машины наносят ряд параллельных штрихов (рис. 4.2.1). Штрихи являются непрозрачными промежутками, а неповрежденные места между ними – прозрачными щелями. На каждый миллиметр длины решетки наносятся от 100 до 1200 штрихов, а всего решетка может содержать более 100 000 штрихов и такое же количество щелей. Виды дифракционных решеток: *отражательные,*

где штрихи нанесены на зеркальную (металлическую) поверхность, на которых наблюдение ведется в отраженном свете; **прозрачные**, где штрихи нанесены на прозрачную поверхность или вырезаются в виде щелей на непрозрачном экране, на которых наблюдение ведется в проходящем свете.

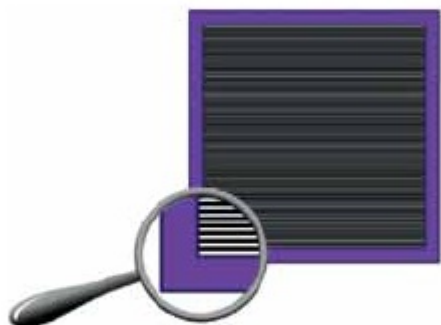


Рис. 4.2.1. Дифракционная решетка

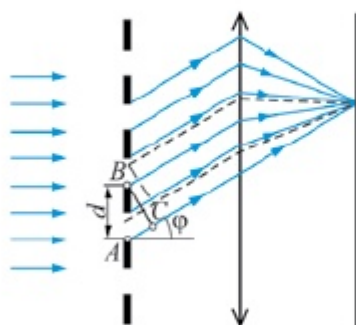


Рис. 4.2.2. Дифракция света от решетки

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна a , а ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна b , то их сумма называется **периодом решетки** (рис. 4.2.2):

$$d = a + b. \quad (4.3)$$

2. Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решетки. Пусть на решетку (рис. 4.2.2) падает плоская монохроматическая волна длиной λ .

Вторичные источники, расположенные в щелях, создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим, например, волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ . Разность хода между волнами от краев соседних щелей в соответствии с формулой (4.1) равна длине отрезка AC . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн ($\Delta l = AC = k\lambda$), то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC можно найти длину катета AC : $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$. Тогда дифракционно-интерференционные **максимумы** волн, проходящих через щели решетки, будут наблюдаться под **углом** φ , в соответствии с условием:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (4.4)$$

где величина $k = 0, 1, 2, \dots$ определяет порядок спектра.

Нужно иметь в виду, что при выполнении данного условия усиливают друг друга не только волны, идущие от нижних краев щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Таким образом, дифракционно-интерференционная картина от решетки становится более контрастной и яркой.

За решеткой помещают собирающую линзу и за ней – экран на фокусном расстоянии от линзы. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной

точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление. Углы φ , удовлетворяющие условию (4.4), определяют положение максимумов на экране.

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k = 0$) зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр. Чем больше λ , тем дальше от центрального максимума располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны. Каждому значению k соответствует свой порядок спектра.

Между максимумами расположены минимумы освещенности. Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены. Световая энергия, падающая на решетку, перераспределяется ею так, что большая ее часть приходится на максимумы, а в область минимумов попадает незначительная часть энергии.

С помощью дифракционной решетки можно проводить очень точные измерения длины волны каждого монохроматического излучения света. Если период d решетки известен, то определение длины волны каждого монохроматического излучения сводится к измерению угла φ , соответствующего направлению на максимум данного излучения, а затем вычисляется по формуле (4.4).



Дополнительный материал

Глория – оптическое явление, наблюдаемое на облаках, расположенных прямо напротив источника света. Наблюдатель должен находиться на горе или в воздухе, а источник света (Солнце или Луна) – за его спиной. Оно представляет собой цветные кольца света на облаке вокруг тени наблюдателя. Внутри находится голубоватое кольцо, снаружи – красноватое, далее кольца могут повторяться с меньшей интенсивностью. Это явление объясняется на основе дифракции света.



Вопросы

1. Что называется дифракционной решеткой?
2. Как определить период дифракционной решетки?
3. Почему в центральной части спектра, полученного на экране при освещении дифракционной решетки белым светом, всегда наблюдается белая полоса?
4. Как изменяется картина дифракционного спектра при удалении экрана от решетки?
5. Зависит ли положение максимумов освещенности, создаваемых дифракционной решеткой, от числа щелей?

**Задание (творческое исследование)**

Подготовьте компьютерную презентацию о применении дифракционной решетки.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм максимум пятого порядка отклонен на угол $\varphi = 18^\circ$?

Дано:	СИ	Решение: Из условия для дифракционных максимумов $d \sin \varphi = k\lambda$, находим период $d = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}$. (1)
$l = 1$ мм	10^{-3} м	
$k = 5$		
$\lambda = 0,6$ мкм	$0,6 \cdot 10^{-6}$ м	
$\varphi = 18^\circ$		
$N = ?$		

Зная длину и число штрихов дифракционной решетки, ее период определяется:

$$d = \frac{l}{N}. \quad (2)$$

Приравняем (1) и (2): $\frac{l}{N} = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}$, получим $N = \frac{l \cdot \sin \varphi}{k\lambda}$.

$$N = \frac{10^{-3} \cdot 0,3}{5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}} = 100.$$

Ответ: $N = 100$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 4.2.1. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет, длина волны которого равна 600 нм. Определите период решетки, если максимум третьего порядка наблюдается под углом 30° . (*Ответ:* 3,6 мкм.)
- 4.2.2. Определите число штрихов на 1 мм дифракционной решетки, если углу 30° для монохроматического света с длиной волны 500 нм соответствует максимум второго порядка. (*Ответ:* 500 штрихов.)

Уровень В

- 4.2.3. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. Во сколько раз период решетки больше длины волны, если максимум второго порядка наблюдается под углом 30° ? (*Ответ:* в 4 раза.)

- 4.2.4. Световая волна длиной 530 нм падает перпендикулярно на прозрачную дифракционную решетку, постоянная которой равна 1,8 мкм. Определите угол дифракции, под которым образуется максимум наибольшего порядка. (Ответ: 62°.)
- 4.2.5. Спектры второго и третьего порядков в видимой области дифракционной решетки частично перекрываются друг другом. Какой длине волны в спектре третьего порядка соответствует длина волны 700 нм в спектре второго порядка? (Ответ: 467 нм.)

Лабораторная работа № 2.

Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Цель работы: определить длину световых волн в различных областях спектра с помощью дифракционной решетки.

Оборудование: дифракционная решетка; источник света; линейная установка для определения длины волны света.

Теория работы. Дифракция света наиболее отчетливо наблюдается с помощью дифракционной решетки. Длина волны λ определяется по формуле: $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$, где d – период решетки; k – порядок спектра; φ – угол, под которым наблюдается максимум света соответствующего цвета.

Так как угол φ мал (расстояние между решеткой и экраном a много больше, чем расстояние b от щели до места, где наблюдается максимум волны определенной длины), поэтому имеем:

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \frac{b}{a}.$$

Отсюда следует, что длина волны равна:

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

Порядок работы:

1. Дифракционную решетку необходимо поместить в рамку прибора (рис. 4.2.3) и укрепить ее на подставке подъемного столика.
2. Экран необходимо установить на расстоянии 50 см от дифракционной решетки.
3. Глядя сквозь дифракционную решетку и щель в экране на источник света и перемещая решетку в держателе, установите ее так, чтобы дифракционные спектры располагались параллельно шкале экрана.



Рис. 4.2.3

4. Вычислите длину волны красного света в спектре 1-го порядка справа и слева от щели в экране, определите среднее значение результатов измерения.
5. Прodelайте то же для фиолетового света.
6. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения (см. п. 5 лабораторной работы № 1).
7. Запишите вывод: что вы измеряли, какой получен результат.
8. Для осмысления проведенной работы обсудите в группах следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 2

1. В чем состоит явление дифракции? Когда дифракция наиболее заметно выражена?
2. Что такое дифракционная решетка? Для чего подобные решетки используются?
3. Что представляет собой прозрачная дифракционная решетка?
4. Почему при освещении белым светом в центральной части дифракционной картины возникает белая полоса?

§ 4.3

Поляризация света

1. Рассмотренные явления интерференции и дифракции света – прямое доказательство его волновой природы. Однако существует еще одно явление, называемое *поляризацией света*, которое также объясняется ее волновой теорией.

Поляризацией света называется физическая характеристика излучения, описывающая поперечную анизотропию световых волн. Такая характеристика означает неэквивалентность различных направлений колебаний световых волн в плоскости, перпендикулярной световому лучу (см. рис. 3.1.1).

Рассмотрим подробно простой и эффектный *опыт с кристаллами турмалина*, где наглядно устанавливается как *поперечность*, так и *осевая асимметричность* световых волн.

Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее граней была параллельна оси кристалла.

Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 4.3.1). Можно подумать, что свет

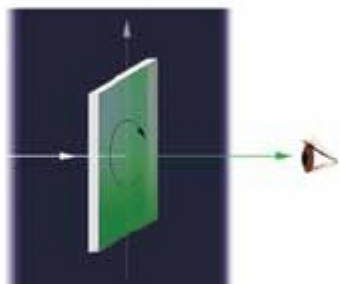


Рис. 4.3.1. Прохождение света через пластину турмалина

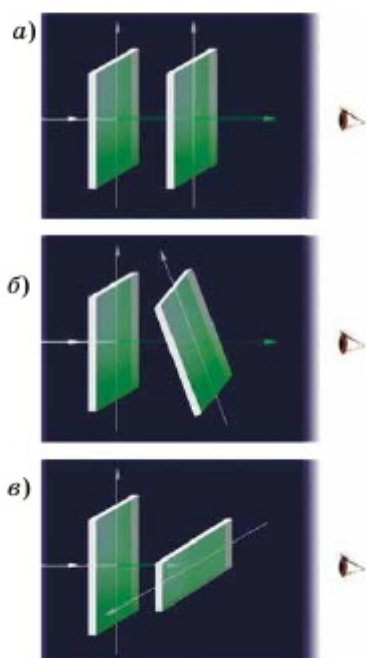


Рис. 4.3.2. Прохождение света через две пластины турмалина: а) свет проходит через двойную пластину; б) свет слабо проходит, когда вторую пластину поворачивают; в) свет вообще не проходит

только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Однако это не так. Световая волна проявляет свои новые свойства.

Эти новые свойства явно проявляются, если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 4.3.2, а), параллельный первому. При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 4.3.2, б), то обнаружится удивительное явление – гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 4.3.2, в). Он целиком поглощается вторым кристаллом.

2. Полное объяснение результатов описанного опыта можно получить, сделав два предположения. Первое предположение относится к самому свету. Свет – поперечная волна. В падающем от обычного источника пучке световых волн происходят колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн (рис. 4.3.3).

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной. Волны, например, на поверхности воды такой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Световой поток, в котором колебания происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн, называется **естественным светом**.

Это название оправданно, так как в обычных условиях источники света излучают такой поток. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, потому что пада-

ющая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

Второе предположение относится к кристаллу. Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, происходящими в одной определенной плоскости (плоскость P на рис. 4.3.4). Такой свет называется **поляризованным** или, точнее, **плоскополяризованным** в отличие от естественного света.

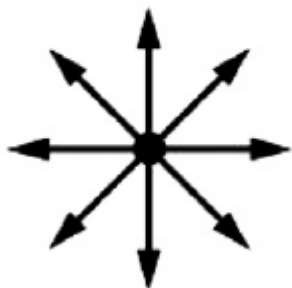


Рис. 4.3.3. Распространение естественного света

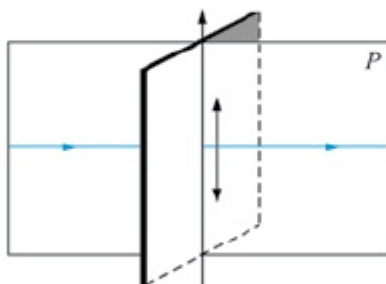


Рис. 4.3.4. Турмалин избирательно пропускает свет

Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещенных кристаллах (угол между их осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от 90° , то происходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые **поляроиды**. Поляроид представляет собой тонкую пленку кристаллов герпатита, нанесенную на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно провести те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно получать пленки с большими поверхностями, поляризующие свет.



Вопросы

1. Какая характеристика излучения называется поляризацией света? Возможна ли поляризация для продольных волн? Почему?
2. На основе какого опыта можно обнаружить поперечную анизотропность световых волн? Как можно объяснить результат данного опыта?
3. Что называется естественным светом? Чем отличается естественный свет от поляризованного?
4. Что представляет собой поляроид?

Лабораторная работа № 3. Наблюдение поляризации света

Цель работы: изучить свойства поляризованного света.

Оборудование: 1) две линзы (+50, +100 мм); 2) два поляроида; 3) круглая диафрагма в держателе; 4) галогенная лампа; 5) экран; 6) штатив; 7) источник питания 12 В; 8) соединительные провода.

Порядок работы:

1. Необходимо собрать установку в следующем порядке: лампа – линза (+50 мм) – полярироид (поляризатор) – линза (+100 мм) – полярироид (анализатор) – экран (рис. 4.3.5).



Рис. 4.3.5. Установка для наблюдения поляризации света

2. Проведите наблюдение, что при вращении поляроида (поляризатора) вокруг луча интенсивность света не меняется.
3. Пронаблюдайте изменение интенсивности прошедшего через полярироид (анализатор) света в зависимости от его поворота относительно луча.
4. Располагая оси полярироидов перпендикулярно друг другу, наблюдайте полное гашение света.
5. Проанализируйте наблюдаемое и сделайте чертеж-вывод.
6. Для осмысления проведенной работы обсудите в группах вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 3

1. Когда проявляется явление поляризации света?
2. Как можно объяснить принцип работы полярироидов?

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 4

- **Интерференцией волн** называют сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны при интерференции волн.

- **Условие максимумов** результирующей волны при интерференции волн:

$$\Delta d = \pm k\lambda.$$

- **Условие минимумов** результирующей волны при интерференции волн:

$$\Delta d = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

- **Интерференцией света** называется пространственное перераспределение светового потока при наложении двух или более когерентных световых волн, в результате которого в одних местах возникают максимумы интенсивности результирующей волны, а в других – минимумы.

- **Дифракция света** – огибание световыми волнами препятствий и захождение в область геометрической тени.

- **Условие наблюдения дифракции света:** $d \leq \lambda$.

- **Дифракционная решетка** – совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками. С помощью дифракционной решетки, точно измерив угол φ , под которым виден максимум того или иного максимума монохроматического составляющего света, можно определить его длину волны по формуле:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где d – постоянная решетки: $d = a + b$; a – ширина щели; b – ширина непрозрачного промежутка.




- **Поляризация света** – физическая характеристика излучения, описывающая поперечную анизотропию световых волн. Такая характеристика означает неэквивалентность различных направлений колебаний световых волн в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

Глава 5



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  экспериментально определять показатель преломления стекла;
-  объяснять преимущества оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов;
-  строить и объяснять ход лучей в лупе, телескопе, микроскопе.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
жарықтың түзусызықты таралу заңы	закон прямолинейного распространения света	law of direct light propagation
жарықтың шағылу заңы	закон отражения света	law of reflection
жарықтың сыну заңы	закон преломления света	law of refraction
толық ішкі шағылу	полное внутреннее отражение	total internal reflection
оптикалық талшық	оптическое волокно	optical fiber
оптикалық аспап	оптический прибор	optical instrument
бұрыштық үлкейту	угловое увеличение	angular magnification
лупа	лупа	magnifying glass
телескоп	телескоп	telescope
микроскоп	микроскоп	microscope

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «закон прямолинейного распространения света», «закон отражения света», «закон преломления света», «полное внутреннее отражение», «оптическое волокно», «оптический прибор», «угловое увеличение», «лупа», «телескоп», «микроскоп».

§ 5.1

Законы геометрической оптики

1. Основные законы геометрической оптики были известны задолго до установления физической природы света. Рассмотрим эти законы.

Закон прямолинейного распространения света: *в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.*

Опытным доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении светом источника достаточно малых размеров. Следует отметить, что закон прямолинейного распространения света нарушается и понятие «световой луч» утрачивает смысл, когда свет проходит через малые отверстия или обходит преграды, размеры которых сравнимы с длиной волны, о чем было сказано в предыдущей главе.

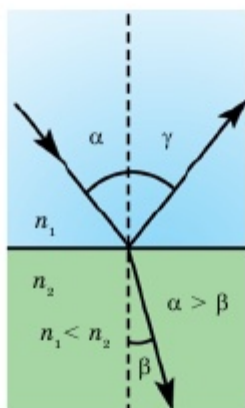


Рис. 5.1.1. Отражение и преломление светового луча на границе двух прозрачных сред с различной оптической плотностью

На границе раздела двух прозрачных сред с разной оптической плотностью (рис. 5.1.1) свет может частично *отразиться* так, что часть световой энергии будет распространяться в первой среде по новому направлению под углом γ ; а часть, пройдя через границу, *преломляется* под углом β к нормали на границе, и продолжает распространяться во второй среде.

Закон отражения света: падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (плоскость падения). *Угол отражения γ равен углу падения α .*

Закон преломления света: а) *падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости;* б) *отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для двух данных сред:*

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (5.1)$$

где α – угол падения пучка света; β – угол преломления светового пучка.

Постоянную величину n_{21} называют *относительным показателем преломления двух сред*. Если первой средой служит вакуум, то показатель преломления среды относительно него называют *абсолютным показателем преломления среды*, который определяется отношениями скоростей света в вакууме и в той

или иной среде, например: $n_1 = \frac{c}{v_1}$; $n_2 = \frac{c}{v_2}$.

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления: $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$. (5.2)

Физический смысл относительного показателя преломления определяется отношением скорости распространения волн в первой среде v_1 к скорости их распространения во второй среде v_2 :

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c}{v_2} : \frac{c}{v_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5.3)$$

2. Покажем, как измеряется *показатель преломления стеклянной пластины*, имеющей форму трапеции. На одну из параллельных граней пластины наклонно к ней направляют узкий световой пучок (рис. 5.1.2). Проходя через пластину, этот пучок света испытывает двукратное преломление. Источником света служит электрическая лампочка, подключенная через ключ к какому-либо источнику тока. Световой пучок создается с помощью металлического экрана с щелью. При этом ширина пучка может меняться за счет изменения расстояния между экраном и лампочкой.

Показатель преломления стекла относительно воздуха определяется по формуле (5.1). Для определения отношения, стоящего в правой части формулы, поступают следующим образом. Перед тем как направить на пластину световой пучок, ее располагают на столе на листе миллиметровой бумаги (или на листе бумаги в клетку) так, чтобы одна из ее параллельных граней совпала с предварительно отмеченной линией на бумаге. Эта линия укажет границу раздела сред воздух – стекло. Тонко заточенным карандашом проводят линию вдоль второй параллельной грани. Эта линия изображает границу раздела сред стекло – воздух. После этого, не смещая пластины, на ее первую параллельную грань направляют узкий световой пучок под каким-либо углом α к грани. Вдоль падающего на пластину и вышедшего из нее световых пучков тонко заточенным карандашом ставят точки 1, 2, 3 и 4. После этого лампочку выключают, пластину снимают и с помощью линейки прочерчивают входящий, выходящий и преломленный лучи (рис. 5.1.2).

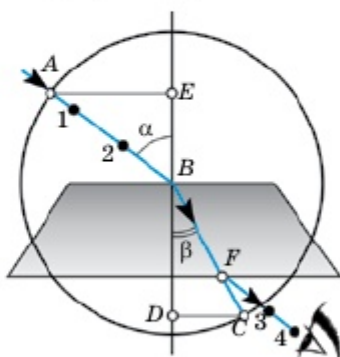


Рис. 5.1.2. Направление падающего и преломленного лучей

Через точку B границы раздела сред воздух – стекло проводят перпендикуляр к границе, отмечают углы падения α и преломления β . Далее с помощью циркуля проводят окружность с центром в точке B и строят прямоугольные треугольники ABE и CBD . Как видно из треугольников: $\sin \alpha = \frac{AE}{AB}$, $\sin \beta = \frac{CD}{BC}$ и $AB = BC$, то формула для определения показателя преломления стекла примет вид $n = \frac{AE}{DC}$. Длины отрезков AE и DC измеряем по миллиметровой бумаге или с помощью линейки.

3. При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную, например, из воздуха в стекло или воду, $v_1 > v_2$ и, следовательно, согласно закону преломления (5.1), показатель преломления $n > 1$. Поэтому $\alpha > \beta$ (рис. 5.1.1): в результате преломления луч приближается к нормали на границе раздела сред.

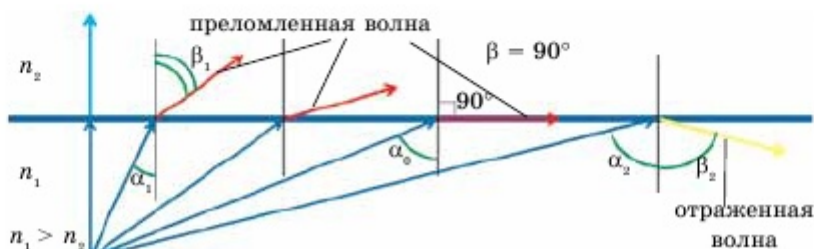


Рис. 5.1.3. Преломление и отражение света на границе двух сред, где $n_1 > n_2$

Если же направить луч света в обратном направлении – из оптически более плотной среды в оптически менее плотную вдоль ранее преломленного луча, (рис. 5.1.3), то закон преломления можно записать так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.4)$$

Преломленный луч по выходе из оптически более плотной среды будет направлен по линии ранее падавшего луча, поэтому $\alpha_1 < \beta_1$, т.е. преломленный луч отклоняется на сей раз от нормали. По мере увеличения угла α угол преломления β также увеличивается, оставаясь все время больше угла α . Наконец, при некотором угле падения α значение угла преломления β приблизится к 90° , и преломленный луч будет направлен почти по границе раздела двух сред (рис. 5.1.3). Наибольшему возможному углу преломления $\beta = 90^\circ$ соответствует угол падения α_0 .

Угол падения α_0 , соответствующий углу преломления 90° , называют *предельным углом полного отражения*.

При $\sin \beta = \sin 90^\circ = 1$ формула (5.4) принимает вид: $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$. (5.5)

Когда $\alpha > \alpha_0$ (рис. 5.1.3), преломленная волна исчезает, при этом падающая на границу раздела двух сред электромагнитная волна полностью отражается от нее. Таким образом происходит *полное внутреннее отражение*, т.е. излучение полностью возвращается обратно в более плотную среду.

Формула (5.5) позволяет определить предельный угол полного отражения, зная показатели преломления двух сред n_1 (для более плотной среды) и n_2 (для менее плотной среды). Обычно менее плотной средой является вакуум (или воздух), у которого $n_2 \approx 1$. В этом случае формула (5.5) имеет вид:

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}, \quad (5.6)$$

где n – показатель преломления более плотной среды.

4. Полное внутреннее отражение света. Для осуществления полного внутреннего отражения, как это вытекает из вышеизложенного, необходимо выполнить два условия. *Во-первых*, излучение должно падать на границу двух сред из среды, имеющей больший показатель преломления; *во-вторых*, угол падения α должен превосходить некоторый предельный угол α_0 ($\alpha > \alpha_0$). Исходя из этих условий, можно дать следующее определение полному внутреннему отражению.

Полным внутренним отражением называется явление возникновения только отраженного электромагнитного излучения при его падении на границу раздела двух прозрачных сред из среды с большим показателем преломления под углом, превосходящим некоторый предельный угол.

Впервые полное внутреннее отражение излучения было описано немецким ученым И. Кеплером.

Полное отражение света используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон – *световодов* (оптическое волокно).

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. По оптической линии связи можно передавать информацию со скоростью порядка 1 Тб/с.

В настоящее время волоконно-оптические кабели проложены по дну Тихого и Атлантического океанов, и практически весь мир «опутан» сетью волоконных систем связи.

Световод (оптическое волокно) представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути (рис. 5.1.4). Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передается какой-нибудь элемент изображения.

Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового

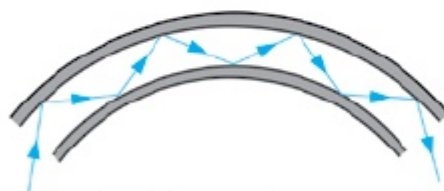


Рис. 5.1.4. Ход лучей в световоде



Рис. 5.1.5. Световоды

пучка. Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды. Из оптических волокон изготавливают кабели (рис. 5.1.5) для волоконно-оптической связи. Например, в г. Атырау имеется завод по выпуску волоконно-оптического кабеля, покрывающий до 30% потребности всего Казахстана в волоконно-оптической продукции. Волоконно-

оптические кабели не восприимчивы к помехам со стороны электромагнитных полей радиодиапазонов и сами не создают таких помех. Поэтому в плане электромагнитной совместимости это идеальные средства передачи информации. Столь же совершенны они и в электробезопасности, поскольку переносимые в них мощности очень малы.

Важное свойство оптического волокна – *долговечность*. Время жизни волокна, т.е. сохранение им своих свойств в определенных пределах превышает 25 лет, что позволяет проложить оптоволоконный кабель один раз и по мере необходимости наращивать пропускную способность канала путем замены приемников и передатчиков на более быстродействующие без замены самого кабеля.

Область применения – медицинские и технические эндоскопы, предназначенные для визуального наблюдения внутренних органов человека и животного, а также при осмотре деталей конструкций, находящихся в труднодоступных местах (например, двигатели самолетов и автомобилей). Волоконно-оптическая связь применяется для телефонной связи и высокоскоростного Интернета (например, по одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров и миллион видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга).



Дополнительный материал

«Умное» зеркало – это необычный медианоситель, который предназначен для отбора и демонстрации рекламы на целевую аудиторию. Как только приближается человек, зеркало «оживает» и показывает видео, которое потенциально может заинтересовать подошедшего. В чудо-зеркало вмонтирована специальная система, которая распознает и обрабатывает изображение. Она определяет возраст, пол, эмоциональный настрой зрителя и демонстрирует на экране подходящий для него видеоролик.

**Вопросы**

1. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света.
2. Сформулируйте закон отражения света.
3. Сформулируйте закон преломления света.
4. Каков физический смысл относительного и абсолютного показателей преломления?
5. Как определяют показатель преломления стекла?
6. Каково условие полного внутреннего отражения излучения? Как оно описывается?
7. В чем заключается принцип работы световода (оптического волокна)?
8. Где применяются оптоволоконные связи?

**Задание (экспериментальное исследование)**

- 1) Поставьте два обычных зеркала перпендикулярно друг другу и посмотрите на свое отражение от объединения. Опишите наблюдаемое.
- 2) Опустите пластину из оргстекла в сосуд с прозрачными стенками, а затем залейте в сосуд подсолнечное масло. Опишите наблюдаемое.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол отражения для этого луча равен $42^{\circ}23'$. Найдите скорость распространения света в скипидаре.

Дано: $\alpha_0 = 42^{\circ}23'$ $v_{\text{ск}} = ?$	Решение: При полном внутреннем отражении угол преломления $\beta = 90^{\circ}$. По закону преломления: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$, или $\frac{\sin \alpha_0}{\sin \beta} = \frac{v_{\text{ск}}}{c}$,
--	---

где: $\sin \beta = \sin 90^{\circ} = 1$; $v_{\text{ск}}$ – скорость света в скипидаре; c – в вакууме (в воздухе).

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_{\text{ск}}}{c}, \quad v_{\text{ск}} = c \sin \alpha_0.$$

$$v_{\text{ск}} = 3 \cdot 10^8 \sin 42^{\circ}23' = 2,02 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}.$$

Ответ: $v_{\text{ск}} = 2,02 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 5.1.1. Угол падения светового луча на границу раздела двух сред равен 60° . Преломленный луч составляет с нормалью угол 35° . Определите в градусах угол между отраженным и преломленным лучами. (*Ответ:* 85° .)
- 5.1.2. Определите угол преломления, соответствующий углу падения 45° , если известно, что показатель преломления данного вещества равен 1,63. (*Ответ:* 25° .)

5.1.3. Луч света переходит из стекла в воздух. Угол падения луча составляет 30° , угол преломления – 45° . Чему равен показатель преломления данного сорта стекла? (Ответ: 1,4.)

Уровень В

5.1.4. Луч света падает из воздуха на поверхность некоторой жидкости под углом 40° . Угол преломления равен 24° . Найдите угол преломления, если угол падения увеличить в 2 раза. (Ответ: 38° .)

5.1.5. Под каким углом световой луч падает на плоскую поверхность стекла, если отраженный и преломленный лучи образуют между собой прямой угол? Скорость света в стекле составляет $2 \cdot 10^8$ м/с. (Ответ: 56° .)

§ 5.2

Оптические приборы

1. Оптические приборы открыли человеку два мира – *космический* с его огромными протяженностями и *микроскопический*, населенный мельчайшими организмами.

Оптическими приборами называют устройства, в которых по законам геометрической оптики для получения увеличенных изображений, не видимых невооруженным глазом, микробъектов или деталей структуры макрообъектов, а также для увеличения видимых угловых размеров как близких предметов, так и далеких небесных светил преобразуются пучки световых лучей.

В оптических приборах применяются различные комбинации собирающих и рассеивающих линз, а также различных зеркал.

По своему назначению оптические приборы, вооружающие глаз, можно разбить на следующие две большие группы:

- приборы, служащие для рассматривания очень мелких предметов (лупа, микроскоп). Эти приборы зрительно увеличивают рассматриваемые предметы;
- приборы, предназначенные для рассматривания удаленных объектов (зрительная труба, бинокль, телескоп и т.п.). Эти приборы зрительно приближают рассматриваемые предметы.

Отношение угла зрения φ при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения ψ при наблюдении невооруженным глазом называется **угловым увеличением**:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi}. \quad (5.7)$$

Угловое увеличение является важной характеристикой оптических приборов для визуальных наблюдений. Самым простым оптическим прибором для визуальных наблюдений является *лупа* (рис. 5.2.1). Лупы, изобретенные в XVII в. нидерландским естествоиспытателем А. Левенгуком, давали увеличение в 300 раз.

Лупой называют собирающую линзу с малым фокусным расстоянием ($F \approx 10$ см).

Лупу располагают близко к глазу, а рассматриваемый предмет – в ее фокальной плоскости. Принцип действия лупы основан на использовании свойства собирающей линзы создавать мнимое, прямое, увеличенное изображение. Предмет виден через лупу под углом $\varphi = \frac{h}{F}$, где h – размер предмета (рис. 5.2.2).

При рассматривании этого же предмета невооруженным глазом его следует расположить на расстоянии $d_0 = 25$ см – наилучшего зрения нормального глаза. В этом случае предмет будет виден под углом $\psi = \frac{h}{d_0}$. Следовательно, **угловое увеличение лупы** равно:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{d_0}{F}. \quad (5.8)$$

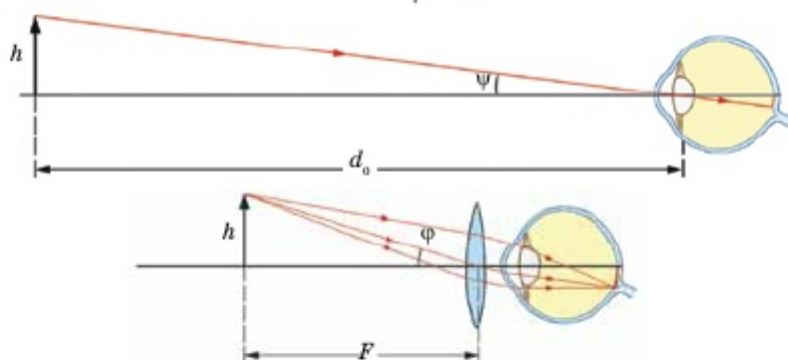


Рис. 5.2.2. Ход лучей и углы наблюдения предмета невооруженным глазом и с помощью лупы

Микроскоп – это оптический прибор, показывающий в увеличенном виде очень мелкие, не видимые глазу, близко расположенные предметы (рис. 5.2.3). Увеличенное изображение предмета в микроскопе получается с помощью оптической системы, состоящей из двух короткофокусных линз – объектива O_1 и окуляра O_2 (рис. 5.2.4). Объектив даст действительное перевернутое увеличенное изображение предмета. Это промежуточное изображение рассматривается глазом через окуляр, действие которого аналогично действию лупы. Окуляр располагают так, чтобы промежуточное изображение находилось в его



Рис. 5.2.1. Лупа



Рис. 5.2.3. Микроскоп

фокальной плоскости; в этом случае лучи от любой точки предмета распространяются после окуляра параллельным пучком.

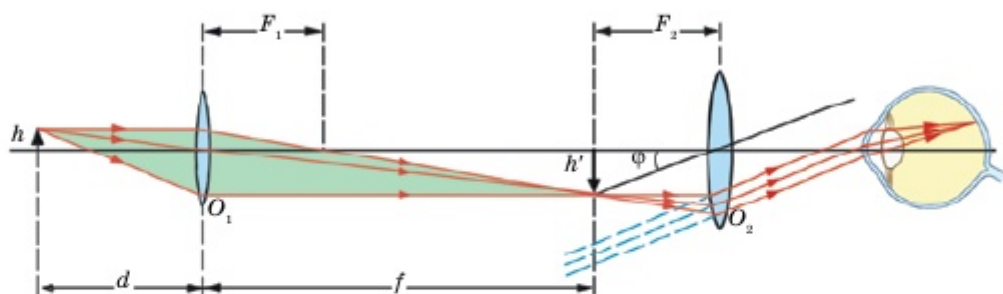


Рис. 5.2.4. Ход лучей в микроскопе

Мнимое изображение предмета, рассматриваемое через окуляр, всегда перевернуто. Если же это оказывается неудобным (например, при прочтении мелкого шрифта), можно перевернуть сам предмет перед объективом. Поэтому *угловое увеличение микроскопа принято считать положительной величиной*. Как следует из рис. 5.2.4, угол зрения φ предмета, рассматриваемого через окуляр,

при малых углах равен: $\sin \varphi = \frac{h'}{F_2}$, или приближенно $\varphi \approx \frac{h'}{F_2} = \frac{f \cdot h}{d \cdot F_2}$. При-

ближенно можно положить $d \approx F_1$ и $f \approx l$, где l – расстояние между объективом и окуляром микроскопа («длина тубуса»). При рассматривании того же предмета

невооруженным глазом $\psi = \frac{h}{d_0}$ (рис. 5.2.2). В результате формула для *углового*

увеличения микроскопа приобретает вид:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{l \cdot d_0}{F_1 \cdot F_2}. \quad (5.9)$$

Хороший микроскоп может давать четкое увеличение в тысячу раз. При больших увеличениях начинают проявляться дифракционные явления.

В 1609 г. Галилео Галилей на основании дошедших до него сведений об изобретенной в Голландии подзорной трубе строит свой первый телескоп, дающий приблизительно трехкратное увеличение. Вскоре ученый построил телескоп с увеличением в 32 раза, и с помощью него были обнаружены горы, кратеры на Луне и пятна на Солнце; открыты четыре спутника Юпитера; фазы Венеры.

Телескоп (зрительная труба) – это оптический прибор, предназначенный для наблюдения удаленных объектов. Он состоит из двух линз – обращенной к предмету собирающей линзы (объектива) с большим фокусным расстоянием и линзы (окуляра) с малым фокусным расстоянием, обращенной к наблюдателю. Современные телескопы используются для наблюдений за звездами и космосом. Такие телескопы, например, используются в Тянь-Шаньской астрономической обсерватории, в обсерватории Ассы-Тургень в Алматинской области (рис. 5.2.5).

Зрительные трубы бывают двух типов:

- зрительная труба Кеплера, предназначенная для астрономических наблюдений; она дает увеличенные перевернутые изображения удаленных предметов и поэтому неудобна для земных наблюдений;
- зрительная труба Галилея, предназначенная для земных наблюдений, дающая увеличенные прямые изображения; окуляром в трубе Галилея служит рассеивающая линза.



Рис. 5.2.5. Современные телескопы

На рис. 5.2.6 изображен **ход лучей в астрономическом телескопе**. Предполагается, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность, поэтому лучи от каждой точки удаленного предмета выходят из окуляра параллельным пучком. Такой ход лучей называется **телескопическим**.

В астрономической трубе телескопический ход лучей достигается при условии, что расстояние между объективом и окуляром равно сумме их фокусных расстояний $l = F_1 + F_2$. Зрительную трубу (телескоп) принято характеризовать **угловым увеличением** γ .

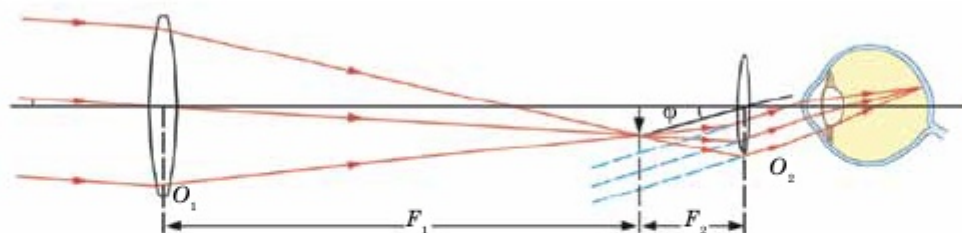


Рис. 5.2.6. Ход лучей в астрономическом телескопе

В отличие от микроскопа предметы, наблюдаемые в телескоп, всегда удалены от наблюдателя. **Если удаленный предмет виден невооруженным глазом под углом ψ , а при наблюдении через телескоп под углом ϕ , то угловым увеличением**

называют отношение $\gamma = \frac{\phi}{\psi}$. Угловому увеличению γ , как и линейному увели-

чению Γ , можно приписать знаки плюс и минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Угловое увеличение астрономической трубы Кеплера *отрицательно*, а земной трубы Галилея – *положительно*. **Угловое увеличение зрительных труб (оптических телескопов) выражается через фокусные расстояния:**

$$\gamma = \frac{F_1}{F_2}. \quad (5.10)$$



Дополнительный материал

У рыб-четырёхглазок на самом деле по два глаза, однако каждый из них разделен горизонтальной перепонкой. Благодаря этому четырёхглазки могут плавать у самой поверхности воды и видеть как над, так и под водой – единственные из всех позвоночных. Не мешают такому зрению и разные коэффициенты преломления света в воздухе и воде: специально для этого верхняя и нижняя половинки глазных линз изогнуты по-разному.



Вопросы

1. Какое устройство называется оптическим прибором?
2. Как определяется угловое увеличение прибора?
3. На какие группы можно разбить по своему назначению оптические приборы?
4. На чем основан принцип действия линзы?
5. Из каких оптических элементов состоит микроскоп? Объясните ход лучей в микроскопе.
6. Как определяется угловое увеличение микроскопа? В каких пределах оно может изменяться?
7. Из каких оптических элементов состоит телескоп (зрительная труба)? Как определяется его угловое увеличение? Объясните принцип работы телескопа, исходя из ходов лучей в нем.

Работа в группах

Составьте паспорт оптических приборов по следующему плану:

- 1) назначение;
- 2) принцип действия;
- 3) из истории;
- 4) применение.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. В зрительную трубу с фокусным расстоянием объектива $F_1 = 50$ см в первом положении наблюдатель рассматривает очень далекий предмет, а затем, переместив окуляр во второе положение, направляет трубу на предмет, находящийся от него на расстоянии $d_2 = 25$ м. Насколько перемещен окуляр трубы?

Дано: $F_1 = 50$ см $d_2 = 25$ м $x = ?$	СИ 0,5 м	Решение: Условия наблюдения в обоих случаях будут наилучшими, если из окуляра выходит пучок параллельных лучей. Для этого изображение, которое дает объектив, должно находиться в фокальной плоскости окуляра.
---	-------------	---

В первом случае изображение получается в фокальной плоскости объектива $f_1 = F_1$, где F_1 – фокусное расстояние объектива. Во втором случае изображение окажется на расстоянии f_2 , которое больше, чем F_1 , на величину x .

Для того чтобы в глаз наблюдателя и во втором случае попадал пучок параллельных лучей, окуляр также должен быть смещен на расстояние x . Очевидно, что $x = f_2 - F_1$. Используя формулу линзы для второго случая, находим:

$$f_2 = \frac{F_1 d_2}{d_2 - F_1},$$

а значит,

$$x = \frac{F_1 d_2}{d_2 - F_1} - F_1 = \frac{F_1^2}{d_2 - F_1}.$$

$$x = \frac{0,5^2}{25 - 0,5} = 0,01 \text{ (м)}.$$

Ответ: $x = 0,01$ (м).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 5.2.1. Найдите увеличение, даваемое лупой с фокусным расстоянием 2 см, для:
 а) нормального глаза с расстоянием наилучшего зрения 25 см; б) близорукого глаза с расстоянием наилучшего зрения 15 см. (Ответ: 12,5; 7,5.)
- 5.2.2. Оптическая сила объектива микроскопа равна 100 дптр, окуляра – 50 дптр. Расстояние между объективом и окуляром составляет 19 см. Чему равно угловое увеличение микроскопа? Учтем, что расстояние наилучшего зрения равно 25 см. (Ответ: ≈ 238 .)

Уровень В

- 5.2.3. Определите увеличение объектива микроскопа, если увеличение всего микроскопа – 120, а фокусное расстояние окуляра – 2,5 см. Учтем, что расстояние наилучшего зрения равно 25 см. (Ответ: 12.)

- 5.2.4. Определите увеличение микроскопа для глаза с расстоянием наилучшего видения, равным 275 мм, если $F_{об} = 5$ мм, $F_{ок} = 25$ мм, а предмет находится на расстоянии 5,2 мм от объектива. (Ответ: 286.)
- 5.2.5. Фокусное расстояние объектива микроскопа составляет 5 мм, окуляра – 25 мм. Предмет находится на расстоянии 5,1 мм от объектива. Вычислите оптическую длину тубуса микроскопа и даваемое микроскопом увеличение. (Ответ: 28 см; 510.)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 5

- **Закон прямолинейного распространения света:** в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.
- **Закон отражения света:** падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; угол отражения γ равен углу падения α .
- **Закон преломления света:** падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для двух данных сред: $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$.
- **Полным внутренним отражением** называется явление возникновения только отраженного электромагнитного излучения при его падении на границу раздела двух прозрачных сред из среды с большим показателем преломления под углом, превосходящим некоторый предельный угол α_0 .
- **Предельный угол** определяется из условия: $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$.

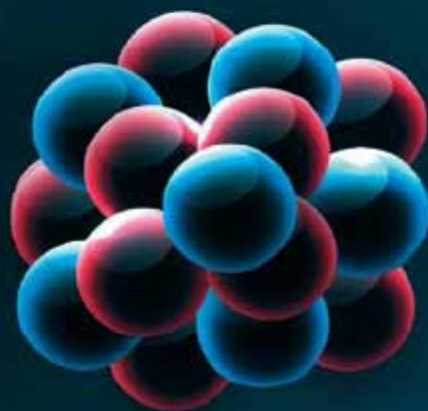
Если излучение из среды с показателем преломления n направляется на границу раздела с вакуумом (воздухом), то предельный угол отражения

определяется по формуле: $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$.

- **Световод (оптическое волокно)** представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.









- **Оптическим прибором** называется устройство, в котором пучки световых лучей преобразуются по законам геометрической оптики для получения увеличенных изображений, не видимых невооруженным глазом, микрообъектов или деталей структуры макрообъектов, а также для увеличения видимых угловых размеров как близких предметов, так и далеких небесных светил.
- **Угловым увеличением** прибора называется отношение угла зрения φ при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения ψ при наблюдении невооруженным глазом: $\gamma = \frac{\varphi}{\psi}$.
- **Лупой** называют собирающую линзу с малым фокусным расстоянием ($F \approx 10$ см).
- **Микроскоп** – это оптический прибор, показывающий в увеличенном виде очень мелкие, не видимые глазу, близко расположенные предметы.
- **Телескоп (зрительная труба)** – это оптический прибор, предназначенный для наблюдения удаленных объектов.

Глава 6



АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  приводить примеры, доказывающие корпускулярную и волновую природу электромагнитного излучения (дать понятия волновой природы элементарных частиц);
-  описывать метод спектрального анализа и область его применения;
-  различать электромагнитные излучения по природе их возникновения и взаимодействию с веществом;
-  объяснить природу фотоэффекта и привести примеры его использования;
-  описывать химическое действие света на основе фотосинтеза и процессов в фотографии;
-  сравнивать компьютерную и магнитно-резонансную томографию;
-  объяснять принцип действия лазера и его применение;
-  обсуждать перспективы развития голографии.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
сәулелену	излучение	emission, radiation
электрмагниттік толқындардың шкаласы	шкала электромагнитных волн	the scale of electromagnetic waves
инфрақызыл сәуле шығару	инфракрасное излучение	infrared radiation
ультракүлгін сәуле шығару	ультрафиолетовое излучение	ultraviolet radiation
сәуле шығарудың спектрлік тығыздығы	спектральная плотность излучения	spectral radiation density
спектрлік талдау	спектральный анализ	spectral analysis
тұтас спектр	сплошной спектр	continuous spectrum

сызықтық спектр	линейчатый спектр	line spectrum
жолақ спектр	полосатый спектр	band spectrum
жұтылу спектрі	спектр поглощения	absorption spectrum
корпускулалы-толқындық дуализм	корпускулярно-волновой дуализм	wave-corpuscule dualism
фотозэффект	фотозэффект	photoeffect
фотозэлемент	фотозэлемент	photocell
күн батареялары	солнечные батареи	solar batteries
жарықтың химиялық әсері	химическое действие света	chemical action of light
лазер	лазер	laser

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «излучение», «шкала электромагнитных волн», «инфракрасное излучение», «ультрафиолетовое излучение», «спектральная плотность излучения», «спектральный анализ», «сплошной спектр», «линейчатый спектр», «полосатый спектр», «спектр поглощения», «корпускулярно-волновой дуализм», «фотозэффект», «фотозэлемент», «солнечные батареи», «химическое действие света», «лазер».

§ 6.1

Единство корпускулярно-волновой природы света

1. Проблемой природы света стали активно заниматься с начала XVIII века. В это время конкурировали две альтернативные теории света – *корпускулярная* и *волновая*. Вопрос стоял так: свет – это волна или поток частиц? В XIX в. после работ Юнга, Френеля и Максвелла по интерференции, дифракции и поляризации света проблема казалась решенной окончательно в пользу волновой теории: *свет – это электромагнитная волна*. Однако в начале XX в. после работ Планка, Эйнштейна, Комптона и других ученых по излучению черного тела, фотозэффекту, эффекту Комптона было доказано, что *свет – это поток фотонов*, так называемых релятивистских частиц, несущих *энергию* и *импульс*.

Давление и преломление света объясняются как волновой, так и квантовой теориями.

Последующими исследованиями было окончательно установлено, что *свет обладает двойственной корпускулярно-волновой природой*, которая является фундаментальным свойством всех элементарных частиц, из которых состоит окружающая нас материя. Свету присущи как непрерывные (волновые), так и дискретные (квантовые) свойства.

Единство корпускулярно-волновой двойственной природы света называется корпускулярно-волновым дуализмом.

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. Используя законы излучения абсолютно черного тела и методы статистической физики, Эйнштейн вычислил значения флуктуаций давления и плотности энергии и получил формулы, содержащие сумму двух членов. Первый (квантовый) член соответствует представлению о свете как о потоке дискретных частиц – фотонов. Второй (волновой) член описывает флуктуации в распространяющейся электромагнитной волне. Таким образом, электромагнитное излучение обнаруживает удивительное единство, казалось бы, *взаимоисключающих свойств – непрерывных* (как волны) и *дискретных* (как фотоны), которые взаимно дополняют друг друга.

2. Основные уравнения, связывающие такие корпускулярные свойства электромагнитного излучения, как энергия ϵ и импульс фотонов p , с такими волновыми свойствами, как частота ν или длина волны λ , представлены следующими формулами:

$$\epsilon_{\gamma} = h\nu, \quad (6.1)$$

$$p_{\gamma} = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (6.2)$$

Свойства непрерывности, характерные для электромагнитного поля световой волны, не следует противопоставлять свойствам дискретности, характерным для фотонов. Свет, обладая одновременно 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.

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 (или чем больше частота) волны, тем больше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются волновые свойства света (например, волновые свойства (дифракция) рентгеновского излучения обнаружены лишь после применения в качестве дифракционной решетки кристаллов).



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

3. Французский физик **Луи де Бройль** доказал, что волновые свойства присущи не только фотонам, но и другим элементарным частицам. То есть частицы при движении проявляют волновые свойства. С каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики – энергия E и импульс p , а с другой – волновые характеристики – частота ν и длина волны λ . Количественные характеристики между указанными физическими величинами такие же, как для фотонов, определяются формулами:

$$E = h\nu, p = \frac{h}{\lambda}, \quad (6.3)$$

где p – импульс.

Длина волны де Бройля вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (6.4)$$

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

4. Можно привести доказанные на опыте примеры волновой природы элементарных частиц. В 1927 г. американские физики К. Дэвиссон (1881–1958) и Л. Джермер (1896–1971) обнаружили, что пучок электронов, рассеивающийся от естественной дифракционной решетки – кристалла никеля, дает отчетливую дифракционную картину. Советскому физiku В. А. Фабриканту (в 1948 году) удалось доказать, что дифракционная картина свойственна и отдельным электронам, не только пучкам. Он показал, что даже в случае столь слабого электронного пучка, когда каждый электрон проходит через прибор независимо от других (промежуток времени между двумя электронами в 10^4 раз больше времени прохождения электроном прибора), возникающая при длительной экспозиции дифракционная картина не отличается от дифракционных картин, получаемых при короткой экспозиции для потоков электронов, в десятки миллионов раз более интенсивных. Следовательно, волновые свойства частиц не являются свойством их коллектива, а присущи каждой частице в отдельности.

Впоследствии дифракционные явления обнаружили также для нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков. Это окончательно послужило доказательством наличия волновых свойств микрочастиц и позволило описать движение микрочастиц в виде волнового процесса, характеризующегося определенной длиной волны, рассчитываемой по формуле де Бройля. Открытие волновых свойств микрочастиц привело к появлению и развитию новых методов исследования структуры веществ, таких как *электронография* и *нейтронография*, а также к возникновению новой отрасли науки – *электронной оптики*.



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 означает выражение «корпускулярно-волновой дуализм»?
4. Какими формулами описываются волновая и квантовая природа света и других элементарных частиц?



Задание (теоретическое исследование)

Подготовьте доклад на тему «Проявления корпускулярно-волнового дуализма микрочастиц».

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Определите длины волн де Бройля электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов 400 В.

Дано:

$$U = 400 \text{ В}$$

$$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\lambda_e = ? \quad \lambda_p = ?$$

Решение:

Длину волны де Бройля находим по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где $p = mv$;

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} - \text{постоянная Планка.} \quad (2)$$

При прохождении частицами разности потенциалов U , приобретаемую скорость v можно найти из соотношения:

$$\frac{mv^2}{2} = qU.$$

Отсюда находим скорости для электрона и протона:

$$v_e = \sqrt{\frac{2q_e U}{m_e}}; \quad v_p = \sqrt{\frac{2q_p U}{m_p}}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем следующие формулы:

$$\lambda_e = \frac{h}{\sqrt{2q_e U m_e}}; \quad \lambda_p = \frac{h}{\sqrt{2q_p U m_p}},$$

где $q_e = q_p = |e|$ – абсолютная величина элементарного заряда.

Подставляя постоянную Планка, а также заряды электрона и протона, получаем $\lambda_e = 61,3$ (нм); $\lambda_p = 1,4$ (нм).

Ответ: $\lambda_e = 61,3$ (нм); $\lambda_p = 1,4$ (нм).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.1.1. Найдите длину волны де Бройля для электрона, движущегося со скоростью: 20 км/с; 0,8 км/с. (Ответ: 36,4 нм; 908 нм.)
- 6.1.2. Вычислите длину волны де Бройля для протона с кинетической энергией 100 эВ. (Ответ: 2,86 нм.)

6.1.3. Скорость так называемых тепловых нейтронов, средняя кинетическая энергия которых близка к средней энергии атомов газа при комнатной температуре, составляет 2,5 км/с. Найдите длину волны де Бройля для таких нейтронов. (Ответ: 159 пм.)

§ 6.2

Спектральный анализ

1. Спектральным анализом называют физические методы качественного и количественного определения химического состава вещества, основанные на получении и исследовании его спектров.

Спектром называется совокупность составных частей электромагнитных волн, разложенных по их длине или частоте.

Разложение сложных электромагнитных волн по их длине (или частоте) осуществляется специальной *спектральной аппаратурой*, где каждая составляющая волн фиксируется как цветная группа видимых линий или полос. Эти видимые линии или полосы также называются *спектрами*.

Спектральной аппаратурой называется установка, в которой электромагнитное излучение исследуемого вещества возбуждается, разлагается в спектр и регистрируется.

2. Используемые для исследования спектров аппараты должны отвечать требованиям четкого разделения спектра и не допускать перекрытия спектров. Для таких аппаратов чаще всего используются дифракционная решетка или призма. На *рис. 6.2.1* показана схема такого аппарата.

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

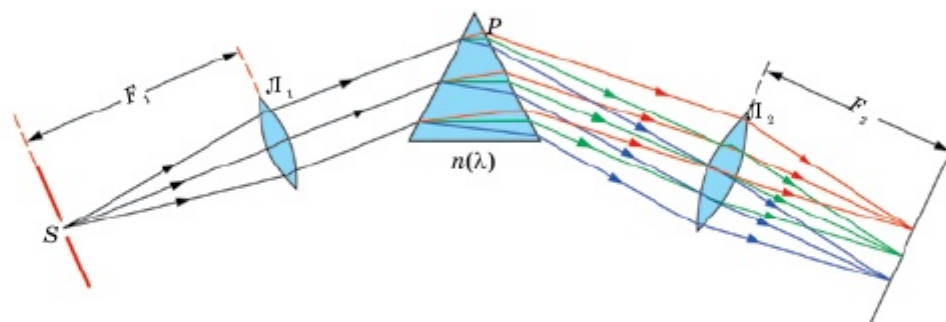


Рис. 6.2.1. Ход лучей в спектральном аппарате

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 . В фокальной плоскости линзы L_2 располагается экран или фотопластинка, на которую фокусируется излучение. В результате в разных местах экрана возникает цветное изображение 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 ; такая монотонно убывающая зависимость $n(\lambda)$ называется **нормальной дисперсией**. На основе явления дисперсии призма наиболее сильно отклоняет от первоначального направления синие и фиолетовые лучи и наименее – красные.

3. Спектральный состав излучения атомов различных веществ весьма разнообразен. Тем не менее все спектры можно разделить на три сильно отличающихся друг от друга типа.

Непрерывные (сплошные) спектры. В непрерывном спектре излучения (рис. 6.2.2) 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.

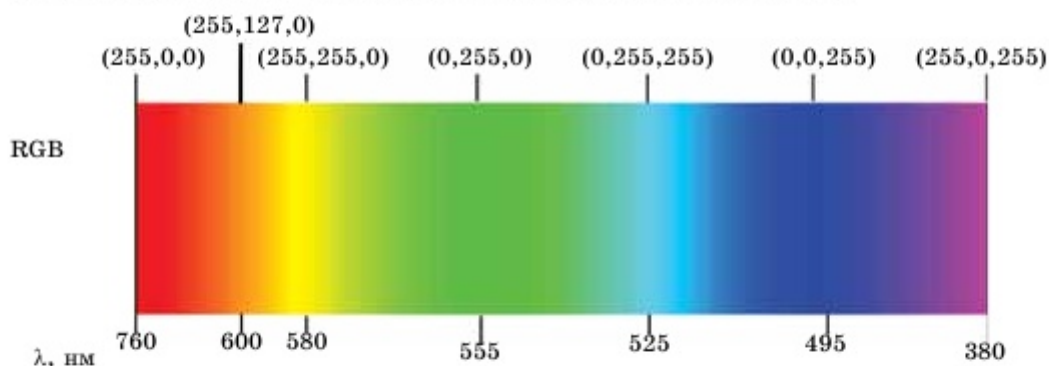


Рис. 6.2.2 Непрерывный (сплошной) спектр

Линейчатые спектры. Линейчатые спектры излучения (рис. 6.2.3) представляют собой набор цветных линий различной яркости, разделенных широкими полосами. Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не в молекулярном) состоянии. Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени (например, в электрической дуге) или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

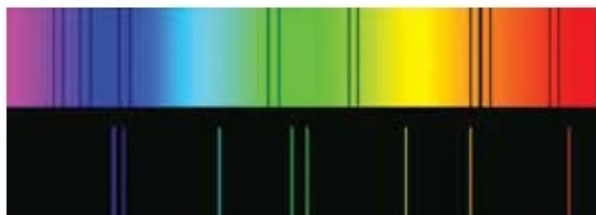


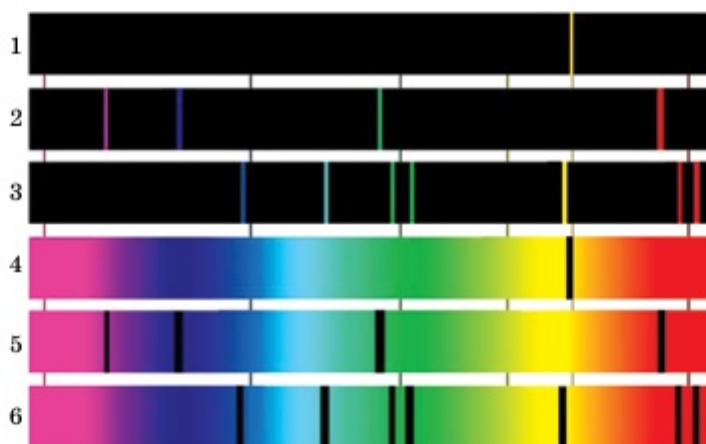
Рис. 6.2.3. Линейчатый спектр

Полосатые спектры. Полосатые спектры состоят из отдельных полос, разделенных темными промежутками (рис. 6.2.4). Полосатые спектры дают газы, молекулы которых слабо связаны друг с другом.



Рис. 6.2.4. Полосатый спектр

Спектры поглощения. Если пропускать белый свет через холодный неизлучающий газ, то в непрерывном спектре появятся темные линии, которые соответствуют поглощению (рис. 6.2.5). Газ поглощает активно свет в той области, в которой он начинает излучать в сильно нагретом состоянии. Следовательно, спектры поглощения также позволяют определить химический состав неизвестного газа.



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

Рис. 6.2.5. Спектры испускания и поглощения

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

4. С помощью спектрального анализа можно определить элементный состав 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.

Спектральный анализ широко применяют также в криминалистике для исследования улик, найденных на месте преступления. Кроме того, спектральный анализ в криминалистике хорошо помогает определять орудие убийства и вообще раскрывать некоторые частности 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. В чем заключается физический смысл спектрального анализа?
2. Что такое спектр?
3. Какая установка называется спектральной аппаратурой? На чем основано действие спектральных аппаратов? Для чего они предназначены?
4. Как различаются между собой непрерывные (сплошные), линейчатые, полосатые спектры? Спектры каких типов получаются от следующих источников: пламени свечи, пламени костра, спирали электроплитки, пламени электрической дуги, неоновой лампы, лампы дневного света?
5. В чем заключается основная функция спектрального анализа? На каком явлении она основана?
6. В каких областях применяется спектральный анализ?



Задание (практическое исследование)

Подготовьте информацию по применению спектрального анализа в металлургии, машиностроении, атомной индустрии, криминалистике, астрофизике и обсудите в группах.

§ 6.3

Шкала электромагнитных волн

1. Шкалой электромагнитных волн называется последовательность всевозможных значений длин волн (или частот) электромагнитных излучений, расположенных по мере их возрастания (или убывания) (рис. 6.3.1).

Электромагнитное излучение создается при ускоренном движении электронов, которые входят в состав атомов. При этом электроны переходят с более низкого энергетического уровня на более высокий. Когда электроны теряют энергию, эта энергия выводится из атома в виде излучения.

Излучения классифицируют по *источнику* излучения и *энергии* излучения. Действие излучений различно в зависимости от их длины волны. Чем меньше длина волны, тем больше частота и энергия; тем больше проникающая способность излучения. Видимый нами свет также является электромагнитным излучением, который в шкале электромагнитных волн лежит в интервале $4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 6.3.1).

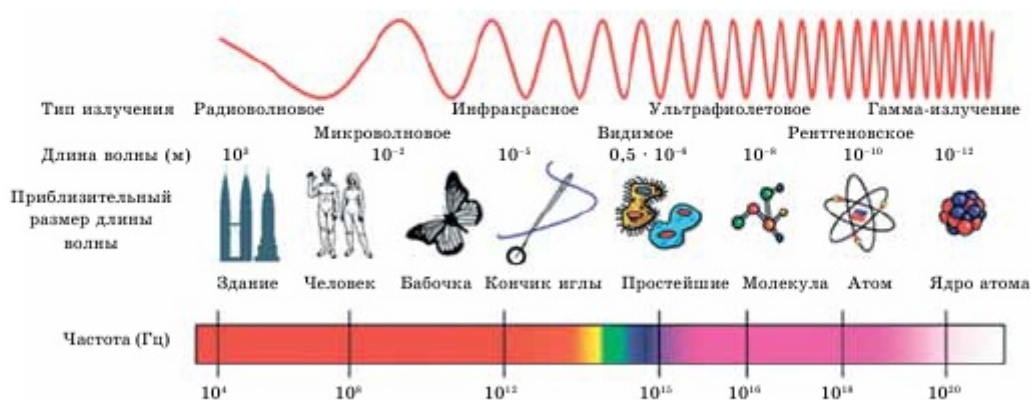


Рис. 6.3.1. Шкала электромагнитных волн

Эта шкала расположена слева направо по мере уменьшения длины волны и увеличения частоты электромагнитных волн. Скорость всех видов волн в вакууме является одинаковой и равна $3 \cdot 10^8$ м/с.

2. Электромагнитные излучения по длине (частоте) волны и по энергии ($E = h\nu$) классифицируются на несколько видов. Самая большая длина волны у радиоволн. У них самая маленькая проникающая способность.

Радиоволны делятся на группы, приведенные в таблице 6.3.1.

Таблица 6.3.1

Классификация радиоволн

Диапазон радиоволн	Длина волны	Частота	
Сверхдлинные	100 – 10 км	3 – 30 кГц	
Длинные	10 – 1 км	30 – 300 кГц	
Средние	1000 – 100 м	0,3 – 3 МГц	
Короткие	100 – 10 м	3 – 30 МГц	
Ультракороткие	{ метровые дециметровые сантиметровые миллиметровые субмиллиметровые	10 – 1 м 10 – 1 дм 10 – 1 см 10 – 1 мм 1 – 0,05 мм	30 – 300 МГц 0,3 – 3 ГГц 3 – 30 ГГц 30 – 300 ГГц 0,3 – 3 ТГц

Волны с длиной меньше чем 1 м (частота меньше чем 300 МГц) называются *микроволнами* или *волнами сверхвысоких частот (СВЧ-волнами)*.

Из-за больших значений длин волн радиодиапазона по сравнению с размерами атомов распространение радиоволн можно рассматривать без учета атомистического строения среды. Квантовые свойства радиоволн проявляются лишь для самых коротких волн, примыкающих к инфракрасному участку спектра.

3. Инфракрасное, световое, ультрафиолетовое излучения составляют оптическую область спектра электромагнитных волн. Близость участков спектра перечисленных волн обусловило сходство методов и приборов, применяющихся для их исследования и практического применения. Исторически для этих целей применяли линзы, дифракционные решетки, призмы, диафрагмы, оптически активные вещества, входящие в состав различных оптических приборов (интерферометров, поляризаторов, модуляторов и пр.).

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

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

Инфракрасное излучение невидимо для человеческого глаза, однако его испускают все жидкие и твердые вещества, даже когда они не нагреты, за счет непрерывного теплового движения их молекул и атомов. Поэтому еще инфракрасное излучение называют *тепловым*. Инфракрасное излучение является естественным природным видом излучения. Каждый человек ежедневно подвергается его действию. Каждое тело с температурой выше абсолютного нуля – это источник инфракрасного излучения. Солнце – известный природный источник ИК-лучей. Батареи отопления в квартире также испускают инфракрасное излучение.

Видимое излучение следует после инфракрасного излучения с длиной волны в интервале 400 – 780 нм. Видимым оно называется потому, что воспринимается нашим глазом. В видимом излучении следует различать излучения по цветам – красный (самая большая длина волны) и фиолетовый (самая короткая длина волны).

За видимым излучением следует *ультрафиолетовое*.

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

Ультрафиолетовое излучение отличается высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотозмульсия. 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 глаза и кожу. Поэтому нужно беречься от ультрафиолетового излучения. Однако в малых дозах ультрафиолетовое излучение полезно.

Свойствами ультрафиолетового излучения является 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 используют в процессе отбеливания тканей, синтезе конкретных веществ, получении витамина *D*, производстве лакированной кожи, а также в различных производственных манипуляциях. Важно учесть, что излучение имеет уникальные свойства, а именно возможность вызвать **люминесценцию**.

После ультрафиолетового излучения следует рентгеновское, а затем гамма-излучение.

Рентгеновское излучение имеет длину волны в интервале $5 \cdot 10^{-12} - 6 \cdot 10^{-9}$ м. Оно возникает при торможении ускоренных электронов либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Рентгеновское излучение обладает большой проникающей способностью, ионизует атомы веществ, вызывает создание электронных возбуждений, дефектов, люминесценцию.

Гамма-излучение является следствием 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. Вспомним, что $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.



Дополнительный материал

Земное магнитное поле и атмосфера срезают, как фильтр, опасные для жизни электромагнитные волны и другие заряженные частицы, испускаемые нашим светилом. Лучи короче 29 нм, жесткий ультрафиолет, задерживаются в верхних слоях атмосферы озоном, а длинноволновое излучение поглощается углекислым газом, парами воды; заряженные частицы удерживаются магнитным полем Земли.



Вопросы

1. Что представляет собой шкала электромагнитных волн? Как меняются свойства излучений на шкале электромагнитных волн?

2. По каким параметрам классифицируются электромагнитные излучения? Каков порядок излучений по этой классификации?
3. Какова особенность радиоволн? На какие группы они делятся?
4. Какие излучения входят в оптическую область спектра? Что их объединяет, каковы отличительные особенности?
5. Какие излучения обладают самой большой проникающей способностью?
6. Стекло непрозрачно для инфракрасного излучения. Почему же солнечные лучи, пройдя сквозь оконное стекло, греют?



Задание (практическое исследование)

Заполните таблицу.

Вид излучения	Источник	Приемник	Диапазон	Свойства	Применение
Радиоволны					
Инфракрасное излучение					
Видимый свет					
Ультрафиолетовое излучение					
Рентгеновское излучение					
Гамма-лучи					

Работа в группах

Класс делится на две группы. Каждой группе выдается плакат. В центре плаката пишется слово «Излучения». Участникам каждой группы необходимо записать виды излучений. Также вокруг каждого вида излучения учащиеся записывают его свойства. Группы обмениваются плакатами, при необходимости дополняют виды излучений и их свойства. После этого каждая группа выбирает по одному участнику, которому предстоит выступить с презентацией заполненного плаката.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.3.1. Определите энергию фотонов, соответствующих наиболее длинным (760 нм) и наиболее коротким (380 нм) волнам видимой части спектра. (Ответ: $2,62 \cdot 10^{-19}$ Дж; $5,23 \cdot 10^{-19}$ Дж.)

Уровень В

- 6.3.2. Выразите энергию фотона красного света $2,7 \cdot 10^{-19}$ Дж и энергию фотона фиолетового света $5,0 \cdot 10^{-19}$ Дж в электрон-вольтах. (Ответ: 1,6875 эВ; 3,125 эВ.)

- 6.3.3. К какому виду следует отнести лучи, энергия фотонов которых равна 2,07 эВ, 4140 эВ? (*Ответ:* видимое и рентгеновское.)
- 6.3.4. Определите энергию фотона, которому соответствует длина волны $\lambda = 380$ нм (фиолетовая граница видимого спектра). (*Ответ:* $\approx 3,27$ эВ.)

§ 6.4

Фотоэффект и его использование



Александр Григорьевич Столетов (1839–1896) – русский физик, заслуженный профессор Московского университета. Систематически исследовал внешний фотоэффект (1888–1890), открыл законы фотоэффекта.

1. Фотоэффект обнаружен (в 1887 году) 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.

Если зарядить цинковую (Zn) или любую металлическую пластину, присоединенную к электрометру, отрицательно и освещать ее электрической дугой, то электрометр быстро разрядится (*рис. 6.4.1*). Это объясняется тем, что электроны, несущие отрицательный заряд, покидают поверхность пластины 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.

Отсюда вытекает вывод, что электроны вырываются под действием светового излучения, имеющего более высокую частоту.

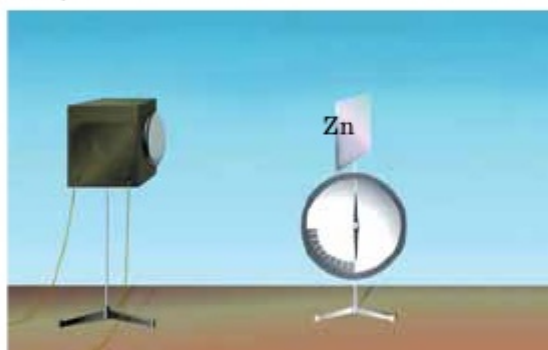


Рис. 6.4.1. Опыт, подтверждающий явление фотоэффекта

2. Изучая фотоэффект на установке с двумя электродами, А. Столетов освещал катод монохроматическим (ультрафиолетовым) светом. При этом ток измерялся

включенным в цепь миллиамперметром. На основе проведенных опытов он установил следующие закономерности, не утратившие своего значения до нашего времени:

1. *Наиболее эффективное действие для вырывания электронов из катода оказывает ультрафиолетовое излучение.*

2. *Под действием света вещество теряет только отрицательные заряды.*

3. *Сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.*

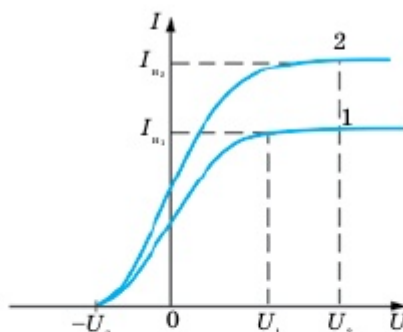


Рис. 6.4.2. Вольт-амперная характеристика

Зависимость силы тока от напряжения между электродами приведена на рис. 6.4.2. Оказалось, что при увеличении напряжения между электродами увеличивался и ток; при определенном напряжении (U_1 и U_2) фототок достигал своего максимального (насыщенного) значения I_n . Фототок насыщения определяется таким напряжением U , при котором все электроны достигают анода. Зависимость $I(U)$, изображенная на рис. 6.4.2, называется *вольт-амперной характеристикой*.

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_a . При $U = U_a$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью v_{\max} , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Следовательно,

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_a, \quad (6.1)$$

т.е., измерив задерживающее напряжение U_a , можно определить максимальные значения скорости и кинетической энергии фотоэлектронов.

На основе обобщения опытных данных были установлены следующие **три закона фотоэффекта**.

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

3. При вырывании электрона из вещества фотон света сообщает электрону работу выхода, равную $A_{\text{вых}} = h\nu_{\min}$.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода $A_{\text{вых}}$ из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$. По закону сохранения энергии получим следующую формулу:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*, где $h\nu$ – энергия падающего излучения; $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона. Ей соответствует минимальная величина частоты ν_{min} , которая называется *красной границей фотоэффекта* и определяется выражением:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (6.3)$$

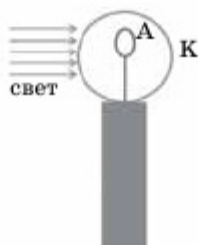


Рис. 6.4.3. Фотоэлемент

Фотоэлемент включается в цепь батареи, ЭДС которой выбирается такой, чтобы 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. Такие автоматы могут также предотвращать аварии. На заводе, например, 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 (рис. 6.4.4). Для их изготовления используются PbS, CdS, PbSe и некоторые другие полупроводники.

Принцип действия полупроводниковых фотоэлементов объясняется следующим образом. 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, то заряды совершают направленное движение и появится электрический ток (рис. 6.4.4).

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 возникнут двойной слой зарядов, называемый *p-n*-переходом, и электрическое поле, препятствующее их дальнейшему перераспределению. Если цепь замкнуть, появится электрический ток.

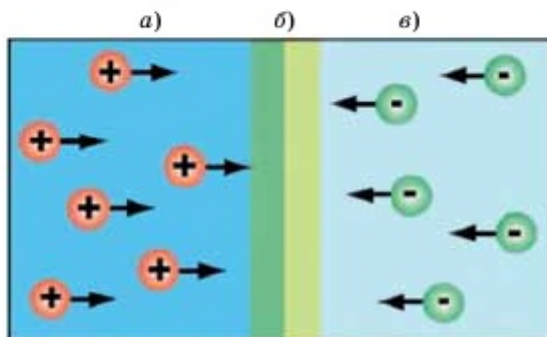


Рис. 6.4.4. Полупроводниковый фотоэлемент: а) материал *p*-типа; б) *p-n*-переход; в) материал *n*-типа

5. Кремниевые и другие вентильные 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, для светофоров, садов и дач (рис. 6.4.5).



Рис. 6.4.5. Применение солнечной энергии в сельской местности

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 начинают движение к «дыркам» на границе с бором. Таким образом, возникает электрический ток, являющийся упорядоченным движением электронов. К фотоэлементу подводятся металлические дорожки, через которые ток подается потребителю.

В настоящее время в Казахстане производством фотоэлектрических модулей на основе отечественного кремния занимается компания «Astana Solar».



Вопросы

1. Какое явление называют фотоэффектом?
2. Как формулируются закономерности фотоэффекта, установленные А. Столетовым?
3. Какой кривой описывается вольт-амперная характеристика фотоэффекта? Что такое фототок насыщения?
4. Как формулируются основные законы фотоэффекта?
5. Где применяется фотоэффект?
6. На каких физических явлениях основан принцип солнечных полупроводниковых батарей?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. 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?

Дано:

$$E_k = 10 \text{ эВ}$$

$$E_\phi = 3 A_{\text{вых}}$$

$$E_\phi = ?$$

Решение:

Напишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$E_\phi = A_{\text{вых}} + E_k.$$

$$\text{Учитывая, что } E_\phi = 3A_{\text{вых}}, A_{\text{вых}} = \frac{E_\phi}{3}.$$

$$E_\phi = \frac{E_\phi}{3} + E_k; \frac{2E_\phi}{3} = E_k; E_\phi = \frac{3E_k}{2} = 15 \text{ (эВ)}.$$

Ответ: $E_\phi = 15 \text{ (эВ)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Во всех задачах этого параграфа примем: постоянная Планка $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$; скорость света $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; масса электрона $9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Уровень А

- 6.4.1. Какую максимальную кинетическую энергию имеют электроны, вырванные из оксида бария, при облучении светом частотой 1 ПГц? Учтем, что работа выхода в оксиде бария равна 1 эВ. (Ответ: $\approx 3,14$ эВ.)
- 6.4.2. Работа выхода электрона из металла составляет 4,28 эВ. Найдите граничную длину волны фотоэффекта. (Ответ: 290 нм.)

Уровень В

- 6.4.3. Определите наибольшую скорость электрона, вылетевшего из цезия, при освещении его светом с длиной волны 400 нм. Учтем, что работа выхода электрона из металлического цезия равна 1,94 эВ. (Ответ: ≈ 640 км/с.)
- 6.4.4. Натрий освещается монохроматическим излучением с длиной волны $\lambda = 40$ нм. Определите красную границу фотоэффекта для натрия, если напряжение, при котором прекратится фототок, $U_a = 28,9$ В. (Ответ: ≈ 570 нм.)
- 6.4.5. Длина волны красной границы фотоэффекта для некоторого металла составляет 307 нм. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов – 1 эВ. Найдите отношение работы выхода электрона к энергии падающего фотона. (Ответ: 0,80.)

§ 6.5**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. Расщепление молекул под действием света нашло отражение в следующих 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 хвои, во многих микроорганизмах. В зеленом

листе под действием солнца 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 выдающийся русский биолог К. А. 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 обычной **фотографии (НЕ ЦИФРОВОЙ!)**. Чувствительный слой фотопластинки состоит из маленьких кристалликов бромида серебра (AgBr), вкрапленных в желатин. Если куском, вырезанным из черной бумаги или фольги, частично закрыть светочувствительную фотопластинку в темном помещении и направить на нее дневной свет или свет от мощного источника, то освещенная часть фотопластинки потемнеет, а в том месте, где расположен светонепроницаемый кусок, получится светлой. Процесс получения обычной фотографии состоит из нескольких этапов, показанных на *рис. 6.5.1*.

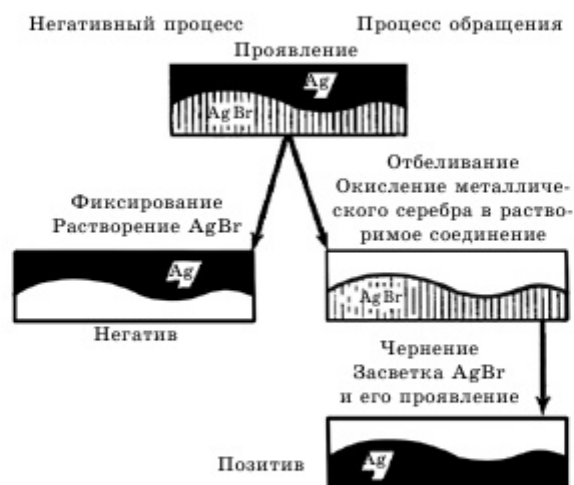


Рис. 6.5.1. Процесс получения фотографии

**Вопросы**

1. В чем состоит химическое действие света?
2. В каких законах отражено действие света? Как формулируются эти законы?
3. В каких природных процессах проявляется химическое действие света? Почему фотосинтез является основой жизни на Земле?
4. Почему фотосинтез не происходит ночью, хотя на листья падают инфракрасные лучи?
5. Какие процессы происходят при получении обычной фотографии?

**Задание (практическое исследование)**

Подготовьте презентацию об истории изобретения фотографии и эволюции фотографической техники.

§ 6.6**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 сильном ускорении заряженных частиц (электронов) либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов или молекул.

Оба процесса проявляют себя в рентгеновских трубках (рис. 6.6.1). Основными конструктивными элементами таких трубок являются металлические катод и анод, к которым подается высокое ускоряющее напряжение. В рентгеновских трубках электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом (при этом рентгеновские лучи не испускаются, так как ускорение на коротком промежутке слишком мало) и ударяются об анод, где происходит их резкое торможение с большим ускорением

($a = \frac{v - v_0}{\Delta t}$). При этом происходит генерация излучения рентгеновского диапазона, которое называется *тормозным рентгеновским излучением*. Кроме того, выбиваются некоторые электроны из внутренних электронных оболочек атомов анода. Пустые места в оболочках занимают другими электронами атома.



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

В таких переходах с одного энергетического уровня атома на другой также возникает излучение, характерное только для вещества данного анода. Этот вид излучения называется *характеристическим рентгеновским излучением*.

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны с длиной волны меньше, чем у ультрафиолетового излучения, в пределах $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-12} - 6 \cdot 10^{-9}$ м, поэтому относится к числу жестких проникающих излучений.

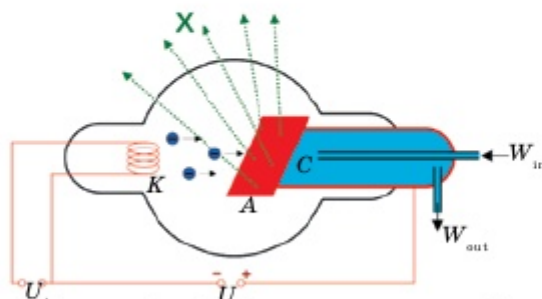


Рис. 6.6.1. Рентгеновская трубка: X – рентгеновские лучи; K – катод; A – анод; C – тепловод; U_0 – напряжение накала катода; U_a – ускоряющее напряжение; W_{in} – впуск водяного охлаждения; W_{out} – выпуск водяного охлаждения

Рентгеновское излучение в зависимости от его частоты по-разному поглощается веществом, поэтому различают относительно *мягкое* рентгеновское излучение – оно сильно поглощается, и *жесткое*, которое глубоко проникает и 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 *дифракцией* рентгеновского излучения, которая была получена впервые в 1912 году. Известно, что для наблюдения дифракционной картины необходимо, чтобы постоянная решетки была бы 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 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 представляется как симметрично расположенные концентрические кольца.

3. Появление рентгена 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. Все это способствовало разработке новых видов диагностики, среди которых особое место занимают *компьютерная и магнитно-резонансная томографии*.

Томографией называют послойное исследование и последующее формирование трехмерного изображения объекта.

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.

Главным свойством магнитно-резонансной томографии является отсутствие потребности в рентгеновских лучах для получения снимков. 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. Магнитно-резонансную томографию можно проходить сколь угодно часто без риска превысить допустимую дозу радиации.



Дополнительный материал

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



Вопросы

1. Каков приблизительно диапазон длин волн рентгеновского излучения? Каковы основные свойства рентгеновского излучения?
2. Какова природа рентгеновского излучения? Каков механизм возникновения тормозного и характеристического рентгеновских излучений?
3. Как получают на практике рентгеновское излучение? За счет чего разгоняются электроны между катодом и анодом в рентгеновских трубках?
4. Что называется томографией? Каковы преимущества и недостатки компьютерной и магнитно-резонансной томографии?



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.6.1. Оцените верхний и нижний пределы энергии рентгеновского излучения, считая, что диапазон рентгеновских лучей лежит в пределе $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-12} - 6 \cdot 10^{-9}$ м. (Ответ: ≈ 207 эВ – $2,5 \cdot 10^5$ эВ.)

Уровень В

- 6.6.2. Во сколько раз энергия рентгеновских лучей с длиной волны $6 \cdot 10^{-9}$ м больше энергии радиоволн с длиной волны 1 м? (Ответ: в $16,7 \cdot 10^7$ раз.)
- 6.6.3. Какова наиболее короткая длина волны рентгеновского излучения, испускаемая экраном телевизионной трубки под действием пучка электронов, обеспечивающего изображение? Напряжение на телевизионной трубке равно 10 кВ. (Ответ: 0,124 нм.)

§ 6.7**Лазеры**

1. Лазеры разработаны в результате фундаментальных исследований в области так называемой *нелинейной оптики*.

Нелинейная оптика – это важнейший раздел оптики, охватывающий исследования распространения мощных световых пучков в твердых телах, жидкостях и газах, а также их взаимодействие с веществом.

Термин «нелинейная оптика» впервые был введен около 100 лет тому назад известным русским ученым С. И. Вавиловым. Такое название связано с тем, что при взаимодействии вещества с мощным световым пучком законы линейной оптики носят приближенный характер лишь для не слишком сильных электромагнитных световых полей. При мощности светового пучка, превышающей некоторые критические значения, происходит изменение оптических характеристик вещественной среды (показатель преломления, коэффициент поглощения и др.), а также проявляются новые неожиданные оптические эффекты и явления (например, самофокусировка света, самовоздействие и самосжатие).

Современный этап развития нелинейной оптики начался в 1961 году с создания лазеров. С появлением лазеров оптика получила источники когерентного излучения большой мощности. С помощью импульсных лазеров можно получить интенсивность света $10^7 - 10^9$ ватт на квадратный сантиметр ($I \sim 10^7 - 10^9$ Вт/см²). Некоторые лазерные системы позволяют получить мощность когерентных излучений порядка $I \sim 10^{16}$ Вт/см².

Чтобы понять принцип работы лазера, рассмотрим некоторые специфические физические термины.

Низший энергетический уровень – это основное стационарное состояние атома, в котором атом не излучает, а все остальные состояния называются возбужденными.

В возбужденном состоянии атом находится очень недолго ($\sim 10^{-8}$ с). После этого он переходит в основное состояние, при этом электрон атома переходит от высшего энергетического уровня к низшему. Этот переход сопровождается испусканием фотона. Если же электрон переходит от низшего энергетического уровня к высшему, то он, наоборот, *поглощает свет*. Так называемые спонтанные излучения, самостоятельно испускаемые отдельными атомами, обладают ничтожно

малой энергией. Поэтому для концентрации энергии излучения многих атомов требуется *вынужденное излучение*.

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

2. Индуцированным (или вынужденным) излучением называется испускание электромагнитного излучения атомами квантовой системы под действием внешнего (вынуждающего) излучения.

Возникающая при этом излучении испущенная световая волна обладает той же частотой, фазой и поляризацией, что и падающая на атом волна. Это говорит о том, что *падающая и излученная волны когерентны*. Все это является необходимыми условиями для получения лазерного излучения.

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. **Именно эта идея и положена в основу создания лазера.**

Представим, что имеется активная среда (т.е. квантовая система) с большим количеством атомов. Эта среда располагается между глухим и полупрозрачным зеркалами. Глухое зеркало практически не пропускает свет (т.е. полностью отражает), а полупрозрачное зеркало пропускает около 2% света. Именно такие зеркала нашли применение в устройствах лазеров (рис. 6.7.1).

В активную среду поступает энергия извне. Это может быть любая энергия: тепловая, световая, химическая или электрическая (рис. 6.7.1, а). Данная энергия

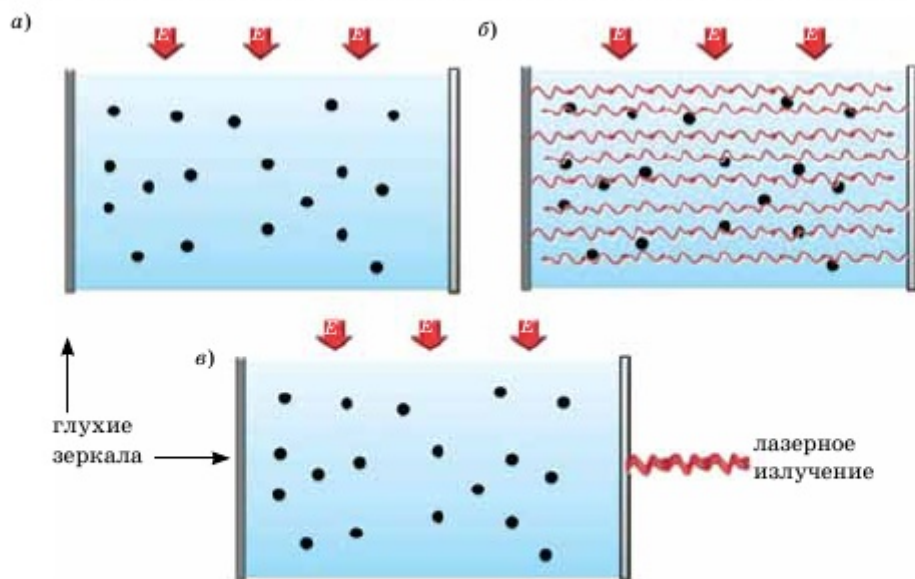


Рис. 6.7.1. Принцип работы лазера

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 фотонами, которые отражаются то от одного, то от другого зеркала. При этом каждый фотон, сталкиваясь с атомом, стимулирует испускание еще одного фотона (рис. 6.7.1, б).

Когда же атомы переходят в основное состояние активной среды, выходит множество когерентных фотонов, образуя лазерный луч (рис. 6.7.1, в). В этом луче фотоны находятся на очень близком расстоянии друг к другу, и направления их движения совпадают, поэтому лазерный луч практически не рассеивается.

Лазеры обладают следующими свойствами:

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

Правда, такая 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. 6.7.2), поскольку каким бы мощным ни был внешний источник энергии, число возбужденных атомов не превышало число невозбужденных. Однако 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. На сегодняшний день трехуровневая система с успехом используется в **рубиновых лазерах** (потому

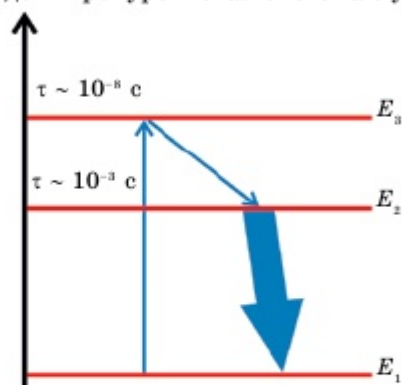


Рис. 6.7.2. Трехуровневая система

что в рубине имеются необходимые энергетические уровни). В рубине содержится *небольшая примесь атомов хрома*, которые и *подвергаются процессу индуцированного излучения*.

На рис. 6.7.2 изображены три состояния атома: основное состояние с энергией E_1 и два возбужденных состояния с энергиями E_2 и E_3 . Особенность этих энергетических уровней заключается в том, что 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 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.

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 *микрохирургия глаза*. Лазеры как источники когерентных излучений стали широко применяться и в *голографии*.

Голографией называют способ записи и восстановления интерференционной картины, от двух когерентных волн: с одной стороны, предметной волной, отраженной от освещаемого предмета; с другой стороны, когерентной с ней опорной волной, идущей непосредственно от источника света. Зарегистрированная интерференционная картина называется *голограммой*.

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 этот метод применим 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 электронным излучениям 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 создания 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. К какой области оптики относится нелинейная оптика? В чем заключается ее особенность?
2. Какое условие необходимо для возникновения вынужденного излучения? Какое излучение называется индуцированным?

3. На каком принципе основано излучение лазера? Как работает лазер с двумя энергетическими уровнями?
4. Как работает лазер с тремя энергетическими уровнями?
5. Где применяются лазеры? Какой способ получения интерференционной картины называется голографией? Какова их перспектива?



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 шарика при этом?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Терапевтический гелий-неоновый лазер, работающий в непрерывном режиме, дает излучение монохроматического света с длиной волны $\lambda = 630$ нм, развивая мощность $P = 40$ мВт. Сколько фотонов излучает лазер за 1 с?

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$\lambda = 630$ нм	$630 \cdot 10^{-9}$ м	Мощность лазера может быть записана как $P = \frac{E}{t}$, где E – энергия излучения; t – время. Энергия излучения складывается из энергий отдельных фотонов $E_0 = h\nu$, число которых можно обозначить через N .
$P = 40$ мВт	$40 \cdot 10^{-3}$ Вт	
$t = 1$ с		
$N = ?$		

Здесь ν – частота фотона. Учитывая, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, можно записать:

$$P = \frac{hcN}{\lambda t}, \text{ отсюда } N = \frac{P\lambda t}{hc} = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ (фотонов).}$$

Ответ: $N = 1,3 \cdot 10^{17}$ (фотонов).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.7.1. Газовый лазер, работая в режиме непрерывного излучения, дает свет с длиной волны 500 нм. Найдите число фотонов, излучаемых им за время, равное 2 с, если мощность излучения составляет 50 мВт. (*Ответ:* $2,5 \cdot 10^{17}$ фотонов.)

Уровень В

- 6.7.2. Лазер излучает в импульсе 10^{19} световых квантов. Средняя мощность импульса лазера равна 1100 Вт при длительности вспышки $3 \cdot 10^{-3}$ с. Определите длину волны излучения лазера. Ответ выразите в микрометрах. (*Ответ:* 0,6 мкм.)
- 6.7.3. При удалении полипа хирургическим путем используется луч гелий-неонового лазера мощностью $P = 10$ мВт, сфокусированного на пятне диаметром $d = 0,4$ мм. Лазер дал вспышку продолжительностью $t = 1$ с. Определите энергию вспышки и плотность мощности (Вт/м²) на пятне. (*Ответ:* 0,01 Дж; 79 617 Вт/м².)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 6

- **Корпускулярно-волновым дуализмом** названо единство как корпускулярной, так и волновой, двойственной природы света и других элементарных частиц. **Волновые** свойства света проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции и поляризации; а **корпускулярные** – в процессах взаимодействия света с веществом. Корпускулярно-волновой дуализм светового фотона и других элементарных частиц описывается следующими формулами:

$$E = h\nu,$$

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

где величины E и p характеризуют корпускулярные свойства частиц; λ и ν – волновые свойства частиц.

- **Спектральная плотность излучения** – интенсивность, приходящаяся на единичный интервал частот.
- **Спектр** – совокупность частей электромагнитных волн, разложенных по длине (или частоте) волны.
- **Спектральным анализом** называют физические методы качественного и количественного определения химического состава вещества, основанные на получении и исследовании его спектров.
- **Излучение** – это процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц.
- **Инфракрасным** называют электромагнитное излучение в диапазоне от $3 \cdot 10^{11}$ до $3,75 \cdot 10^{14}$ Гц (800 нм – 1 мм).
- **Ультрафиолетовым** называют электромагнитное излучение в диапазоне от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц (10 нм – 375 нм).
- **Фотоэффектом** называется явление вырывания электронов из вещества под действием электромагнитного излучения, в частности света.
- **Рентгеновские лучи** возникают при сильном ускорении заряженных частиц (тормозное излучение) либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов или молекул.
- **Нелинейная оптика** – важнейший раздел оптики, охватывающий исследования распространения мощных световых пучков в твердых телах, жидкостях и газах, а также их взаимодействия с веществом.
- **Индукцированным излучением** называется испускание электромагнитного излучения атомами рассматриваемой квантовой системы под действием внешнего (вынуждающего) излучения.
- **Голографией** называют способ записи и восстановления интерференционной картины, от двух когерентных волн: с одной стороны, *предметной волной*, отраженной от освещаемого предмета; с другой стороны, когерентной с ней *опорной волной*, идущей непосредственно от источника света.








Глава 7



ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

ГЛАВА 7. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять явления радиоактивного распада (α , β и γ) и термин периода полураспада;
-  уметь рассчитывать период полураспада графическим методом;
-  объяснять процессы деления и синтеза ядра;
-  объяснять природу ионизирующего эффекта радиоактивных излучений и их проникающую способность;
-  описывать обработку, применение и безопасное хранение радиоактивных материалов;
-  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
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
сутегі	водород	hydrogen
нуклон	нуклон	nucleon
меншікті байланыс энергиясы	удельная энергия связи	specific bond energy

ядролық реакция	ядерная реакция	nuclear reaction
тізбекті реакция	цепная реакция	chain reaction
сауле шығарудың жұтылған дозасы	поглощенная доза излучения	absorbed radiation dose

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

§ 7.1

Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада



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».

1. В 1896 г. французский физик А. Беккерель при изучении люминесценции солей урана случайно обнаружил *самопроизвольное* испускание ими излучения неизвестной природы. Исследуя работу Рентгена, открывшего в 1895 году X-лучи, Беккерель интересовался установлением связи между фосфоресценцией, флуоресценцией и рентгеновскими излучениями, а также влиянием на них солнечного света. Однажды исследователя застала туманная погода, поэтому он завернул фотографические пластинки в толстую черную бумагу и убрал их вместе с дисульфатом урана и калия в ящик, решив дождаться солнечного дня. Несколько дней спустя он проявил одну из пластинок и обнаружил, что не только она, но и остальные пластинки оказались засвеченными. Это означало, что соли урана самопроизвольно испускают неизвестные излучения.

Данное открытие побудило и Беккереля, и других ученых к исследованию этого таинственного излучения. Вскоре он обнаружил, что данное излучение действует не только на фотопластинку, но и ионизирует воздух, вызывает люминесценцию ряда веществ.

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 некоторая ураносодержащая руда испускает излучение, интенсивность которого во много раз превышает интенсивность излучения урана. Таким образом, удалось выделить из этой руды два новых элемента – носителя беккерелевского излучения: **полоний** ${}_{84}^{210}\text{Po}$ и **радий** ${}_{88}^{226}\text{Ra}$. 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. Впоследствии было установлено, что все элементы, порядковые номера которых больше 88, являются радиоактивными.

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.

3. После открытия радиоактивного излучения началось интенсивное изучение его природы. Рассмотрим один из проведенных классических опытов. На дно узкого канала в куске свинца помещался радий. Напротив канала располагалась фотопластинка. На пучок действовало магнитное поле (рис. 7.1.1). 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. Причем отрицательный компонент отклонялся магнитным полем сильнее, чем положительный. Положительный компонент получил название **α -излучения**, отрицательный – **β -излучения** и нейтральный компонент – **γ -излучения**.

Подробное их исследование позволило выяснить природу и основные свойства этих излучений.

Альфа-излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм). **Альфа-излучение представляет собой поток ядер гелия**; заряд 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.

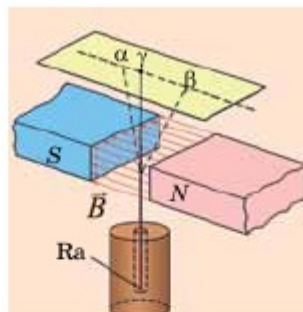


Рис. 7.1.1. Схема установки для изучения природы радиоактивных излучений

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).

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. 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, даже химические реакции, в которые вступали вещества. Кроме того, выяснилось, что при радиоактивном излучении выделяется энергия. Например, 1 г радия за один час выделяет энергию, примерно равную 582 Дж. Сначала ученые предполагали, 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 этого газа уменьшается со временем. Данный газ радиоактивный, как радий, был назван **радоном**.

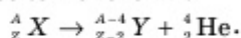
Таким образом, ученые пришли к выводу, что при радиоактивном излучении происходит видоизменение атомов, химический элемент превращается в другой элемент, не сходный ни по химическим, ни по физическим свойствам. Позже выяснилось, что превращения путем распада испытывает само атомное ядро; действительно, положительные α -частицы не могли существовать в электронных оболочках атома; с другой стороны, уменьшение числа орбитальных электронов привело бы к ионизации атома, тогда как атомы оставались нейтральными частицами. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется **материнским**, возникающее ядро – **дочерним**.

Таким образом, **радиоактивностью называют самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц**.

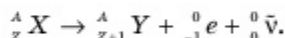
Введем необходимые обозначения, применяемые в описании превращения ядер. Материнское ядро обозначим через X, дочернее – Y. Для того чтобы различить элементы, введем понятия **зарядового числа Z** и **массового числа A**. **Зарядовое число** – это порядковый номер элемента в таблице Менделеева, который равен числу протонов в ядре атома данного элемента. Меняется зарядовое число, меняется и ядро, т.е. происходит превращение одного элемента в другой. **Массовое число**, представляющее собой сумму чисел протонов и нейтронов ($A = Z + N$) в ядре атома данного элемента, также указано в таблице Менделеева. Изменение только массового числа не ведет к изменению элемента. Любое материнское ядро с учетом его зарядового и массового чисел обозначается символом ${}^A_Z X$.

Преобразования радиоактивных ядер подчиняются *законам смещения Содди*. По этим законам определяется, в какое ядро будет видоизменено материнское ядро.

При α -распаде ядро теряет положительный заряд $2e$, его масса уменьшается на четыре атомные единицы массы. В результате появившийся элемент смещается на две клетки к началу периодической системы:



При β -распаде ядро увеличивает свой заряд на единицу, но его масса остается неизменной. В результате новый элемент смещается на одну клетку к концу периодической системы:



При β -распаде вместе с электроном испускается еще одна частица *антинейтрино* $\bar{\nu}$, не имеющая ни массы, ни заряда. При β -распаде наблюдается непрерывный энергетический спектр.

Гамма-излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады. Оно испускается дочерним ядром.

5. Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону. Как было сказано выше, 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. На рис. 7.1.2 показана зависимость числа распадающих ядер от времени. Время, в течение которого активность радиоактивного элемента уменьшается в два раза, называется периодом полураспада.

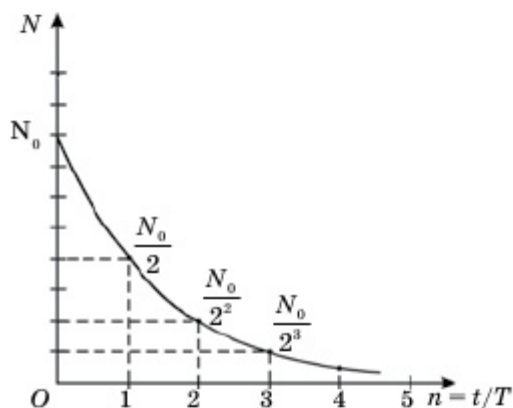


Рис. 7.1.2. Кривая зависимости радиоактивности от времени

Периодом полураспада называется время, в течение которого распадается половина первоначального числа ядер атомов.

Выведем математическую формулу периода полураспада. Пусть первоначальное число радиоактивных атомов равно N_0 . Спустя промежуток времени, равный периоду полураспада $t = T$, это число станет равным $\frac{N_0}{2}$. Через время $t = 2T$ количество нераспавшихся радиоактивных атомов будет равно $\frac{N_0}{2} : 2 = \frac{N_0}{2^2}$. Через время $t = nT$ радиоактивных атомов останется $N = N_0 \cdot \frac{1}{2^n}$. Так как $n = \frac{t}{T}$, то последнее равенство принимает следующий вид:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (7.1)$$

Это и есть основной **закон радиоактивного распада**. По формуле (7.1) можно найти число нераспавшихся атомов в любой момент времени.

Применив выражение $2 = e^{\ln 2}$ и заменив отношение $\frac{\ln 2}{T}$ на λ ($\lambda = \frac{\ln 2}{T}$), формулу (7.1) также можно записать в следующем виде:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (7.2)$$

где $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ называется **постоянной радиоактивного распада**. Период полураспада является основной характеристикой элемента. Чем меньше период полураспада, тем меньше живет ядро и тем быстрее распадается элемент. В *таблице 7.1.1* указаны периоды полураспада некоторых элементов.

Таблица 7.1.1

Периоды полураспада некоторых элементов

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

6. Собственная скорость распада каждого вида радиоактивных элементов не меняется. У каждого элемента 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. Таким образом, заражение местности сохраняется на длительное время в зависимости от времени жизни отдельных радиоактивных ядер.

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 испытаний значительная часть полигона была очень сильно заражена радиоактивными продуктами взрывов. 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.



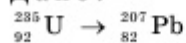
Вопросы

1. Какое явление называется радиоактивностью?
2. Какие виды радиоактивности существуют?
3. Какие формулы описывают виды радиоактивного распада? В чем заключается их особенность?
4. Что такое период полураспада? Какой формулой и кривой описывается закон радиоактивного распада?
5. Почему происходит радиоактивное заражение местности и как долго оно сохраняется?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

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

Дано:



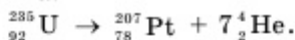
$$N(\alpha) = ?$$

$$N(\beta) = ?$$

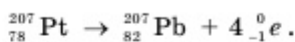
Решение:

Массовое число элемента при бета-распаде не меняется, а меняется только при альфа-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 $7 \cdot 2 = 14$. После 7 α -распадов образуется платина:



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



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

Ответ: 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.

Дано:

$$T_{1/2} = 3,05 \text{ мин} \quad \text{СИ} \quad 183 \text{ с}$$



$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{1}{3}$$

$$t = ?$$

Решение:

Согласно условию задачи, $\frac{1}{3}$ доля распавшихся ядер за время t равна:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - \frac{N}{N_0}, \quad (1)$$

где N_0 – начальное число нераспавшихся ядер

(в момент времени $t = 0$); N – число нераспавшихся ядер в момент времени t . Согласно закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \text{ или } \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

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

$$\frac{\Delta N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T} \ln 2}$$

(учли, что $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$). По условию задачи $\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{1}{3}$, тогда:

$$\frac{1}{3} = 1 - e^{-\frac{t}{T} \ln 2}; \quad e^{-\frac{t}{T} \ln 2} = \frac{2}{3},$$

$$\frac{-t}{T} \ln 2 = \ln \frac{2}{3}; \quad \frac{t}{T} \ln 2 = \ln \frac{3}{2}.$$

Искомое время:

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

Ответ: $t = 107$ (с).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 7.1.1. Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смещения, определите, в какой элемент превращается ${}_{92}^{235}\text{U}$ после шести α - и трех β -распадов. (Ответ: ${}_{88}^{211}\text{Bi}$.)
- 7.1.2. Ядра радиоактивного изотопа тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ претерпевают последовательно α -распад, два β -распада и α -распад. Определите конечный продукт деления. (Ответ: ${}_{88}^{224}\text{Ra}$.)
- 7.1.3. 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 . (Ответ: $Z = 82$; $A = 209$.)

Уровень В

- 7.1.4. Определите период полураспада T некоторого радиоактивного изотопа, если его активность за $t = 5$ суток уменьшилась в $n = 2,2$ раза. (Ответ: 4,4 суток.)
- 7.1.5. Определите период полураспада радиоактивного изотопа, если $n = 5/8$ начального количества ядер этого изотопа распалось за время $t = 849$ с. (Ответ: 10 мин.)

Лабораторная работа № 4.

Определение периода полураспада

Цель работы: моделировать процесс радиоактивного распада и определить период полураспада графическим методом.

Необходимое оборудование: 1) 128 канцелярских кнопок; 2) банка; 3) разнос.

Краткая теория. Периодом полураспада называется время, в течение которого распадается половина всех атомов радиоактивного элемента. Радиоактивный распад подчиняется закону:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}},$$

или

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

где N_0 – первоначальное число атомов; N – число нераспавшихся атомов к моменту времени t .

Активностью называют число распавшихся атомов в единицу времени A . Если в полиграфическом масштабе построить график зависимости $\ln A$ от времени t , то с помощью кривой можно графически найти период полураспада.

Процесс радиоактивного распада можно промоделировать подбрасыванием кнопок, при котором с той же вероятностью, как в законе радиоактивного распада, выпадают «острие» или «шляпка». Предположим, что если выпадет «острие» – ядро уцелело, если «шляпка» – распалось. Каждое бросание кнопок соответствует для ядра протеканию промежутка времени, равного периоду полураспада.

Порядок работы:

1. Отсчитайте начальное количество кнопок $N_0 = 128$, перемешайте их в банке и высыпьте на разнос.
2. Подсчитайте число «нераспавшихся» кнопок (то есть число кнопок, лежащих «острием» вверх), соберите их обратно в банку, снова перемешайте и высыпьте на разнос.
3. Каждое бросание соответствует определенному промежутку времени (можно считать секундой, минутой).
4. Заносите каждый раз в таблицу число «распавшихся» кнопок.

№ опыта или единица времени (с)	Число «распавшихся» кнопок – A
1	
2	
3	

5. Опыт повторите 10 раз.

6. Постройте график зависимости $\ln A$ от времени t .
7. На графике отметьте две точки, различающиеся по активности вдвое, т.е. на $\ln 2 = 0,3$.
8. Проведите через эти точки прямые, параллельные оси абсцисс до пересечения с прямой, и опустите через эти точки на абсциссу два перпендикуляра.
9. Полученный отрезок ($t_2 - t_1$) между двумя точками и будет соответствовать периоду полураспада ($T = t_2 - t_1$).
10. Запишите вывод: что вы измеряли, какой получен результат.

Для осмысления проделанной работы обсудите в группах приведенные ниже вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 4

1. Что называется радиоактивностью?
2. Выведите закон радиоактивного распада.
3. Что такое период полураспада?
4. Какое воздействие оказывает ионизирующее излучение на организм?
5. Приведите примеры периодов полураспада некоторых радиоактивных элементов.
6. Как выглядит график зависимости спада активности радиоактивного элемента от времени?

§ 7.2

Ядерные реакции. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции. Термоядерные реакции

1. В настоящее время общепризнана *планетарная модель* атома. Данную модель строения атома, которая была рассмотрена в физике для 9 класса, предложил английский физик Эрнест Резерфорд. Согласно этой модели в центре атома расположено положительно заряженное ядро, которое состоит из *протонов* и *нейтронов*, а вокруг ядра вращаются отрицательно заряженные электроны. Проведенные расчеты показали, что размер атома 10^{-10} м, или Ангстрем, а размеры атомного ядра $\approx 10^{-15}$ м. Дальнейшие работы в этом направлении показали, что заряд ядра совпадает с номером химического элемента в таблице Менделеева.

Атомные ядра, отличающиеся числом нейтронов N и протонов Z , обобщенно называют нуклидами.

Протоны и нейтроны, из которых состоят все атомные ядра, обобщенно называют нуклонами.

Общее число нуклонов в атомном ядре называется **массовым числом** $A = Z + N$.

Атомное ядро характеризуется зарядом $q_x = Z \cdot e$, где Z – **зарядовое число ядра**, т.е. количество протонов в ядре, совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева.

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 зарядовыми числами Z , но разными массовыми числами A (т.е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$) называются изотопами. Например, имеются три изотопа урана: ${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$.

2. Атомные ядра могут меняться при взаимодействии с элементарными частицами, при этом изменяются такие параметры, как массовое число, зарядовое число, т.е. ядро преобразуется.

Ядерными реакциями называют превращения атомных ядер при взаимодействии между собой или с другими частицами.

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



где X – материнское ядро; Y – дочернее ядро.

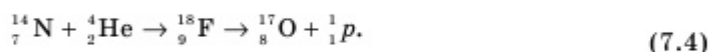
Для протекания любой ядерной реакции бомбардирующие α -частицы должны вплотную приближаться к ядру, где действуют ядерные силы. Однако это удается особенно трудно, если бомбардирующая частица является положительно заряженной, так как между одноименно заряженными частицами действуют силы кулоновского отталкивания. Поэтому для преодоления этих сил частицам нужно сообщить огромную энергию, которая передается с помощью ускорителей частиц. Это энергия порядка 10^5 МэВ.

3. Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

- 1) **по роду участвующих в них частиц**, например: реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;
- 2) **по энергии бомбардирующих частиц**, например: 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 ядер, участвующих в них**, например: реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);

- 4) *по характеру происходящих ядерных превращений*, например: 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).

Первая в истории ядерная реакция была осуществлена в 1919 году Э. Резерфордом при бомбардировке атомов азота α -частицами:



Первая ядерная реакция на быстрых протонах (${}^1_1\text{p}$ или то же самое ${}^1_1\text{H}$) была осуществлена в 1932 году:



Как видно из этой реакции, при бомбардировке лития протонами возникают ядра гелия, разлетающиеся следы (треки) которых видны на *рис. 7.2.1*.

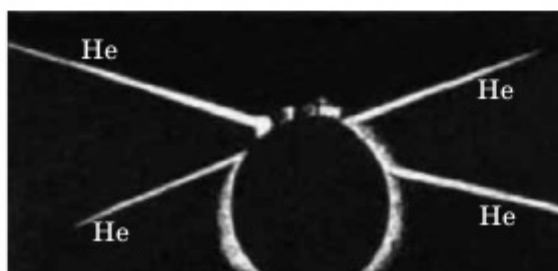


Рис. 7.2.1. Возникновение ядер гелия при ядерной реакции

В любой ядерной реакции (или радиоактивном распаде) выполняются **законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел**, которые 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.*

При ядерных реакциях выполняются также *законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.*

Примером реакции на нейтронах является:



Ядерную реакцию на нейтронах основательно исследовал итальянский физик Энрико Ферми; в частности, он установил, что в делении ядра медленные нейтроны оказались более эффективными, чем быстрые. Поэтому было предложено замедлять быстрые нейтроны в воде. Этот метод обусловлен значительной потерей энергии нейтронов после их столкновения с ядрами водорода, так как масса нейтрона и масса ядра водорода примерно равны.

4. В отличие от естественного радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, искусственные ядерные реакции могут быть как *экзотермическими* (с выделением энергии), так и *эндотермическими* (с поглощением энергии). Для определения этих видов реакций используют понятие, называемое *энергетическим выходом ядерной реакции*.

Энергетическим выходом ядерной реакции называется разница энергии покоя ядер и частиц до реакции и после нее.

Если суммарная энергия, эквивалентная суммарной массе ядер и частиц, до реакции больше, чем после нее, то реакция идет с выделением энергии, т.е. является *экзотермической*. В обратном случае в ходе реакции энергия поглощается и реакция является *эндотермической*.

Примером эндотермической реакции является бомбардировка азота α -частицами (7.4). При этом часть подводимой энергии переходит в изменение внутренней энергии вновь образовавшегося ядра кислорода.

5. К искусственным ядерным реакциям относится *деление тяжелых ядер*. Делиться могут только ядра тяжелых элементов, таких как *уран, плутоний, нептуний*.

Открытие деления урана 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, и возбужденное ядро начинает делиться. Так происходит потому, что масса покоя тяжелого ядра больше массы покоя осколков, на которые это ядро делится.

Деление ядра можно объяснить на основе энергии связи ядер. Удельная энергия связи ядра элементов в конце таблицы Менделеева меньше удельной энергии связи элементов в средней части ($E_{св}$). Отметим, что энергия связи – это та потенциальная ядерная энергия, которая направлена на удержание в ядре нуклонов. Именно за счет этой энергии сумма масс частиц, составляющих ядро, больше массы самого ядра. При этом Δm – разница этих масс согласно соотношению энергии и массы ($E_{св} = \Delta mc^2$) в результате деления тяжелых ядер выделяется в виде кинетической и лучистой энергии. Таким образом, при делении каждого ядра освобождается энергия порядка 200 МэВ. В то же время энергия связи дочерних ядер по сравнению с материнскими ядрами



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 немногих физиков, преуспевших во многих областях физики.

увеличивается примерно на 1 МэВ. Это является энергетически выгодным для новых дочерних ядер, так как при этом повышается их устойчивость.

Удельной энергией связи называется энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон $\left(\frac{E_{св}}{A}\right)$. График зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов в ядрах (от массового числа) приведен на рис. 7.2.2, а.

б. 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 (рис. 7.2.2, б).

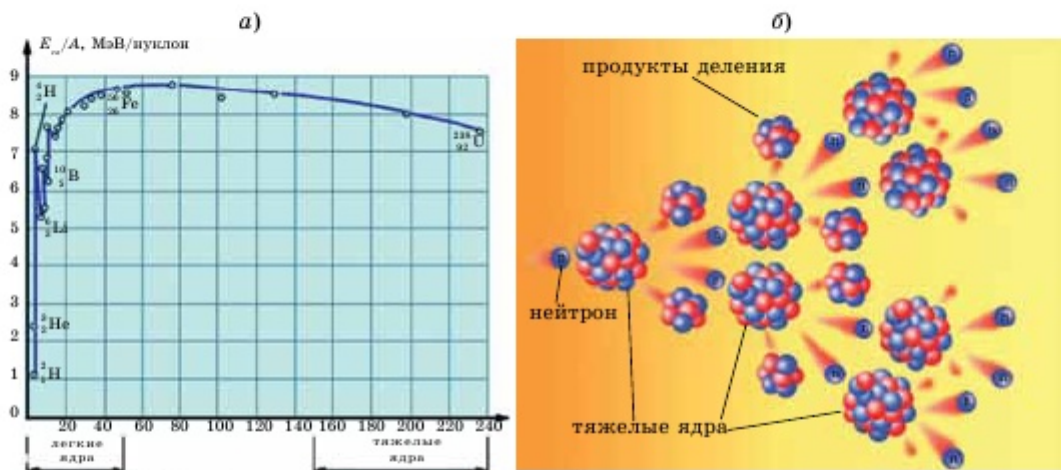


Рис. 7.2.2: а) график зависимости удельной энергии связи от массового числа; б) цепная ядерная реакция

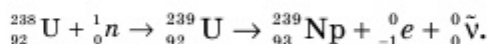
Цепной реакцией называется ядерная реакция, в которой осуществляется непрерывное деление тяжелых ядер с помощью нейтронов, образующихся как продукты самой реакции.

Цепная реакция деления характеризуется коэффициентом размножения k нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. 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.

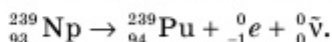
Оказывается, что не все образующиеся вторичные нейтроны вызывают последующее деление ядер, что приводит к уменьшению коэффициента размножения. Во-первых, из-за конечных размеров активной зоны (пространство, где происходит цепная реакция) и большой проникающей способности нейтронов часть из них покинет активную зону раньше, чем будет захвачена каким-либо ядром.

Во-вторых, часть нейтронов захватывается ядрами неделящихся примесей, всегда присутствующих в активной зоне. Кроме того, наряду с делением могут иметь место конкурирующие процессы радиационного захвата и неупругого рассеяния.

Большое значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов изотопом урана ${}_{92}^{238}\text{U}$. После захвата образуется радиоактивный изотоп ${}_{92}^{239}\text{U}$, период полураспада которого равен 23 минутам. После его β -распада с выделением электрона образуется *нептуний* – первый трансурановый элемент с периодом полураспада 2 дня:



Затем после β -распада нептуния образуется *плутоний*:

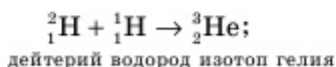
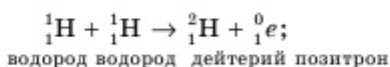


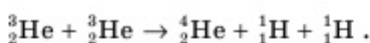
Плутоний является относительно стабильным элементом. Период его полураспада равен 24 000 лет. При воздействии на него медленными нейтронами возможно осуществить цепную реакцию деления, при которой выделяется огромная энергия.

Поэтому плутоний наряду с ураном-235 является потенциальным ядерным топливом для атомных электрических станций.

7. Другим наиболее эффективным способом освобождения внутриядерной энергии является слияние (синтез) ядер более легких элементов, таких как водород, гелий, литий и др. Действительно, как это видно из графика (рис. 7.2.2, а), удельная энергия связи у тяжелых элементов уменьшается с ростом числа нуклонов. Следовательно, ядра таких тяжелых элементов, как уран, намного легче делить, чем объединять. Тогда как удельная энергия связи у легких элементов увеличивается с ростом числа нуклонов в их ядрах. Поэтому ядра таких элементов, как, например, водород или гелий, намного легче объединить (синтезировать), чем делить. Именно ядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звезд, в том числе и Солнца. Слияние легких ядер в более тяжелое ядро происходит при температуре десятков миллионов градусов, поэтому ядерную реакцию с участием ядер легких элементов называют *термоядерной реакцией*.

В настоящее время ученые многих стран мира, в том числе и нашей страны, на базе установки токамака изучают разные аспекты управляемого термоядерного синтеза. При термоядерном синтезе энергетический выход на один нуклон ядра в четыре раза превышает энергетический выход реакции деления тяжелых ядер. Ниже в качестве примера представлены некоторые виды термоядерных реакций:





изотоп гелия гелий водород водород
гелия гелия

Когда проблема управляемого термоядерного синтеза будет решена, человечество навсегда избавится от энергетического голода. Главным преимуществом термоядерной реакции является еще и то, что при синтезе ядер не выделяются вредные радиоактивные отходы, как это бывает при реакциях деления ядер.



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 более перечного зерна.



Вопросы

1. Какой процесс называется ядерной реакцией?
2. Какими бывают ядерные реакции?
3. Как формулируются законы сохранения массовых и зарядовых чисел? Приведите примеры, написав несколько ядерных реакций.
4. Какая реакция называется цепной ядерной реакцией? Как будет вести себя ядерная цепная реакция при $k > 1$; $k = 1$; $k < 1$?
5. Какая реакция называется термоядерной? Какими преимуществами обладают термоядерные реакции по сравнению с реакциями деления?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Ядро ${}^7_3\text{Li}$, захватывая протон, распадается на две α -частицы. Определите сумму кинетических энергий этих частиц.

Дано:

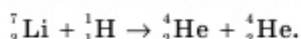


2 α -частицы

$W(2\alpha) = ?$

Решение:

Для начала запишем ядерную реакцию согласно условию задачи:



Кинетическая энергия образовавшихся двух ядер гелия (двух α -частиц) равна разнице суммарных энергий частиц, указанных на левой и правой сторонах записанной ранее реакции: $W(2\alpha) = E_1 - E_2$, где

$$E_1 = \sum m_1 c^2 = [m({}^7_3\text{Li}) + m({}^1_1\text{H})] c^2; \quad E_2 = \sum m_2 c^2 = [2m({}^4_2\text{He})] c^2.$$

Это при условии, что массы ядер измеряются в килограммах и полученная энергия будет в джоулях.

Для удобства используем табличные данные масс ядер, выраженные в а. е. м. Следовательно, указанные выше формулы будут иметь следующий вид, а энергия будет выражена в МэВ.

$$E_1 = 931 \cdot [m({}^7_3\text{Li}) + m({}^1_1\text{H})] = 931 \cdot [7,01601 + 1,00783] = 7470,19 \text{ (МэВ)}.$$

$$E_2 = 931 \cdot [2m({}_2^4\text{He})] = 931 \cdot 2 \cdot 4,00260 = 7452,84 \text{ (МэВ)}.$$

$$W(2\alpha) = E_1 - E_2 = 17,35 \text{ (МэВ)}.$$

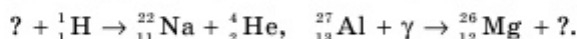
Ответ: 17,35 (МэВ).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

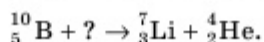
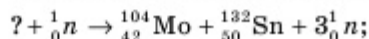
7.2.1. Напишите недостающие обозначения в следующих реакциях:



7.2.2. В результате захвата нейтрона ядром ${}_{12}^{25}\text{Mg}$ образуется неизвестный элемент и протон. Запишите эту реакцию и определите неизвестный элемент.

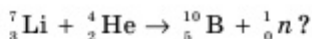
7.2.3. При облучении изотопа меди ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ протонами реакция может идти несколькими путями: с выделением одного нейтрона; с выделением двух нейтронов; с выделением протона и нейтрона. Ядра каких элементов образуются в каждом случае? (Ответ: ${}_{30}^{63}\text{Zn}$; ${}_{30}^{62}\text{Zn}$; ${}_{29}^{62}\text{Cu}$.)

7.2.4. Определите неизвестные элементы ядерных реакций:



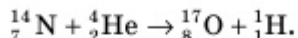
Уровень В

7.2.5. Какую минимальную энергию должна иметь α -частица для осуществления ядерной реакции:



(Ответ: 2,8 МэВ.)

7.2.6. Определите энергетический выход ядерной реакции:



(Ответ: -1,2 МэВ.)

§ 7.3

Биологическое действие радиоактивных излучений. 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.

Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Механизм поражающего действия излучений сводится к ионизации атомов и молекул, и это приводит к изменению их химической активности. Облучение оказывает сильное влияние на наследственность, поражая гены в хромосомах. В большинстве случаев это влияние является неблагоприятным.

Различные виды излучений сопровождаются высвобождением разного количества энергии и обладают различной проникающей способностью, поэтому они оказывают неодинаковое воздействие на ткани живого организма. Альфа-излучение задерживается, например, листом бумаги и практически не способно проникнуть через наружный слой кожи. Поэтому оно не представляет опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие α -частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей, водой или с вдыхаемым воздухом или паром, например, в бане; тогда они становятся чрезвычайно опасными. Бета-частица обладает большей проникающей способностью: она проходит в ткани организма на глубину 1–2 см и более в зависимости от величины энергии. Проникающая способность γ -излучения, которое распространяется со скоростью света, очень велика: его может задержать лишь толстая свинцовая или бетонная плита.

Проникнувшие в ткани организма α - и β -частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, вблизи которых они проходят. Вследствие чего от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому остальная часть исходного нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется *ионизацией*. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.

И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и участвуют в сложной цепи реакций. В результате реакций образуются новые молекулы, включая так называемые свободные радикалы, чрезвычайно опасные своей способностью вызывать разрушительные реакции.

Образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не до конца изученных, могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.

Механизм биологического воздействия радиоактивного излучения делится на *соматический* и *генетический*. Соматические эффекты проявляются непосредственно у наблюдаемых организмов, подверженных облучению, генетические – передаются потомству, поражая хромосомы. Причем действие облучения проявляется не сразу – колеблется от 2–3 часов до нескольких месяцев.

В медицине действие радиоактивного излучения в разумных пределах дозирования 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. Степень воздействия радиоактивного излучения на живые организмы определяется *дозой излучения*.

Поглощенной дозой D излучения называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого объекта:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (7.4)$$

В СИ поглощенную дозу излучения выражают в *греях* (сокращенно *Гр*). 1 Гр равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному объекту 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 -излучений.

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:

$$H = D \cdot k. \quad (7.5)$$

Единица эквивалентной дозы – *зиверт* (Зв). 1 Зв – эквивалентная доза, при которой доза поглощенного γ -излучения равна 1 Гр.

Максимальное значение эквивалентной дозы, после которого происходит поражение организма, выражающееся в нарушении деления клетки или образовании новых видоизмененных 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**.

3. Защита организмов 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 водой, бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита и воды.

Большую опасность представляют радиоактивные отходы, которые являются неизбежным побочным продуктом использования ядерных технологий для производства электроэнергии, в медицине, сельском хозяйстве, промышленности и на АЭС.



Рис. 7.3.1. Выявление радиоактивных материалов

*Для защиты от радиоактивных отходов принимаются специальные меры. На первом этапе определяются их радиоактивные характеристики. Этот этап называется **характеризацией**. Для установления присутствия или поиска опасных материалов или запрещенных предметов используются радиографический и другие томографические методы (рис. 7.3.1).*



Рис. 7.3.2. Дезактивация радиоактивных материалов

На этапе предварительной обработки отходы подготавливаются к обработке, что может предполагать сортировку и разделение разных типов отходов, а также их уменьшение в размере или измельчение для оптимизации процессов обработки и захоронения (рис. 7.3.2). С помощью **методов дезактивации** сокращается объем отходов, требующих обработки.

На этапе **обработки** производится сокращение объема отходов, удаление из отходов радионуклидов, а нередко и изменение их физического и химического составов. Существуют технологии обработки как жидких, так и твердых отходов.

На этапе кондиционирования отходы преобразуются в безопасную форму для перевозки, хранения и захоронения. К обычным формам отходов, кондиционированных для захоронения, относятся герметизированные отходы в цементе, битуме или стекле. Этот метод позволяет замедлить выброс в окружающую среду радионуклидов, которые излучаются захороненными отходами.

Необработанные и обработанные отходы должны храниться в безопасном и защищенном месте и при необходимости извлекаться (рис. 7.3.3). Требования к хранению зависят от типа отходов, и хранение может быть краткосрочным – до завершения радиоактивного распада – либо долгосрочным, до тех пор, пока отходы не будут безопасно перемещены на подходящую площадку для захоронения.

Надлежащий способ захоронения и необходимая степень изоляции и локализации определяются в зависимости от свойств отходов и длительности периода, в течение которого отходы остаются радиоактивными. Пригодность отходов для захоронения на той или иной конкретной площадке должна быть продемонстрирована с помощью обоснования безопасности и сопутствующей оценки безопасности данной площадки. К примеру, на севере Франции (в Нормандии) есть специальная площадка для захоронения низкоактивных отходов.



Рис. 7.3.3. Хранение радиоактивных отходов

Дополнительный материал



Все органические соединения, все растения, все животные содержат радиоактивный изотоп углерода C^{14} , следовательно, обладают собственной радиоактивностью. Человек не является исключением, все люди также радиоактивны.

Каждый грамм «живого» организма в основном из-за радиоактивного изотопа C^{14} испытывает около 15 распадов в минуту. «Полная» радиоактивность человеческого тела, измеренная сцинтилляционным счетчиком, составляет примерно 200 000 распад/мин.

Точно так же можно измерить радиоактивность живого дерева или какого-либо животного. Изотоп C^{14} продолжает распадаться даже в спиленном дереве, в мертвом животном. Период полураспада этого радиоактивного углерода составляет 5700 лет; следовательно, за эти годы количество углерода C^{14} в останках будет уменьшаться в два раза. Именно это явление позволило американскому ученому Либби разработать и изобрести в 1948 году *радиоуглеродный метод*, позволяющий определить с большой точностью возраст и время жизни предметов, найденных в археологических раскопках (например, «золотого человека» или мамонта). За это изобретение и разработку в 1960 году Либби была присуждена Нобелевская премия по физике.

**Вопросы**

1. Какие реакции могут быть у человека при воздействии радиоактивного излучения?
2. Где используется радиоактивное излучение?
3. Что называют поглощенной дозой излучения?
4. Каковы предельно безопасные нормы облучения для человека?
5. Каким образом можно защититься от радиации?
6. Какие меры безопасности принимаются при работе с радиоактивными материалами и захоронении радиоактивных отходов?

**Задание (практическое исследование)**

Объясните, почему α -частицы, испускаемые радиоактивными препаратами, не могут вызывать ядерных реакций в тяжелых элементах.

§ 7.4**Ядерный реактор. Ядерная энергетика**

1. Большое значение в ядерной энергетике приобретает не только осуществление цепной реакции деления, но и управление ею. Управляемая ядерная реакция осуществляется в *ядерных реакторах*.

Устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления, сопровождающаяся выделением энергии, называются ядерными реакторами.

Пуск первого реактора в мире был осуществлен в США на территории Чикагского университета (1942) под руководством Э. Ферми, первый в Европе и Азии реактор был создан в СССР на окраине Москвы (1946) под руководством И. В. Курчатова.

Для пояснения работы реактора рассмотрим принцип его действия. 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 (ТВЭЛ) с замедлителем* – нейтронов.

Активная зона находится внутри своеобразной капсулы, называемой *отражателем нейтронов*. Через активную зону протекает обычная вода, которая является *теплоносителем*. 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 ра-

большее пространство управляющих стержней из кадмия и бора – веществ, хорошо поглощающих нейтроны. В первой части рис. 7.4.1 показан реакторный зал, во второй части показана система энергообеспечения с участием реактора.

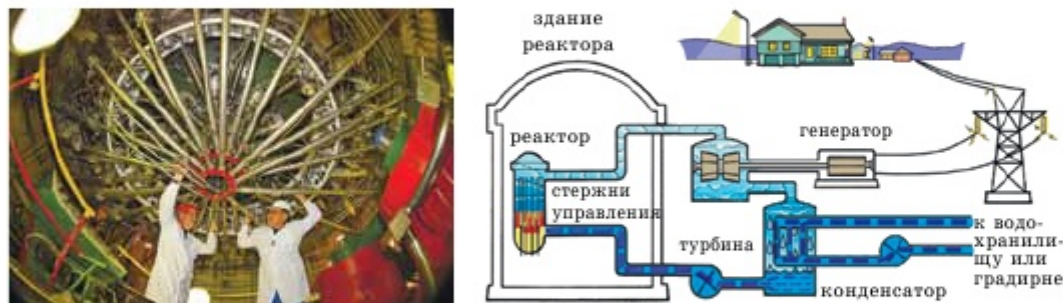


Рис. 7.4.1. Атомный (ядерный) реактор (слева) и общая схема АЭС

Реактор запускается, когда из его активной зоны осторожно извлекаются управляющие стержни, поглощающие нейтроны. Во время цепной реакции высвобождается большая тепловая энергия; циркулирующая вода, омывая топливные элементы, в активной зоне реактора нагревается до 320 градусов.

Проходя внутри теплообменных трубок парогенератора, горячая вода первого контура отдает тепло воде второго контура, не соприкасаясь с ней, что исключает попадание радиоактивных веществ за пределы реакторного зала. Далее все процессы проходят как на обычной теплоэлектростанции. Вода второго контура превращается в пар. Пар с бешеной скоростью вращает турбину, а турбина приводит в движение электрогенератор. Он и вырабатывает электрический ток.

2. Коэффициент k размножения нейтронов зависит от природы делящегося изотопа, а для данного изотопа – от его количества, а также размеров и формы активной зоны.

Минимальные размеры активной зоны реактора, при которых возможно осуществление цепной ядерной 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 ($k > 1$) осуществляется цепная ядерная реакция, а при вдвинутых стержнях ($k < 1$) развитие цепной реакции прекращается. Такое управление цепной реакцией является автоматизированным процессом.

3. Создание ядерных реакторов привело к промышленному применению ядерной энергии. **Ядерной (атомной) энергией называется внутренняя энергия атомного ядра, выделяющаяся при ядерных превращениях.**

Неуправляемое выделение ядерной энергии происходит во время взрыва ядерной (атомной) бомбы. **Управляемое** выделение осуществляется в ядерных реакторах атомных электрических станций (АЭС), где используется ядерное

топливо (уран и др.). Запасы ядерного горючего в рудах примерно на два порядка превышает запасы органических видов топлива. 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.

4. Огромные возможности для развития атомной энергетики открываются с созданием *реакторов-размножителей* на быстрых нейтронах, в которых выработка энергии сопровождается производством вторичного горючего – плутония, 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, где из этих видов ядерного топлива вырабатывается не только энергия, но и получается большое количество вторичного ядерного топлива. Для сравнения приведем следующие данные: 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. Однако технологическая сторона решения этой проблемы остается открытой.

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 составляет 40 кВт, электрическая – 0,8 кВт).

5. В Казахстане имеется три ядерных реактора. Один из реакторов расположен в Алматы – в Институте ядерной физики. Исследовательский атомный реактор ВВР-К 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, гамма-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 ЕХРО в 2017 году произведен физический пуск отечественного материаловедческого *термоядерного реактора токамак*. В токамаке осуществляется термоядерная реакция слияния (синтеза) атомных ядер легких элементов. Однако энергетический выход этих реакций пока еще остается незначительным. Ученые ведут поиски различных путей и технологий повышения энергетического выхода управляемых термоядерных реакций синтеза. Запустив токамак, наша страна вошла в десятку стран мира, имеющих подобные высокотехнологические установки. Казахстанским токамаком уже заинтересовался ряд государств. Со многими из них уже подписано соглашение о совместном его использовании.

**Дополнительный материал**

- Казахстан по запасам урана занимает второе место (13%) в мире после Австралии (26%). При этом наше государство занимает первое место в мире по производству урана, обеспечивая около 9% мирового рынка.
- Самый большой в мире парк АЭС принадлежит США. В эксплуатации находятся энергоблоки суммарной мощностью около 100 ГВт. Они обеспечивают производство 20% электроэнергии.
- Мировым лидером по использованию АЭС является Франция. Ее энергоблоки вырабатывают около 80% всей электроэнергии. 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 можно объяснить принцип действия ядерного реактора? Как осуществляется управление ядерным реактором?
3. Что такое критический размер и критическая масса?
4. Какой характер носит цепная реакция деления, если коэффициент размножения: 1) $k > 1$; 2) $k = 1$; 3) $k < 1$.
5. В чем заключается преимущество и проблема атомных электрических станций? Как обстоит дело в странах СНГ и мире?
6. В каких целях используются ядерные реакторы? Какая энергия называется ядерной? Какие ядерные реакции осуществляются в токамаке? Каковы их сложности и перспективы?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Какую энергию можно получить от деления 1 г урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, если при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ?

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
${}_{92}^{235}\text{U}$		Найдем количество N делящихся ядер
$W_0 = 200 \text{ МэВ}$	$32 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$	в 1 грамме урана:
$m = 1 \text{ г}$	0,001 кг	$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \Rightarrow N = \frac{mN_A}{M} = \frac{0,001 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{235 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^{21}$.
$W - ?$		

Умножим количество атомов урана на энергию, выделяющуюся при одном акте деления:

$$W = W_0 \cdot N = 32 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^{21} = 80 \cdot 10^9 \text{ (Дж)}.$$

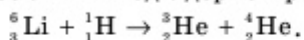
Переведем в эВ:

$$\frac{80 \cdot 10^9}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 50 \cdot 10^{28} \text{ эВ} = 5 \cdot 10^{28} \text{ (МэВ)}.$$

Ответ: $5 \cdot 10^{28}$ (МэВ).

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 7.4.1. Вычислите энергетический выход ядерной реакции:



(Ответ: 4 МэВ.)

Уровень В

- 7.4.2. Найдите электрическую мощность атомной электростанции, расходующей уран ${}^{235}_{92}\text{U}$ массой 0,1 кг в сутки, если КПД станции составляет 16%. Считать, что при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ. (Ответ: 15,13 МВт.)
- 7.4.3. Сколько каменного угля нужно сжечь для того, чтобы получить такую же энергию, какая выделяется при распаде 1 г урана ${}^{235}_{92}\text{U}$? Считать, что при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ. Удельная теплота сгорания каменного угля равна 27 МДж/кг. (Ответ: 3 тонны.)
- 7.4.4. Какова электрическая мощность электростанции, расходующей в сутки 220 г урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ и имеющей КПД 25%? Считать, что при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ. (Ответ: 52 МВт.)
- 7.4.5. Средняя поглощенная доза излучения сотрудником, работающим с рентгеновской установкой, равна 7 мкГр за один час. Опасна ли работа сотрудника в течение 200 дней в году по шесть часов в день, если предельно допустимая доза облучения равна 50 мГр в год? (Ответ: безопасна.)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 7

- **Радиоактивностью** называют самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц.
- **Закон смещения Содди:** 1) при α -распаде ядро теряет положительный заряд $2e$, его масса уменьшается на четыре атомные единицы массы. В результате появившийся новый элемент смещается примерно на две клетки к началу периодической системы; 2) при β -распаде ядро увеличивает свой заряд на единицу, но его масса остается неизменной. В результате появившийся элемент смещается на одну клетку к концу периодической системы.
- **Гамма-излучение** не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады.
- **Периодом полураспада** называется время, в течение которого распадается половина первоначального числа ядер атомов.

- **Закон радиоактивного распада** описывается формулой: $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, где $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ называется **постоянной радиоактивного распада**.
- **Атомное ядро** – центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, называемых **нуклонами**.
- Ядра с одинаковыми зарядовыми числами Z , но разными массовыми числами A (т.е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$) называются **изотопами**.
- **Ядерными реакциями** называют превращения атомных ядер при взаимодействии между собой или с другими частицами.
- **Закон сохранения зарядовых и массовых чисел**: сумма зарядовых чисел (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядовых чисел (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.
- **Удельной энергией связи** называется энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон: $E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$.
- **Энергетическим выходом ядерной реакции** называется разница энергии покоя ядер и частиц до реакции и после нее.
- **Цепной реакцией деления** называется ядерная реакция, в которой осуществляется непрерывное деление тяжелых ядер с помощью нейтронов, образующихся как продукты этой реакции.
- **Ядерными (атомными) реакторами** называют устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления.
- **Поглощенной дозой излучения** называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}$$

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:



объяснять физические свойства наноматериалов, способы их получения и применения.

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
сканерлейтін туннельдік микроскоп	сканирующий туннельный микроскоп	scanning tunneling microscope
атомдық-күштік микроскоп	атомно-силовой микроскоп	atomic-force microscope

В этой главе рассматриваются физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «наночастица», «нанотехнология», «наноматериалы», «графен», «нанотрубки», «фуллерен», «микролитография», «нанороботы», «зондовая микроскопия», «сканирующий туннельный микроскоп», «атомно-силовой микроскоп».

§ 8.1

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*.

Техника и методика манипуляции на уровне отдельных атомов и молекул называется нанотехнологией.

Первое 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 необходимое количество молекул и энергию и написать программу для сборки необходимых предметов.

Термин «нанотехнология» впервые введен японским профессором Норио Танигучи в его докладе «Основные принципы нанотехнологии» на международной конференции в Токио в 1974 году.

2. Различные предметы, сконструированные из наночастиц и нанокристаллитов (зёрен), называют наноматериалами.

В 8 классе, рассматривая явления броуновского движения и диффузии частиц, мы впервые упоминали о том, что кристаллические тела состоят из отдельных кристаллитов, называемых *зёрнами*. Поликристаллические тела состоят из различно ориентированных зёрен (рис. 8.1.1), а монокристалл представляет собой большое монокристаллическое зерно, где кристаллические плоскости атомов имеют одну и ту же пространственную ориентацию.

Наноматериалы классифицируются и по *размерам зёрен*, и по пространственной *структуре кристаллической решетки*.

К основным типам нанокристаллических материалов по *размерности* относятся: нульмерные (0D) *нанокластеры*, например, молекулы *фуллере́на* (рис. 8.1.2, а), из которых создают более протяженные наноматериалы; одномерные (1D) *волоконные материалы*, например, *нанотрубки* (рис. 8.1.2, б); двумерные (2D) *пленки и многослойные материалы*, например, однослойный и многослойный *графены* (рис. 8.1.2, в); *трехмерные (3D) поликристаллические материалы*, например, *медь* (рис. 8.1.1), зёрна которых имеют сравнимые размеры во всех трех направлениях.

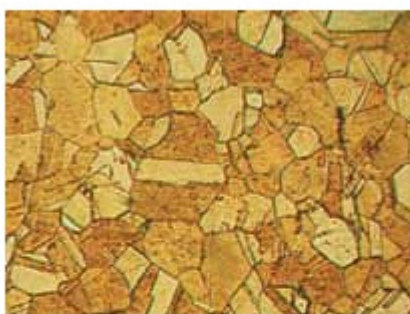


Рис. 8.1.1. Многозернистый поликристалл меди

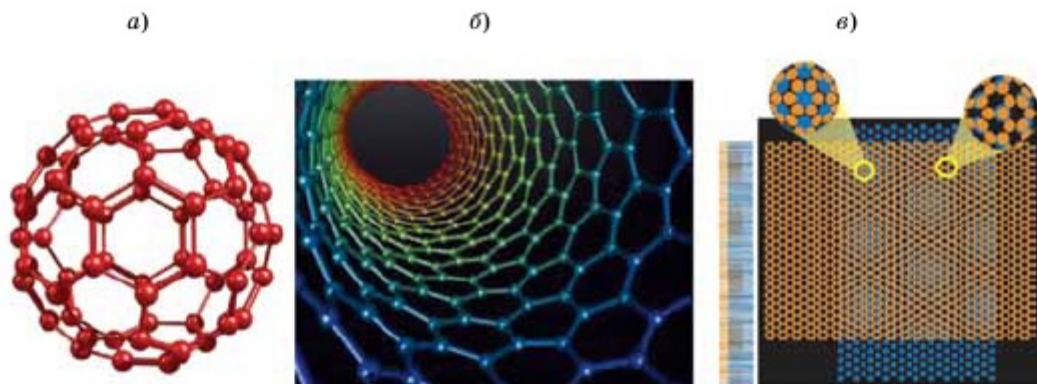


Рис. 8.1.2. Нанозлементы и наноматериалы: а) молекула фуллере́на; б) нанотрубка; в) многослойный наноматериал (состоит из графенов)

Фуллерен – *стабильная молекула, напоминающая футбольный мяч, 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 одной или нескольких свернутых в трубку графенов*.

Графен – *монослой атомов углерода, т.е. однослойная нанопленка из атомов углерода; он получен в октябре 2004 года в Манчестерском университете*.

Совокупность фуллере́на, нанотрубки и графена часто называют нанозлементами.

Классификация веществ и материалов по размеру частиц и числу участвующих в них атомов показана в *таблице 8.1.1*.

Таблица 8.1.1

Условная классификация нановеществ и материалов

Наноэлементы и материалы	Размеры частиц (зёрен)	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

3. В теории и на практике доказано, что свойства материалов претерпевают качественные 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,** стало известно, что изменение свойств вещества зависит не только от конфигурации кристаллической решетки, но и от **величины (размерности) структурных элементов (частиц, зёрен)**, из которых они состоят. **В-третьих, чужеродные (примесные) атомы,** внедренные в молекулярные кластеры, также разительно изменяют свойства наноматериалов. Действительно, даже в обычных материалах в зависимости от количества примесных атомов углерода можно получить **закаленный булат** (сталь), **бронированный сплав** или **чугун**, свойства которых существенно отличаются друг от друга.

4. В последние десятилетия интерес к сверхмелкозернистым кристаллическим и наноразмерным порошкам и другим мелкодисперсным частицам резко вырос. Потому что, как указывалось выше, обнаружилось (в первую очередь на металлах, *рис. 8.1.1*), что уменьшение размеров структурных элементов (**частиц, зёрен**) ниже некоторой пороговой величины может привести к значительному изменению их свойств. Стало известно, что такие эффекты появляются тогда,

когда средний размер кристаллических зёрен не превышает 100 нм, и *отчетливо наблюдаются, когда размер зёрен менее 10 нм.*

Открытые новые свойства наноразмерных материалов стали интенсивно применяться в повседневной жизни. Например, в медицине применяется нанопорошок серебра, который обладает антисептическими свойствами. Наночастицы диоксида титана отталкивают грязь и позволяют создать самоочищающиеся поверхности и в быту, и в промышленности. Нанопорошок алюминия ускоряет сгорание твердого топлива ракеты, соответственно повышая ее мощность. Новые литиево-ионные аккумуляторы, содержащие наночастицы, заряжаются буквально за пару минут, а не часами, что открывает грандиозную перспективу для развития экологически чистого вида транспорта, в частности электромобилей.

Особенно *однослойные нанотрубки*, начиная с 1991 года, стали привлекать пристальное внимание ученых. Оказалось, что прочность таких сверхлегких углеродистых трубок с примесью некоторых атомов других элементов превышает прочность стали в 60 раз, выдерживая при этом нагрев до 2500 градусов и давление в тысячи атмосфер. Эта прочность свойственна и изготовленным на их основе материалам. В электронике подобные нанотрубки могут применяться и как хорошие проводники, и как полупроводники.

Достигнутые успехи в области нанотехнологии и наноматериалов, по словам ученых, могут оказаться весьма полезными и 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 (10 атомов в диаметре), в которую удобно внедрять лекарства, протеины и радионуклиды. Достигнув цели, биосиликон начинает распадаться, а доставленные им лекарства берутся за работу.

Нанотехнология, интегрируясь с другими передовыми технологиями, может совершить настоящие чудеса даже в области музыки, литературы, балета, театра и других видов искусства, 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.

5. Благодаря нанотехнологии и наноматериалам расширились горизонты космических исследований. Так, например, новые наноматериалы позволяют на два порядка (т.е. в 100 раз) снизить массу и габариты любых приборов, в том числе выводимых в космос. Действительно, 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.

Двумерные легкие нанослойные зеркала хорошо защищают от губительных рентгеновских излучений, так как эти зеркала практически полностью отражают рентгеновские лучи, тогда как другие материалы пропускают их. Использование таких нанозеркал в рентгеновских телескопах позволяет отражать и фокусировать рентгеновское излучение с энергией до 35 кэВ, а также усиливать очень слабые сигналы, доходящие до нас из глубины отдаленных источников Вселенной. Дело в том, что оптические телескопы не смогут улавливать сигналы глубинных космических объектов, так как излучаемые ими электромагнитные волны видимого спектра поглощаются межгалактическими и межзвездными газовыми облаками. Тогда как электромагнитные волны рентгеновского излучения, не поглощаясь в межгалактической туманности, продолжают путь во Вселенной, неся с собой огромную информацию. Очень важная информация, например, недавно зарегистрирована рентгеновским телескопом «Чандра» из глубины нашей Галактики, отстоящей от нас на расстоянии 26 световых лет. Оказывается, в центре Галактики происходят удивительные явления, сопровождающиеся расширением и 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.



Вопросы

1. Каково краткое определение нанотехнологии, в чем заключается ее суть и смысл? Чьи труды стали толчком к развитию нанотехнологии?
2. Какие материалы называются наноматериалами? По каким признакам они классифицируются? Как их называют?
3. Какие объекты называются фуллеренами, нанотрубками, графенами и нанодомашниками?
4. В каких случаях свойства материалов претерпевают качественные изменения?
5. Каковы основные достижения нанотехнологии? В каких областях жизни стали применяться эти достижения?
6. Какой вклад вносят нанотехнология и наноматериалы в исследования космоса?



§ 8.2

Способы получения наноматериалов и перспективы их развития

1. *Существуют различные методы получения наноматериалов.* В научной литературе эти методы формально делятся на два класса: к первому классу относятся методы, используемые для синтеза нанокристаллических порошков (изолированных наночастиц), а ко второму – методы получения компактных плоских и объемных наноматериалов. В настоящее время промышленное применение получил только метод **микролитографии**, позволяющий получать на поверхности матриц плоские островковые объекты размером от 50 нм, используемые в электро-

нике. Остальные методы пока еще служат в основном для сугубо научных целей. Так, например, трехмерные частицы получены такими методами, как *взрыв проводников, плазменный синтез, восстановление тонких пленок*; двумерные объекты (графены, пленки) – методом *молекулярно-ионного наслаивания*; одномерные нанополосчатые объекты (нанотрубки) – такими способами, как *молекулярное наслаивание, введение веществ в микропоры цилиндра*.

Наиболее перспективными являются методы ионного и молекулярного наслаивания, поскольку с их помощью возможно создание реальных монослоев. Для получения нульмерных молекул фуллеренов, а также одно-, дву- и трехмерных наноматериалов, созданных на их основе, широко стали применяться методы электрического разряда в плазме между графитовыми электродами.

2. На примере фуллереновых молекулярных кластеров рассмотрим более подробно, как *изменяются физические свойства наноматериалов в зависимости от способов их получения*. Молекулярные кластеры занимают совершенно особое место среди веществ, имеющих наноструктуру. Наиболее известны среди них *фуллереновая* модификация углерода наряду с графитом и алмазом. 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. 8.2.1, а) атомы углерода (их всего 60) образуют замкнутую полую сферическую поверхность, состоящую из 5- и 6-членных кольцеобразных многоугольников, причем каждый атом имеет координационное число, равное трем. Это означает, что каждый атом находится в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника. 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 и была названа *фуллереном*.

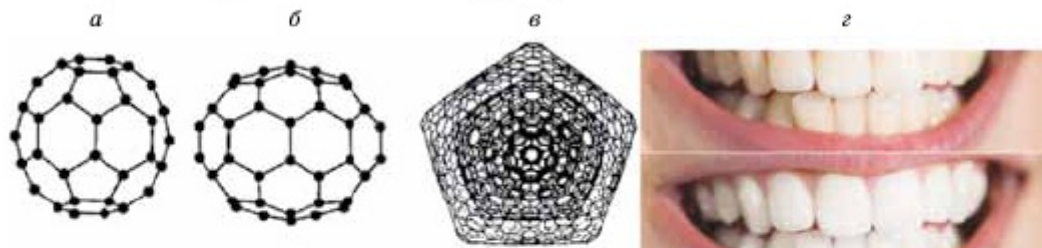


Рис. 8.2.1. Фуллерены и фуллереноподобные молекулы (а-в); «умная» нанопленка очищает и защищает зубы (г)

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} , состоящая из 60 атомов углерода, имеет форму футбольного

мяча (рис. 8.2.1, а), а вторая его модифицированная молекула C_{70} , состоящая из 70 атомов углерода, имеет форму бейсбольного мяча (рис. 8.2.1, б). Существуют и другие конструкции фуллереноподобной молекулы (рис. 8.2.1, в).

Центральное место среди фуллеренов принадлежит молекуле C_{60} , 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 образуются молекулярные кристаллы с гранцентрированной кристаллической (ГЦК) структурой, параметр решетки которой составляет 1,417 нм. Такой твердотельный фуллерен называется **фуллеритом**.

Очень необычны свойства фуллеритов. Так, например, кристаллические фуллериты представляют собой полупроводники и обладают 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 при температуре 900 К и давлении 30–50 ГПа.

3. Создаваемые искусственно нанообъекты постоянно удивляют исследователей своими новыми свойствами и обещают самые неожиданные перспективы применения. В этой связи растет энтузиазм ученых по поводу приближения эры воплощения самых фантастических идей. Действительно, благодаря уникальным свойствам наноматериалов их начали применять уже во многих областях жизни. В качестве примера приводим следующие сведения.

Легкоочищаемые наноматериалы находят применение в быту, архитектуре, молочной и пищевой промышленности, транспортной индустрии, санитарии. Для этих целей налаживается производство самоочищающихся стёкол, 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, легко очищаемая 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 ДНК-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 осуществлены 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* (рис. 8.2.1, г) и *прецизионных инструментов, наноканюль, диагностических нанозондов, имплантатов, фармацевтика направленного действия*.

4. Когда речь идет о *проблемах и перспективе развития наноматериалов, обращают внимание на 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, т.е. механизмов и роботов размером с молекулу. Среди них самой главной проблемой считается создание «умных» *нанороботов* и *наномашин* (общее название – *наноботы*) для работы на нанофабриках, выпускающих востребуемые наноматериалы и нанопродукты. 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 наномашинками;
- 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 болезни и «износа».

Настоящими неутомимыми тружениками всей этой работы будут «умные» нанороботы.

Нанороботом называется робот, созданный из наноэлементов молекулярного размера, который обладает функциями двигать отдельные атомы, обрабатывать молекулы, передавать информацию и исполнять компьютерные программы.

Нанороботы, способные к созданию своих копий, т.е. 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» наномашинки 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.).

5. В создании как нанороботов, так и наноразмерных других объектов большую надежду связывают с развитием и дальнейшей модернизацией *сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов*, которые позволяют прощупать, увидеть и перемещать атом. Создателями этих микроскопов являются Герд Бинниг и Генрих Рорер (рис. 8.2.8, а). В 1986 году физики были удостоены Нобелевской премии за изобретение 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. 8.2.2, б).

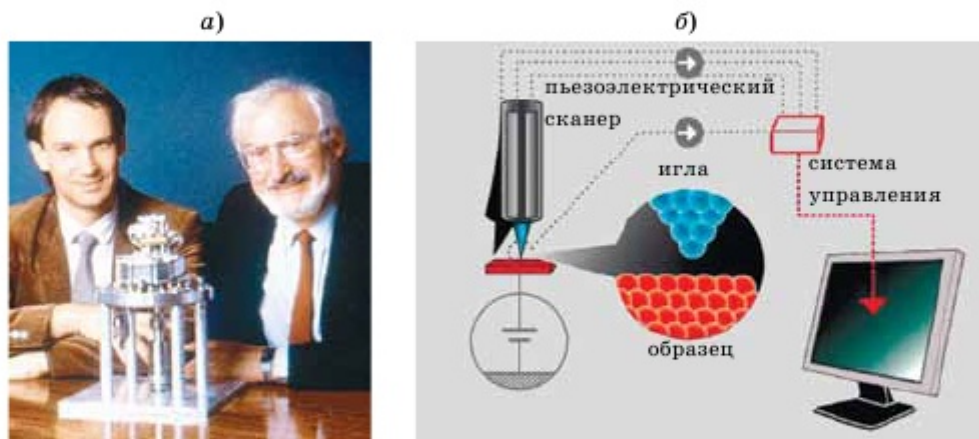


Рис. 8.2.2. а) Герд Биннинг и Генрих Рорер с первой моделью СТМ;
б) схема устройства сканирующего туннельного микроскопа

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) – это микроскоп для исследования нано-объектов, принцип работы которого основан на регистрации величины ван-дер-ваальсовой силы взаимодействий между атомами образца и зонда.

Зондовая микроскопия – это совокупность методов определения с помощью различных наноразмерных микрозондов локальных механических, электрических, магнитных и других свойств исследуемой поверхности.

Результатами измерений при зондовой нанотехнологии являются, как правило, трехмерные изображения поверхности исследуемых объектов с пространственным разрешением *в доли* нанометров. При этом зонд (игла) подводится к образцу на расстояние порядка нескольких нанометров (рис. 8.2.2, б). В зависимости от регистрируемого сигнала различают **сканирующую туннельную микроскопию** (сигналом служит регистрируемая величина туннельного тока электронов между атомами зонда и токопроводящей поверхностью образца) и **атомно-силовую микроскопию** (сигналом служит регистрируемая величина ван-дер-ваальсовой силы взаимодействий между атомами образца и зонда). Когда зонд подходит к образцу на расстояние, достаточно малое для возникновения туннельного тока или для регистрации ван-дер-ваальсовой силы, начинается регистрация «полезного» сигнала. Сигналы, полученные в каждой точке образца, складываются в цельное изображение поверхности. Сканирующий туннельный микроскоп используется для исследования электропроводящей поверхности, а атомно-силовой микроскоп применим как для проводящих, так и непроводящих объектов.



Вопросы

1. Какие методы и способы используются для получения наноматериалов?
2. Как изменяются физические свойства фуллеренов в зависимости от способов их получения?

3. В каких областях жизни находят применение уникальные свойства наноматериалов?
4. Каковы перспективные направления развития нанотехнологии? Какие объекты называются нанороботом и репликатором?
5. Какова роль зондовой микроскопии в решении основной проблемы нанотехнологии? На каких физических явлениях основываются принципы работы сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов?



Работа в группах

Учащиеся делятся на две группы. Первая группа представляет положительные примеры, связанные с развитием нанотехнологий, вторая – демонстрирует отрицательные стороны. Защиту своих взглядов рекомендуется провести в виде диспута.



Задание (теоретическое исследование)

Напишите краткий реферат на одну из следующих проектных тем:

- 1) «Поразившие меня свойства наноматериалов»;
- 2) «Наиболее интересные аспекты нанотехнологии и наноматериалов».

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 8









- **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 наноэлементов (кристаллитов, зёрен).
- **Графен** – монослой атомов углерода.
- **Нанотрубки** – протяженные цилиндрические структуры, состоящие из одной 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 микроскопов 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 9

КОСМОЛОГИЯ

ГЛАВА 9. КОСМОЛОГИЯ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять, что звезды классифицируются по яркости света и характеризуются понятиями: видимая звездная величина и абсолютная звездная величина;
-  использовать диаграмму Герцшпрунга – Рассела для объяснения эволюции звезд;
-  описывать свойства сверхновых звезд, нейтронных звезд и черных дыр;
-  описывать использование новых методов 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
астрономиялық бірлік	астрономическая единица	astronomical unit
жылдық параллакс	годовой параллакс	annual parallax
парсек	парсек	parsec
жарық жылы	световой год	light year
Метагалактика	Метагалактика	Metagalaxy

қарағы материя	темная материя	dark matter
қарағы энергия	темная энергия	dark energy
Үлкен Жарылыс	Большой Взрыв	Big Bang
реликтивтік сәулелену	реликтовое излучение	relict radiation

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «звезда», «астрономическая единица», «годовой параллакс», «парсек», «световой год», «Метагалактика», «темная материя», «темная энергия», «Большой Взрыв», «реликтовое излучение».

§ 9.1

Мир звезд. Звездные величины

1. Звездой называется массивное шарообразное плазменное образование, излучающее свет и тепло в результате протекания термоядерных реакций синтеза в его недрах.

Звезды различают по температуре, по цвету и по спектральному классу (рис. 9.1.1).

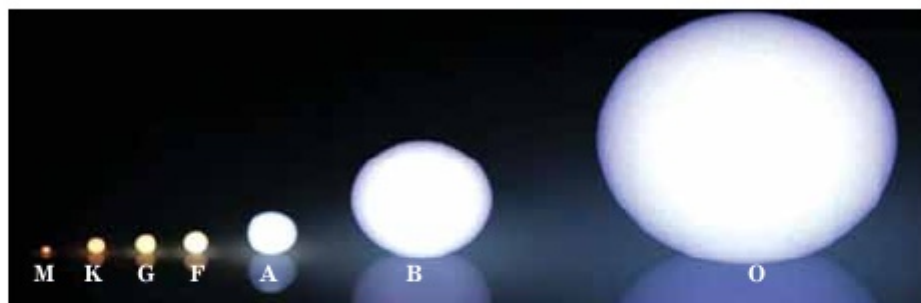


Рис. 9.1.1. Звездные классы

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). К примеру, Солнце принадлежит к спектральному классу G2. В таблице 9.1.1 приведены примеры звезд каждого класса, их цвет, температура и созвездие, в котором они располагаются.

Таблица 9.1.1

Некоторые примеры классификации 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	Альтаир	Орел
G	желтый	6 000 К	Солнце	–
K	оранжевый	5 000 К	Альдебаран	Телец
M	красный	3 500 К	Бетельгейзе	Орион

В спектрах относительно холодных звезд имеются полосы поглощения молекул, при более высоких температурах звезд наблюдаются линии поглощения нейтральных атомов. Спектр Солнца указывает на наличие ионизированных металлов (наличие металлов на Солнце может быть одним из признаков его почтенного возраста). У более горячих звезд увеличивается интенсивность линий ионизированного водорода, а у самых горячих – ионизированного гелия.

Температуру звезд определяют по их спектру (например: 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 атмосферами, то и определяемая температура, химический состав относятся только к атмосферам звезд. Температура внутри звезд вычисляется путем сложных теоретических расчетов – она достигает многих миллионов градусов.

2. Кроме того, звезды характеризуются и другими величинами, определения которых даны ниже.

Светимостью звезд (L) называется полная световая энергия, излучаемая звездой за одну секунду.

Светимость можно выражать в единицах мощности – *ваттах* (поэтому термин «светимость» заменяется термином «мощность»); 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.

Абсолютная звездная величина (M) – это видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 парсек (пк). Абсолютную звездную величину определяют по формуле:

$$M = m + 5 - 5 \lg r, \quad (9.1)$$

где m – видимая звездная величина; r – расстояние до звезды в парсеках (пк).

1 парсек равен $3,086 \cdot 10^{13}$ км; это такое расстояние до звезды, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом одной секунды $1''$.

Абсолютная звездная величина Солнца равна $M_c = +4,8^m$; это означает, что со стандартного расстояния 10 ПК Солнце выглядит слабой звездочкой почти 5-й звездной величины (видимая звездная величина Солнца $m = -27^m$).

Светимость L и звездные величины M какой-либо звезды и Солнца связаны отношением:

$$\frac{L}{L_c} = 2,512^{M_c - M}. \quad (9.2)$$

Принимая светимость Солнца $L_c = 1$ и учитывая, что $M_c = 4,8^m$, получаем светимость звезды: $L = 2,512^{4,8 - M}$.

Мощность излучения звезд-сверхгигантов ($M = -9^m$) в 330 тыс. раз больше мощности излучения Солнца, а неярких звезд ($M = 19^m$) – в 480 тыс. раз слабее.



Вопросы

1. По каким параметрам и признакам различают звезду?
2. От чего зависит цвет звезды?
3. Какими величинами характеризуются звезды? В чем заключается их физический смысл?
4. Чем видимая звездная величина отличается от абсолютной звездной величины? Какими формулами они выражаются?
5. Что означает светимость звезд? Какими единицами она измеряется?



Задание (теоретическое исследование)

Рассмотрите таблицу, содержащую сведения о ярких звездах.

Таблица 9.1.2

Наименование звезды	Температура, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)
Ригель	11 200	40	138
Вега	10 600	3	3
Кастор	10 400	3	2,5
Процион	6 900	1,5	2
Капелла	5 200	3	2,5
107 Рыб	5 200	0,83	0,8

Используя данные таблиц 9.1.1 и 9.1.2, определите истинные и ложные утверждения из представленных ниже.

- Температура на поверхности Проциона в 2 раза ниже, чем на поверхности Солнца.
- Звезда Вега относится к белым звездам спектрального класса А.

- Так как массы звезд Вега и Капелла одинаковы, то они относятся к одному и тому же спектральному классу.
- Звезды Беллатрикс и Бетельгейзе относятся к одному созвездию, значит, находятся на одинаковом расстоянии от Солнца.
- Звезда Ригель является сверхгигантом.
- Звезды Вега и Кастор относятся к одному спектральному классу А.
- Звезда 107 Рыб не является сверхгигантом, она похожа на Солнце.

§ 9.2

Классификация звезд

1. 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**, которая получила название **диаграммы Герцшпрунга – Рассела**.

На диаграмме Герцшпрунга – Рассела (рис. 9.2.1) каждой звезде соответствует точка.

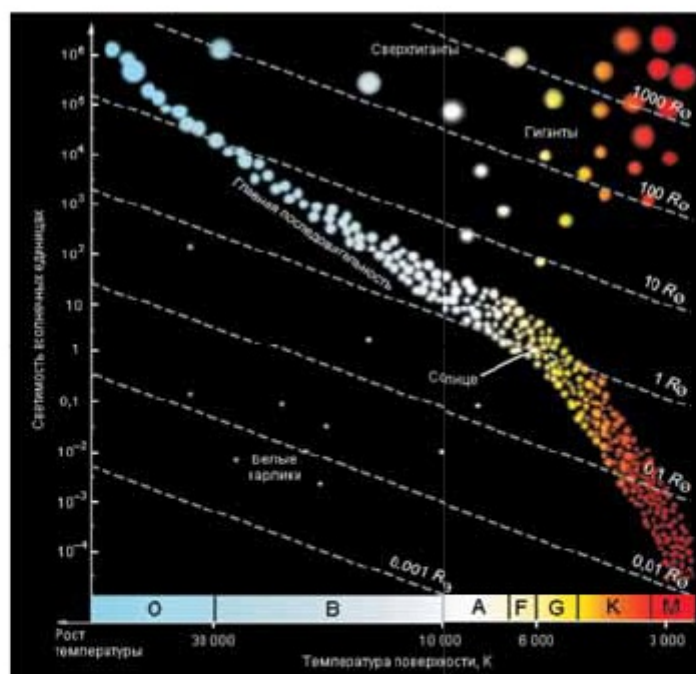


Рис. 9.2.1. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

В результате звезды распределяются не случайным образом, а образуют несколько групп: *главная последовательность, последовательность голубых сверхгигантов, красных карликов, красных гигантов, красных сверхгигантов, белых карликов.*

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 по формуле:*

$$t = 10^{10} \frac{1}{M^2} \text{ (лет)}, \quad (9.3)$$

где M – масса звезды в массах Солнца. Когда в недрах звезды в процессе термоядерной реакции водород заканчивается, звезда переходит в другую группу.

Зная, какой ветке принадлежит звезда и ее спектральный класс, можно определить ее абсолютную величину и другие характеристики.

2. По современным представлениям звезды образуются в результате гравитационного сжатия вещества межзвездной среды. Гигантский комплекс размером около 100 пк 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 рождается звезда и сжатие прекращается.

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. 9.2.2). Масса Солнца недостаточна для того, чтобы его эволюция завершилась взрывом *сверхновой звезды*.

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 равна 120 000 К, в течение многих миллионов и миллиардов лет он будет остывать и угасать.

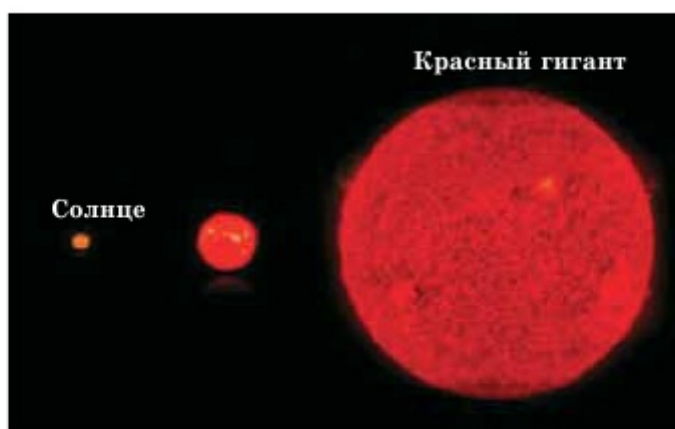


Рис. 9.2.2. Через 4,5–5 млрд лет Солнце станет красным гигантом

Данный жизненный цикл считается типичным для звезд с массой, сравнимой с солнечной.

3. 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 (рис. 9.2.3).

Сильные потоки нейтрино и вращающееся магнитное поле выталкивают большую часть накопленного звездой материала, включая железо. Разлетающаяся материя бомбардируется вылетающими нейтронами, захватывая их и образуя элементы тяжелее железа, включая радиоактивные, вплоть до урана (а возможно, до калифорния). В дальнейшем этот материал сверхновой звезды может участвовать в образовании новых звезд, планет и их спутников.

Светимость *сверхновых звезд* увеличивается в десятки миллионов раз, а затем ослабевает; при их взрыве 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



Рис. 9.2.3. Сверхновая звезда

общее количество превысило 1500. Вспышки сверхновых звезд обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами, способствуют новому звездообразованию.

Процессы, протекающие при образовании сверхновой звезды, до сих пор изучаются, как и то, что остается от изначальной звезды. Рассматриваются и такие финалы эволюции сверхмассивных звезд, заканчивающиеся образованием *нейтронной звезды* и *черной дыры*.

По первой версии, сильная гравитация в недрах сверхгиганта заставляет электроны поглотиться атомным ядром, где они, сливаясь с протонами, образуют нейтроны. Электромагнитные силы, разделяющие ядра, исчезают. Звезда еще сильнее сжимается и представляет собой сверхплотный шар, состоящий из нейтральных 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. 9.2.4). Нейтронная звезда может быть наблюдаема с Земли в разных спектральных диапазонах, включая оптический, на который приходится около 0,003% всей излучаемой звездой энергии.



Рис. 9.2.4. Нейтронная звезда

По второй версии, 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.



Дополнительный материал

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



Вопросы

1. Какова характерная особенность диаграммы Герцшпрунга – Рассела? Какая группа звезд является наиболее многочисленной на диаграмме?
2. Какой период своей жизни звезда проводит на главной последовательности? Какой формулой определяется продолжительность жизни звезд на этой последовательности?
3. В какой части диаграммы располагаются звезды, которые обладают большими, чем у Солнца, температурами и светимостью?
4. Как возникают звезды? Когда образовалось Солнце? Как будет заканчиваться его жизненный цикл?
5. Как проходит жизненный цикл у массивных звезд? Как можно объяснить коллапс (взрыв) сверхновой звезды?
6. Какие еще могут быть финалы жизненного цикла сверхмассивных звезд? Как возникают нейтронные звезды? Что за объект черная дыра?



Задание (практическое исследование)

1. Расположите в порядке возрастания температуры атмосферы звезды спектральных классов F3, G2, K0, A5, B8.
2. В смартфон из приложения Play Market загрузите бесплатную программу «Звездная карта (siragnet)». Направьте свое устройство на небо, на его экране отобразятся имена звезд, созвездий и планет. Изучите, в каком созвездии в настоящий момент находится Солнце, как относительно него расположены планеты. Запишите свои наблюдения в тетрадь.

§ 9.3

Измерение астрономических расстояний

1. В астрономии измерение расстояний до объектов в километрах неудобно, так как даже до ближайших объектов, таких как Луна и Солнце, расстояния обозначаются большими числами. Так, например, среднее расстояние от Земли до Луны составляет 384 400 км, от Земли до Солнца – 150 000 000 км, от Солнца до Урана – 3 000 000 000 км.

Внутри Солнечной системы для измерения расстояний часто используют дру-

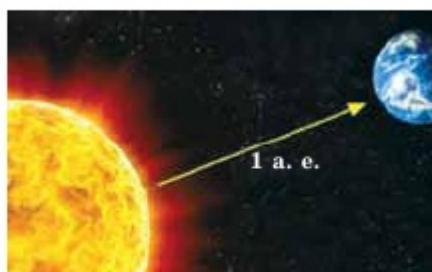


Рис. 9.3.1. Астрономическая единица (1 а. е.)

гую единицу измерения – астрономическую единицу (а. е.).

Одна астрономическая единица равна среднему расстоянию от Земли до Солнца; 1 а. е. $\approx 150 \cdot 10^9$ м (рис. 9.3.1).

Так, до Урана около 20 а. е., то есть в 20 раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Такие сравнительные данные расстояний в астрономической единице и удобны, и рациональны.

2. Прямое измерение расстояний до космических тел на дистанциях в несколько астрономических единиц возможно с помощью **радиолокации**. Это очень точный способ. Однако при его использовании необходимо учитывать движение Земли и исследуемого тела, а также знать скорость света. Посланный радиотелескопом сигнал отражается от поверхности небесного тела и снова принимается на Земле (рис. 9.3.2). Радиолуч проходит двойное расстояние (туда-обратно); зная время, которое затратил сигнал на преодоление пути, можно высчитать само расстояние.

3. Если смотреть на один и тот же предмет с разных мест, то он будет менять свое расположение на фоне более удаленных предметов. Если эти неблизкие предметы далеки настолько, что их видимым перемещением при перемещении наблюдателя можно пренебречь, то из геометрических соображений совсем нетрудно узнать расстояние до близкой звезды.



Рис. 9.3.2. Радиолокация



Рис. 9.3.3. Годичный параллакс – π

Угол π , расположенный напротив катета прямоугольного треугольника астрономического масштаба (рис. 9.3.3), принято называть параллактическим углом.

Угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус a земной орбиты ($a = 1$ а. е.) – перпендикулярный лучу зрения, называется годичным параллаксом π (рис. 9.3.3). Годичный параллакс определяют с точностью до $0,01''$, фотографируя одни и те же участки звездного неба с промежутком в полгода.

Определим расстояние r до звезды:

$r = \frac{a}{\sin \pi}$, где угол π , измеряемый в секундах, является очень малой величиной, например: одна угловая секунда равна $1'' = \frac{1}{206\,265}$.

Для слишком малого угла, как известно из ма-

тематики, $\sin \pi \approx \pi$. С учетом вышеуказанных данных определим расстояние до звезды, параллакс которой равен одной секунде ($\pi = 1''$): $r = \frac{a}{\sin \pi} = \frac{a}{\pi} = \frac{1 \text{ а. е.}}{1''} = 206\,265 \text{ а. е.}$

Это *расстояние, равное $r = 206\,265 \text{ а. е.}$, называют парсеком*. Если годичный параллакс какой-либо звезды составляет π , то расстояние до него составляет:

$$r = \frac{a}{\sin \pi} = \frac{a}{\pi} = \frac{1}{\pi} \text{ парсек.} \quad (9.4)$$

Таким образом, при определении расстояний до звезд нашей Галактики, кроме астрономической единицы, используют также:

1) *парсек (параллакс, секунда) – расстояние, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом $1''$* .

1 пк = 206 265 а. е. = 3,26 св. года = $3,086 \cdot 10^{13}$ км.

2) *световой год – расстояние, которое свет проходит за один год*.

1 св. год = 0,3069 пк = $9,46 \cdot 10^{12}$ км = 63 240 а. е.

4. 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 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 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 составляют порядка $-9,5^m$. При использовании ярчайших звезд, как и при любом другом методе, основанном на небольшом числе экстремальных объектов в галактиках, необходимо учитывать эффекты селекции.

5. Расстояние до ближайшей к Солнечной системе звезды Проксимы Центавра равно 4,24 св. года (автомобиль со скоростью 100 км/ч без остановок пройдет это расстояние за 40 млн лет).

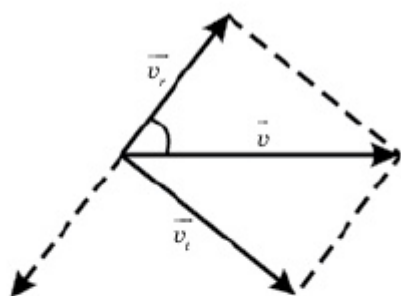


Рис. 9.3.4. Лучевая, тангенциальная и пространственная скорости звезды

Угловые перемещения звезд на небе называют собственными движениями. Зная их и расстояния до звезд, можно определить **тангенциальные скорости** (рис. 9.3.4):

$$v_t = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \text{ км/с},$$

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:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c.$$

Пространственные скорости звезд определяются по формуле:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}. \quad (9.5)$$

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. Какую единицу измерения используют для определения расстояния в Солнечной системе?
2. Какие единицы измерения используют при определении расстояний до звезд нашей Галактики?
3. Какой метод используется для измерения внегалактических расстояний? В чем заключается сущность этого метода?
4. Что называется годичным параллаксом звезды? Какой формулой определяются расстояния до звезд?
5. Можно ли методом радиолокации определить расстояние до звезды? Почему?
6. Как можно определить тангенциальные, лучевые и пространственные скорости звезд?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Годичные параллаксы звезд Гемма (α Северной Короны) и Садра (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 до звезд соответственно равны:

$$r_1 = \frac{1}{\pi_1}; r_2 = \frac{1}{\pi_2}.$$

Абсолютные звездные величины Геммы и Садра соответственно равны:

$$M_1 = m_1 + 5 - 5 \lg r_1; M_2 = m_2 + 5 - 5 \lg r_2.$$

Отношение светимости звезд можно найти по формуле:

$$\frac{L_2}{L_1} = 2,512^{M_1 - M_2}.$$

Произведем вычисления:

$$r_1 = \frac{1}{0,044} = 23 \text{ (пк)}; r_2 = \frac{1}{0,004} = 250 \text{ (пк)}.$$

$$M_1 = 2,23 + 5 - 5 \lg 23 = 0,42; M_2 = 2,23 + 5 - 5 \lg 250 = -4,76.$$

$$\frac{L_2}{L_1} = 2,512^{0,42 - (-4,76)} = 2,512^{5,18} = 118.$$

Ответ: $r_1 = 23$ (пк); $r_2 = 250$ (пк);

$$M_1 = 0,42; M_2 = -4,76; \frac{L_2}{L_1} = 118.$$



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 9.3.1. Параллакс звезды равен $0,01''$, ее видимая звездная величина $+10^m$. Какова ее абсолютная звездная величина? (Ответ: 5^m .)
- 9.3.2. Со звезды Капелла большая полуось земной орбиты, перпендикулярная лучу зрения, видна под углом $0,07''$. Годичный параллакс звезды Процион равен $0,28''$. Какая из этих звезд дальше от нас и во сколько раз? (Ответ: Капелла дальше Проиона в 4 раза.)
- 9.3.3. Параллакс звезды равен $0,5''$. Определите, во сколько раз она дальше от нас, чем Солнце. (Ответ: в $4,1 \cdot 10^5$ раз.)

Уровень В

- 9.3.4. Параллакс Альтаира равен $0,20''$. Расстояние до Веги составляет 29 св. лет. Какая из этих звезд дальше от нас и во сколько раз? (*Ответ: Вега дальше Альтаира почти в 2 раза.*)
- 9.3.5. 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.*)
- 9.3.6. Определите пространственную скорость звезды, если ее лучевая скорость равна 27 км/с, а тангенциальная – 31 км/с. (*Ответ: 41 км/с.*)

§ 9.4**Темная энергия и ускорение расширения Вселенной**

1. На протяжении веков разные космологические модели сменяли друг друга, но считалось абсолютно неизменным, что Вселенная бесконечна во времени и пространстве. Звездное небо над головой являлось символом вечности и неизменности (*рис. 9.4.1*).

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), т.е. быть наблюдаемой. Границей наблюдаемой Вселенной является космологический горизонт, объекты на нем имеют бесконечное красное смещение. Число галактик оценивается более чем в 500 млрд.



Рис. 9.4.1. Наблюдаемое небо – символ вечности

Часть наблюдаемой Вселенной, доступной для изучения современными астрономическими методами, называется Метагалактикой. За пределами Метагалактики располагаются недоступные наблюдению гипотетические внеметагалактические объекты.

В конце XX века по наблюдениям далеких сверхновых звезд было показано, что Вселенная расширяется с ускорением (рис. 9.4.2).

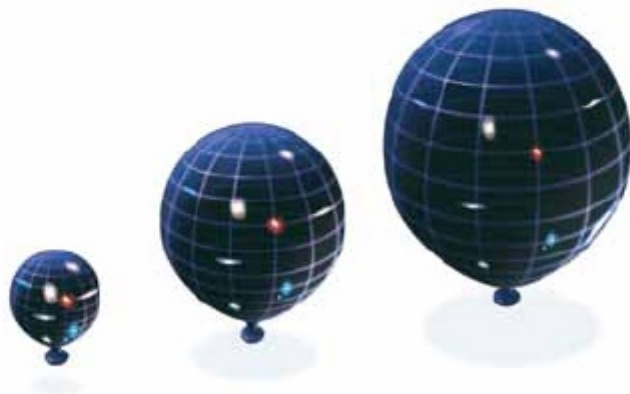


Рис. 9.4.2. Модели ускоренного расширения Вселенной

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, которые затем должны стать галактиками и т.д.

2. Для объяснения ускоренного расширения Вселенной ввели понятие **«темной энергии» («невидимой энергии»)**. Ее свойства оказались весьма необычными – так, например, темная энергия должна обладать отрицательным давлением, чтобы «расталкивать» Вселенную. Установление природы этой загадочной темной энергии – одна из главных задач физики, поскольку, согласно современным представлениям, именно темная энергия определяет развитие нашего мира.

По полученным данным, наблюдаемая Вселенная является плоской. Исходя из этого, согласно модели Фридмана, а также с учетом ее ускоренного расширения была оценена средняя плотность Вселенной. 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. Два других компонента, дающих гораздо больший вклад в плотность, – это **темная материя** (26,8%) и **темная энергия** (68,3%). Вклад релятивистских частиц, т.е. 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 гипотезы объяснения сущности темной энергии. К настоящему времени все известные надежные наблюдательные данные не противоречат первой гипотезе, которая принимается в космологии как стандартная.

Согласно этой гипотезе, темная энергия есть космологическая константа – неизменная энергетическая плотность, равномерно заполняющая пространство Вселенной (другими словами, постулируется ненулевая энергия и давление вакуума).

Окончательный выбор между другими вариантами гипотез требует очень длительных и высокоточных измерений скорости расширения Вселенной, чтобы понять, как эта скорость изменяется со временем. Темпы расширения Вселенной описываются космологическим уравнением состояния. Решение уравнения состояния для темной энергии является одной из самых насущных задач современной наблюдательной космологии.

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. Что означают такие понятия, как Наблюдаемая Вселенная, Метагалактика и Вне-метагалактика?
2. Какие сведения дает процесс расширения Вселенной?
3. В чем заключается смысл понятия «темная материя»?
4. В чем заключается смысл понятия «темная энергия»?
5. Какие варианты гипотез выдвигаются для объяснения сущности темной энергии?

**Задание (экспериментальное исследование)**

Рассмотрите модельный 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?

§ 9.5**Теория Большого Взрыва и красное смещение**

1. В XX веке стали известны два экспериментальных факта, подтверждающих расширение Вселенной: *красное смещение*, *реликтовое излучение*.

В 1922 году советский математик 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*: $v = HR$, (9.6) где H – постоянная Хаббла; R – расстояние до исследуемой галактики.

Этот закон получил название *закона Хаббла*.

Постоянная Хаббла в настоящее время принимается равной $H = 66,93 \pm 0,62$ (км/с)/Мпк. 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.

2. В настоящее время принято считать, что разбегание галактик, связанное с общим расширением окружающей нас части Вселенной, есть результат *Большого Взрыва*.

Наличие *красного смещения* у галактик позволяет с большой точностью определять расстояния до них. Чем сильнее смещены линии в спектре галактик, тем дальше разбегается галактика (рис. 9.5.1). Этот метод определения расстояний до галактик основан на хорошо известном в физике *эффекте Доплера*.

Допустим, имеется какой-либо источник электромагнитных колебаний (например, движущаяся галактика). Если этот источник движется относи-

тельно 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.

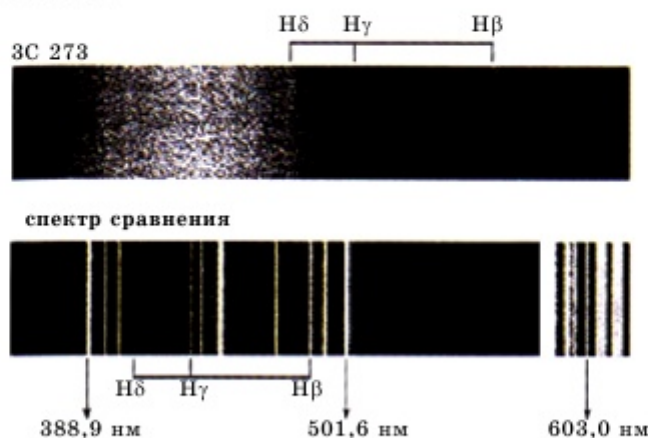


Рис. 9.5.1. Красное смещение спектра

Если пользоваться не частотой, а длиной волны, то в системе координат наблюдателя излучение источника будет описываться формулой:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c},$$

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 источника (т.е. галактики) определяется по закону Хаббла:

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = HR, \quad (9.7)$$

где H – постоянная Хаббла; R – расстояние до галактики. Например, если мы будем знать величину красного смещения $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ для какой-нибудь галактики, то сможем определить расстояние до нее.

Время расширения Хаббла (вероятно, близкое ко времени расширения нашей Вселенной) $t_H = 1/H = 14$ млрд лет, а расстояние Хаббла (условный размер Вселенной) $R = c/H = 4\,300$ Мпк.

В настоящее время красные смещения измерены у сотен тысяч галактик. Самые далекие из них находятся на расстоянии 12 млрд световых лет.

Экспериментально 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).

3. Вселенная расширяется из начального сверхплотного и сверхгорячего состояния – так называемый **Большой Взрыв**.

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 вещества.

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. 9.5.2). Согласно известным ограничениям по применимости современных физических теорий, наиболее ранним моментом Вселенной, допускающим описание, считается момент **Планковской эпохи** с температурой примерно 10^{32} К и плотностью около 10^{93} г/см³. Ранняя Вселенная представляла собой высокооднородную и изотропную среду с необычайно высокой плотностью энергии, температурой и давлением. В результате расширения и охлаждения во Вселенной произошли фазовые переходы, аналогичные конденсации жидкости из газа, но применительно к элементарным частицам.

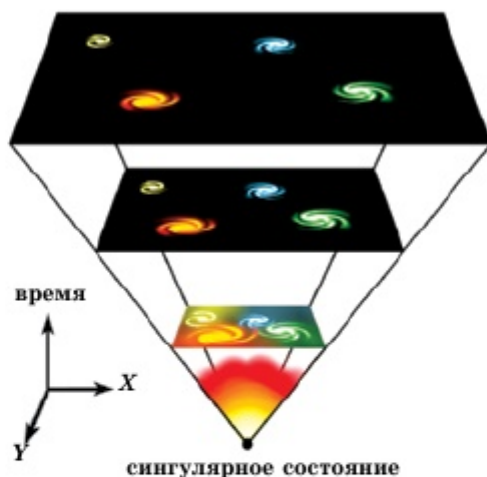


Рис. 9.5.2. Расширение Вселенной после Большого Взрыва

Необходимо отметить, что на всех стадиях **Большого Взрыва** выполняется так называемый **космологический принцип** – Вселенная в любой данный момент

времени выглядит одинаково для наблюдателя в любой точке пространства. В частности, в любой данный момент во всех точках пространства плотность материи в среднем одинакова. Большой Взрыв не похож на взрыв динамитной шашки в пустом пространстве, когда вещество начинает расширяться из небольшого объема в окружающую пустоту, образуя сферическое газовое облако с четким фронтом расширения, за пределами которого вакуум. Такое популярное представление ошибочно. На самом деле Большой Взрыв происходил во всех точках пространства одновременно и синхронно, нельзя указать на какую-либо точку как на центр взрыва; в пространстве нет крупномасштабных градиентов давления и плотности и нет никаких границ или фронтов, отделяющих расширяющееся вещество от пустоты. Большой Взрыв следует представлять как расширение самого пространства вместе с содержащейся в нем материей.

4. 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 Г. А. Гамовым. Наиболее существенное наблюдательное предсказание, вытекающее из модели горячей Вселенной, – наличие *реликтового излучения* со спектром, очень близким к спектру абсолютно черного тела, возникшего в момент рекомбинации ионов (в основном водорода и гелия) и электронов в нейтральные атомы в процессе эволюции Вселенной после Большого Взрыва.

Возникновение крупномасштабной структуры Вселенной в рамках модели происходит вследствие роста начальных неоднородностей из-за гравитационной неустойчивости. Основной проблемой модели горячей Вселенной в этом аспекте является начальный спектр неоднородностей, который в ней не объясняется, а постулируется либо берется из измерений.

Происхождение элементарных частиц в модели горячей Вселенной с конца 1970-х годов описывают с помощью спонтанного нарушения симметрии. Многие недостатки модели горячей Вселенной были решены в 1980-х годах в результате построения инфляционной модели Вселенной.

Также важно отметить независимость данной теории от наличия или отсутствия Большого Взрыва. В то же время после открытия и измерения анизотропии реликтового излучения модель горячей Вселенной считается настолько хорошо подтвержденной наблюдениями, что произошло смешение понятий, и часто, когда говорят о *Большом Взрыве*, на самом деле имеют в виду именно модель *горячей Вселенной*.

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, а 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 сквозь 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.

5. С давних пор людей интересовало наличие жизни вне Земли. Исследования с помощью космической техники показали следующее:

- Меркурий лишен атмосферы и воды, температура -170° – $+430^{\circ}$. 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 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 планет. Так, приемники аппарата «Галилео» зафиксировали сигналы наших радио- и 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.



Вопросы

1. Какие экспериментальные данные подтверждают расширение Вселенной? Чем объясняется красное смещение в спектрах галактик?
2. Как определяется скорость удаления галактики согласно закону Хаббла и красному смещению?
3. Как характеризуется эволюция Вселенной через понятие «Большой Взрыв»?
4. Какая модель называется моделью горячей Вселенной? Какая важная гипотеза вытекает из этой модели?
5. Что такое реликтовое излучение? Как и когда оно возникло? Кто предсказал о возможности существования реликтового излучения? Кто экспериментально обнаружил?
6. Поясните, почему невозможно жить на Меркурии, Венере, Луне, Марсе. Что такое экзопланеты?



Работа в группах

Каждой группе необходимо нарисовать схематически диаграмму Эйлера – Венна по взаимосвязи астрономии с другими науками. При защите построенной диаграммы необходимо привести хотя бы один пример взаимосвязи. Побеждает группа, представившая и обосновавшая наибольшее количество пересечений.



Задание (экспериментальное исследование)

Покажите движение спиральной галактики. Наполните высокую прозрачную 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 («звезд»), образовавшихся в центре спиральную структуру.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. На каком расстоянии от нас находится галактика, если скорость ее удаления составляет $2 \cdot 10^4$ км/с?

Дано:

$$H = 66,9 \text{ (км/с)/Мпк}$$

$$v = 2 \cdot 10^4 \text{ км/с}$$

$$R = ?$$

Решение:

Используя закон Хаббла $v = HR$, находим расстояние:

$$R = \frac{v}{H}.$$

Произведем вычисления:

$$R = \frac{2 \cdot 10^4}{66,9} = 299 \text{ (Мпк)}.$$

Ответ: $R = 299$ (Мпк).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 9.5.1. Какова скорость удаления галактики, находящейся от нас на расстоянии $3 \cdot 10^8$ пк? (Ответ: $2 \cdot 10^4$ км/с.)
- 9.5.2. Можно ли увидеть на небе невооруженным глазом Туманность Андромеды, если расстояние до нее составляет $5 \cdot 10^5$ пк, а линейный диаметр – $3,5 \cdot 10^4$ пк? Разрешающая способность глаза составляет $2'$. (Ответ: можно.)

Уровень В

- 9.5.3. 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.)
- 9.5.4. Определите расстояние до галактики, если красное смещение в ее спектре соответствует скорости 10^4 км/с. (Ответ: 149 Мпк.)
- 9.5.5. Каков линейный диаметр Галактики, если она видна под углом 1° , а расстояние до нее составляет $2,4 \cdot 10^5$ пк? (Ответ: $4,2 \cdot 10^3$ пк.)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 9

- **Звезда** – это массивное шарообразное плазменное образование, излучающее свет и тепло в результате протекания термоядерных реакций синтеза в его недрах.
- **Астрономическая единица** – среднее расстояние от Земли до Солнца; $1 \text{ а. е.} \approx 150 \cdot 10^9 \text{ м.}$
- **Годичный параллакс** π – угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты a ($a = 1 \text{ а. е.}$), перпендикулярный лучу зрения.
- **Парсек** – расстояние, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом $1''$, $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,26 \text{ св. года} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км.}$
- **Световой год** – расстояние, которое свет проходит за один год, $1 \text{ св. год} = 0,3069 \text{ пк} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. е.}$
- **Метагалактика** – часть наблюдаемой Вселенной, доступной для изучения современными астрономическими методами.
- **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.
- **Большой Взрыв** – общепринятая космологическая модель, описывающая раннее развитие Вселенной, а именно начало расширения Вселенной, перед которым Вселенная находилась в сингулярном состоянии.
- **Реликтовое излучение** (*микроволновое фоновое излучение*) – космическое электромагнитное излучение с высокой степенью изотропности и со спектром, характерным для абсолютно черного тела с температурой около 3 К.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Фундаментальные физические постоянные

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Элементарный электрический заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Вина	$b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Радиус Бора	$r_B = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 1,66053906660(50) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Десятичные приставки к названиям единиц

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
пета	П	10^{15}	деци	д	10^{-1}
тера	Т	10^{12}	санци	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}

ПРИЛОЖЕНИЕ

Массы некоторых изотопов (а. е. м.)

Изотоп	Масса нейтрального атома	Изотоп	Масса нейтрального атома
${}^1_1\text{H}$ (водород)	1,00783	${}^{10}_5\text{B}$ (бор)	10,01294
${}^2_1\text{H}$ (дейтерий)	2,01410	${}^{11}_5\text{B}$ (бор)	11,00931
${}^3_1\text{H}$ (тритий)	3,01605	${}^{12}_6\text{C}$ (углерод)	12,00000
${}^3_2\text{He}$ (гелий)	3,01602	${}^{14}_7\text{N}$ (азот)	14,00307
${}^4_2\text{He}$ (гелий)	4,00260	${}^{15}_7\text{N}$ (азот)	15,00011
${}^6_3\text{Li}$ (литий)	6,01513	${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)	15,99491
${}^7_3\text{Li}$ (литий)	7,01601	${}^{17}_8\text{O}$ (кислород)	16,99913
${}^8_4\text{Be}$ (бериллий)	8,00531	${}^{27}_{13}\text{Al}$ (алюминий)	26,98146
${}^{234}_{92}\text{U}$ (уран)	234,0409521	${}^{237}_{92}\text{U}$ (уран)	237,0487302
${}^{235}_{92}\text{U}$ (уран)	235,0439299	${}^{238}_{92}\text{U}$ (уран)	238,0507882
${}^{236}_{92}\text{U}$ (уран)	236,0455680(20)	${}^{239}_{92}\text{U}$ (уран)	239,0542933

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

Масса покоя элементарных частиц

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 ПЕРЬЕДЫ	ГРУППЫ																	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	А	В	А	VIII	В	А	В	А	В	А	В
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

*Лантаноиды (См.таблицу)

**Актиниоиды (См.таблицу)

Абсолютная звездная величина (M) – видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк $M = m + 5 - 5 \lg r$, где m – видимая звездная величина; r – расстояние до звезды в парсеках (пк).

Активная мощность $P = IU \cos \varphi$ характеризует необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую и т.д.

Активное сопротивление R – физическая величина, определяемая отношением среднего значения мощности P переменного тока, поглощаемой на участке электрической цепи, к квадрату действующего значения силы электрического тока I на этом участке: $R = \frac{P}{I^2}$.

Астрономическая единица – среднее расстояние от Земли до Солнца, равное $150 \cdot 10^9$ м.

Атомно-силовой микроскоп – микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины ван-дер-ваальсовой силы взаимодействий между атомами образца и зонда.

Атомная электростанция (АЭС) – предприятие, где в электроэнергию преобразуется тепловая энергия, полученная при цепной ядерной реакции радиоактивных элементов в реакторе.

Большой Взрыв – общепринятая космологическая модель, описывающая раннее развитие Вселенной, а именно начало расширения Вселенной, перед которым Вселенная находилась в сингулярном состоянии.

Вакуумный фотоэлемент – откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом.

Вибратор Герца – простое устройство для получения электромагнитных волн, представляет собой открытый колебательный контур.

Видимая звездная величина (m) – характеристика звезды, показывающая, сколько света приходит от нее в точку, где находится наблюдатель.

Возобновляемые ресурсы – некоторые виды ресурсов, относительно быстро восстанавливающиеся в природе, например: дрова, камыш, торф и прочие виды биотоплива, гидропотенциал рек.

Волновое сопротивление электрического колебательного контура – физическая величина $\sqrt{\frac{L}{C}}$, обозначается буквой ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Вторичные энергоносители – это продукты первичной переработки, например: бензин, мазут, ядерное топливо.

Вынужденные электромагнитные колебания – это периодические изменения силы тока и других электрических величин в цепи под действием переменной электродвижущей силы от внешнего источника.

Гальванический элемент – химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов или их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока.

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.

Гармонические колебания – периодические изменения физической величины от времени по закону синуса или косинуса: $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ или $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Генератор переменного тока – устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую на основе явления электромагнитной индукции.

Генератор тока – устройство, преобразующее энергию того или иного вида в электрическую.

Гидроэлектростанция (ГЭС) – предприятие, где в электроэнергию преобразуется механическая энергия потока воды с помощью гидравлических турбин, вращающих электрогенераторы.

Годичный параллакс (π) – угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты a ($a = 1$ а. е.), перпендикулярный лучу зрения.

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

Графен – монослой атомов углерода.

Действующее значение переменного напряжения в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Действующее значение силы переменного электрического тока – величина, которая в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Детектирование – процесс, при котором в приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания.

Дисперсия света – это явление разложения света в спектр, обусловленное зависимостью абсолютного показателя преломления среды от частоты (длины) световой волны.

Дифракционная решетка – совокупность большого числа узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками.

Дифракция света – огибание световыми волнами препятствий и захождение в область геометрической тени.

Добротность электрического колебательного контура – отношение $Q = \frac{\rho}{R}$, обозначается буквой Q .

Естественный свет – световой поток, в котором колебания происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн.

Закон отражения света: падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (плоскость падения). Угол отражения γ равен углу падения α .

Закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Закон преломления света: падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для двух данных сред.

Закон Хаббла: скорости удаления галактик возрастают пропорционально расстоянию до них:

$$v = HR.$$

Постоянная Хаббла в настоящее время принимается равной

$$H = 66,93 \pm 0,62 \text{ (км/с)/Мпк.}$$

Законы 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.

Звезда – это массивное шарообразное плазменное образование, излучающее свет и тепло в результате протекания термоядерного синтеза в его недрах.

Зондовая микроскопия – это совокупность методов определения с помощью различных наноразмерных микрозондов механических, электрических, магнитных и других свойств на локальном участке исследуемой поверхности.

Излучение – это процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц.

Изотопы – ядра с одинаковыми Z , но разными A (т.е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$).

Индуктор – устройство, создающее магнитное поле. Это может быть либо постоянный магнит, либо электромагнит в генераторе.

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

Интерференция волн – явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух волн с одинаковыми частотами.

Интерференция света – пространственное перераспределение светового потока при наложении двух или более когерентных световых волн, в результате которого в одних местах возникают максимумы интенсивности результирующей волны, а в других – минимумы.

Инфракрасное излучение – электромагнитное излучение в диапазоне от $3 \cdot 10^{11}$ до $3,75 \cdot 10^{14}$ Гц (800 нм – 1 мм).

Когерентность световых волн – волны должны иметь одинаковую частоту (длину волны) и постоянную во времени разность фаз.

Колебания – движения или процессы, которые характеризуются точным или приближительным повторением движения через одинаковые промежутки времени, при котором система, многократно выходя из состояния устойчивого равновесия в разные стороны, возвращается в то же первоначальное устойчивое равновесие.

Колебательный контур – это цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C .

Кольца Ньютона – интерференционная картина в виде концентрических колец, возникающая в прослойке воздуха между плоской стеклянной пластиной и плоско-выпуклой линзой с большим радиусом кривизны.

Кольца со щетками – устройство, которым снимают с вращающихся частей индукционный ток или подают ток питания электромагнитам.

Корпускулярно-волновой дуализм – теория, на основе которой свет рассматривается как поток частиц при рассмотрении законов теплового излучения, которые проявляются при взаимодействии с веществом; как волна при явлениях интерференции и дифракции, проявляющиеся при распространении света.

Космологическая сингулярность – состояние Вселенной в начальный момент Большого Взрыва, характеризующееся бесконечной плотностью и температурой вещества.

Коэффициент трансформации k – отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной. В зависимости от того, какое значение принимает коэффициент трансформации, различают повышающий ($k < 1$) и понижающий ($k > 1$) трансформатор.

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.

Линейчатые спектры излучения – набор цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не в молекулярном) состоянии.

Луна – собирающая линза с малым фокусным расстоянием ($F \approx 10$ см).

Математический маятник – материальная точка, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити. Это идеальная модель. В реальности можно эту модель заменить телом небольших размеров, подвешенным на тонкой нерастяжимой невесомой нити длиной l .

Метагалактика – часть наблюдаемой Вселенной, доступной для изучения современными астрономическими методами.

Механические колебания – движения тел, повторяющиеся точно (или приблизительно) через одинаковые промежутки времени, при котором система,

многократно выходя из состояния устойчивого равновесия в разные стороны, возвращается в то же первоначальное устойчивое равновесие. Закон движения тела, совершающего колебания, задается с помощью некоторой периодической функции времени: $x = f(t)$.

Микролитография – наиболее распространенный в электронике метод нанотехнологии.

Микроскоп – это оптический прибор, показывающий в увеличенном виде очень мелкие, не видимые глазу, близко расположенные предметы.

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.

Модуляция – медленное по сравнению с периодом колебаний изменение амплитуды или частоты волны по определенной закономерности.

Наноматериалы – различные предметы, состоящие из наночастиц и наноэлементов (кристаллитов, зёрен).

Наноробот – это 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.

Нанотрубка – протяженная цилиндрическая структура, состоящая из одного или нескольких свернутых в трубку графенов.

Наночастица – схожая с молекулой частица, размеры которой измеряются нанометрами.

Нелинейная оптика – важнейший раздел оптики, охватывающий исследования распространения мощных световых пучков в твердых телах, жидкостях и газах, а также их взаимодействие с веществом.

Непрерывные (сплошные) спектры – сплошная разноцветная полоса 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.

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

Нуклон – единое название протона и нейтрона – частиц, из которых состоит все атомное ядро.

Оптический прибор – устройство, в котором пучки световых лучей преобразуются по законам геометрической оптики, для получения увеличенных изображений, не видимых невооруженным глазом, микрообъектов или деталей структуры макрообъектов, а также для увеличения видимых угловых размеров как близких предметов, так и далеких небесных светил.

Парсек – расстояние, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом $1''$, $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,26 \text{ св. года} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$.

Первичный энергоноситель – это сырьевой материал в его естественной форме до проведения какой-либо технологической обработки, например: каменный

уголь, нефть, природный газ и урановая руда, солнечное излучение, ветер, водные ресурсы.

Переменный электрический ток – вынужденные электрические колебания, происходящие в электрической цепи под действием периодически изменяющейся по закону синуса или косинуса внешней ЭДС.

Период дифракционной решетки (или постоянная решетки) – величина, равная $d = a + b$, где a – ширина щели; b – ширина непрозрачных промежутков.

Период переменного тока – промежуток времени, в течение которого ЭДС (или напряжение, или сила тока) совершает одно полное колебание.

Период полураспада – время, в течение которого распадается половина первоначального числа атомов.

Полосатые спектры – отдельные полосы, разделенные темными промежутками. Полосатые спектры дают газы, молекулы которых слабо связаны друг с другом.

Плотность потока излучения равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения.

Плотность потока электромагнитного излучения I – отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S , к произведению площади S на время Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

Поглощенная доза излучения – отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества: $D = \frac{E}{m}$.

Полная энергия W электромагнитного поля контура равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}.$$

Полное внутреннее отражение света – явление, при котором свет полностью возвращается в более плотную среду.

Поляризация света – физическая характеристика излучения, описывающая поперечную анизотропию световых волн.

Пружинный маятник – груз массой m , прикрепленный к пружине жесткостью k , второй конец которой закреплен неподвижно.

Радиоактивность – самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц.

Радиолокация – обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн.

Радиоприемник – колебательный контур, связанный с антенной, присоединенной к контуру цепи, состоящей из детектора, конденсатора и телефона.

Радиосвязь – передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Радиотелефонная связь – передача речи или музыки с помощью электромагнитных волн.

Расширение Вселенной – 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, которые затем должны стать галактиками, и так далее.

Резонансная частота – частота, при которой амплитуда колебаний силы тока достигает максимального значения.

Реликтовое излучение (*микроволновое фоновое излучение*) – космическое электромагнитное излучение с высокой степенью изотропности и со спектром, характерным для абсолютно черного тела с температурой около 3 К.

Рентгеновское излучение – электромагнитные волны с длиной волны меньше, чем у ультрафиолетового излучения, в пределах $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-12} - 6 \cdot 10^{-9}$ м.

Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (тормозное излучение) либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов или молекул.

Репликатор – наноробот, способный к созданию своей копии, то есть к самовоспроизводству.

Ротор – вращающаяся часть генератора, аналогична рамке с током.

Светимость звезд (L) – полная световая энергия, излучаемая звездой за одну секунду.

Световод (**оптическое волокно**) – стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

Световой год – расстояние, которое свет проходит за один год, $1 \text{ св. год} = 0,3069 \text{ пк} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63 \text{ 240 а. е.}$

Свободные колебания – колебания, возникающие в системе за счет расходования сообщенной этой системе энергии, которая в дальнейшем не пополняется.

Связь – важнейшее звено в системе хозяйства страны, способ общения людей, удовлетворения их производственных, духовных, культурных и социальных потребностей.

Сканирующий туннельный микроскоп – микроскоп для исследования нанообъектов, принцип работы которого основан на регистрации величины электронного тока между атомами зонда и токопроводящего образца.

Солнечная батарея – объединение фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) – полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток, в отличие от солнечных коллекторов, производящих нагрев материала-теплоносителя.

Спектральная плотность излучения – интенсивность, приходящаяся на единичный интервал частот.

Спектральный анализ – метод определения химического состава вещества по его спектру.

Спектр – кривая зависимости спектральной плотности излучения от длины волны или частоты.

Спектр поглощения – пропускание белого света через холодный неизлучающий газ в непрерывном спектре дает появление темных линий, которые соответствуют поглощению.

Статор – неподвижное устройство, создающее магнитное поле.

Телескоп (зрительная труба) – это оптический прибор, предназначенный для наблюдения удаленных объектов.

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.

Тепловая электростанция (ТЭС) – предприятие, где тепловая энергия, образующаяся при сжигании органического топлива (уголь, газ, мазут, торф, сланцы и т.д.), используется для вращения турбин, приводящих в движение электрогенератор.

Термобатарея преобразует тепловую энергию в электрическую. В термобатареях используется несколько термопар, подключенных последовательно или параллельно.

Трансформатор – устройство, служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.

Угловое увеличение – отношение угла зрения φ при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения ψ при наблюдении невооруженным глазом: $\gamma = \frac{\varphi}{\psi}$.

Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон.

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли.

Ультрафиолетовое излучение – электромагнитное излучение в диапазоне от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ (10 нм – 375 нм).

Фуллерен – стабильная молекула сферической формы, состоящая из 60 атомов углерода.

Фотоэффект – явление вырывания электронов из вещества под действием света.

Цепная реакция деления – ядерная реакция, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции.

Частота переменного тока – число колебаний переменного тока за одну секунду.

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.

Электрический резонанс – явление возрастания амплитуды колебаний силы электрического тока при некотором значении частоты $\nu_{рез}$ до максимального значения.

Электромагнитная волна – волна, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

Электромагнитное поле – особая форма материи, которая взаимодействует с заряженными частицами.

Электромагнитные колебания – периодические изменения со временем электрических и магнитных величин в электрической цепи.

Электронный осциллограф – прибор для наблюдения и исследования колебаний, происходящих с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний.

Электростатическая машина преобразует механическую энергию, используя явление электростатической индукции, при этом на полюсах машины (лейденских банках) накапливаются электрические заряды, разность потенциалов на разрядниках достигает нескольких сотен тысяч вольт.

Электроэнергетика – базовая инфраструктурная отрасль, снабжающая электричеством и теплом все остальные секторы хозяйства.

Энергетический выход ядерной реакции – разница энергии покоя ядер и частиц до реакции и после реакции.

Ядерный реактор – устройство, в котором осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления.

Ядерная реакция – превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Якорь – обмотка в генераторе, в которой индуцируется ЭДС.

α -распад – ядро теряет положительный заряд $2e$ и его масса уменьшается на четыре атомные единицы массы. В результате элемент смещается примерно на две клетки к началу периодической системы. ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$.

β -распад – ядро увеличивает свой заряд на единицу, но его масса остается неизменной. В результате элемент смещается на одну клетку к концу периодической системы. ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \bar{\nu}$.

γ -излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады. Оно испускается дочерним ядром.

1. Акылбеков А., Ермакова Ж., Даулетбекова А. Физика. – Астана: Фолиант, 2015. – 440 б.
2. Астрономия. История, теории и практики. Большая научная энциклопедия. Издательство 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 – Москва: Эксмо, 2019. – 352 с.
6. Гампсон В., Шеффер К. Парадоксы природы. Книга в помощь юношеству для объяснения явлений, по-видимому, противоречащих повседневному опыту. – Либроком, 2017. – 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. – Издательство: Манн, Иванов и Фербер, 2017 – 352 с.
9. Голин Г. М., Филонович С. Р. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. – М.: Высш. шк., 1989. – 576 с.: ил.
10. Квантовая Вселенная. Как устроено то, что мы не можем увидеть. Брайан Кокс и Джефф Форшоу. – Издательство: Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 288 с.
11. 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.
12. Гольдфарб Н. И. Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Высшая школа, 1973. – 352 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 М. С. Цедрика. – М.: Просвещение, 1989. – 271 с.
18. Сборник задач и вопросов по физике/Под общей редакцией Л. С. Жданова. – 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. 10 кл. Учебник – Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Сотский Н. Н. – 2008. – 368 с.djvu (9.8 Мб).

22. Физика. 10 класс. Учебник. Касьянов В. А. (2000, 416 с.).djvu (8.1 Мб).
23. Физика. 11 кл. Учебник. – Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Чаругин В. М. – 2010. – 399 с. pdf (19.1 Мб).
24. Физика. Механика. 10 кл. Проф. уровень. – под ред. Мякишева Г. Я. – 2010. – 496 с.pdf (5.8 Мб).
25. Физика. Часть 2. Энциклопедия для детей. М. Аксенова. – Издательство: Аванта+, 2007.
26. Физика будущего. Митио Каку. – Издательство: Альпина нон-фикшн, 2018. – 584 с.
27. Agrawal P., Kitajima N., Reece M., Sekiguchi T., Takahashi F. Relic abundance of dark photon dark matter // Physics Letter B. – 2020. – Vol. 801. – 135136.
28. Arzumanov A., Batischev V., Berdinova N., Borissenko A., Chumikov G., Gorodisskaya N., Knyazev A., Koptev V., Lyssukhin S., Popov Y., Sychikov G., Zheltov, D Radioisotope production at the Kazakhstan cyclotron //Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2003. – Vol. 257. – P. 215-218.
29. Zhurinov M.Z., Kassymbekov Z.K., Kassymbekov G.Z. Mastering and development hydropower in Kazakhstan // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan – Series of Geology and Technical Sciences. – 2019. – Vol. 3. – P. 219-224.
30. Klinovitskaya I., Plotnikov S., Kalygulov D., Lay P. The investigation of the properties of solar cells based on Kazakhstan silicon // Bulletin of the University of Karaganda – Physics. – 2019. – Vol. 3 (95). – P. 34-42.
31. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science. – 2004. Oct. 22; 306(5696):666-9.

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).
9. <http://www.inp.kz/> (Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан).
10. <https://aphi.kz/ru/> (Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ.....	4
§ 1.1. Уравнения и графики гармонических колебаний	6
§ 1.2. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания	12
§ 1.3. Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями... ..	17
Краткие выводы главы 1	20
ГЛАВА 2. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК	22
§ 2.1. Генератор переменного тока.....	24
§ 2.2. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток.....	26
§ 2.3. Резонанс в цепи переменного тока	30
§ 2.4. Производство, передача и использование электрической энергии.	
Трансформатор	35
Лабораторная работа № 1. Определение числа витков в обмотках трансформатора	41
§ 2.5. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и мире	43
Краткие выводы главы 2	48
ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	50
§ 3.1. Излучение и прием электромагнитных волн	52
§3.2. Свойства электромагнитных волн	57
§ 3.3. Радиосвязь. Детекторный радиоприемник	61
§ 3.4. Аналого-цифровые преобразователи. Каналы связи	70
§ 3.5. Развитие средств связи	72
Краткие выводы главы 3	77
ГЛАВА 4. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	78
§ 4.1. Интерференция света. Дифракция света	80
§ 4.2. Дифракционные решетки	86
Лабораторная работа № 2. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки	90
§ 4.3. Поляризация света	91
Лабораторная работа № 3. Наблюдение поляризации света	94
Краткие выводы главы 4	95
ГЛАВА 5. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА.....	96
§ 5.1. Законы геометрической оптики.....	98
§ 5.2. Оптические приборы	104
Краткие выводы главы 5	110

ГЛАВА 6. АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	112
§ 6.1. Единство корпускулярно-волновой природы света.....	114
§ 6.2. Спектральный анализ.....	118
§ 6.3. Шкала электромагнитных волн	121
§ 6.4. Фотоэффект и его использование	126
§ 6.5. Химическое действие света	131
§ 6.6. Рентгеновское излучение.....	133
§ 6.7. Лазеры	136
Краткие выводы главы 6	141
ГЛАВА 7. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА	142
§ 7.1. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада.....	144
Лабораторная работа № 4. Определение периода полураспада.....	151
§ 7.2. Ядерные реакции. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции. Термоядерные реакции.....	152
§ 7.3. Биологическое действие радиоактивных излучений. Защита от радиации	159
§ 7.4. Ядерный реактор. Ядерная энергетика	164
Краткие выводы главы 7	168
ГЛАВА 8. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ.....	170
§ 8.1. Нанотехнология и ее основные достижения	172
§ 8.2. Способы получения наноматериалов и перспективы их развития	176
Краткие выводы главы 8	181
ГЛАВА 9. КОСМОЛОГИЯ.....	182
§ 9.1. Мир звезд. Звездные величины	184
§ 9.2. Классификация звезд.....	187
§ 9.3. Измерения астрономических расстояний.....	191
§ 9.4. Темная энергия и ускорение расширения Вселенной.	196
§ 9.5. Теория Большого Взрыва и красное смещение	199
Краткие выводы главы 9	206
Приложение	207
Глоссарий	210
Список использованной литературы	219

У ч е б н о е и з д а н и е

**Башарулы Рахметолла
Шункеев Куанышбек Шункеевич
Мясникова Людмила Николаевна
Жантурина Нургул Нигметовна
Бармина Александра Александровна
Аймаганбетова Зухра Курачиевна**

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса
общественно-гуманитарного направления
общеобразовательной школы

Зав. редакцией *Н. Жиенгалиев*
Редактор *Г. Хасенова*
Художественные редакторы *А. Лукманов, Д. Сабитаева*
Технический редактор *О. Рысалиева*
Слайды *А. Устиненко и др.*
Компьютерная верстка *А. Чагимкуловой*

ИБ № 034

Сдано в набор 25.03.2019. Подписано в печать 26.06.2020. Формат 70×90 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура «Школьная». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 16,38. Уч.-изд. л. 12,93. Тираж 1000 экз. Заказ № 5180.

ТОО «Корпорация «Атамұра», 050000, г. Алматы, пр. Абылай хана, 75.

Полиграфкомбинат ТОО «Корпорация «Атамұра», Республика Казахстан, 050002,
г. Алматы, ул. М. Макатаева, 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

page209
page210
page211
page212
page213
page214
page215
page216
page217
page218
page219
page220
page221
page222
page223
page224