

В. В. Жилко  
Л. Г. Маркович

# Физика

# 11



В. В. Жилко Л. Г. Маркович

# Физика

Учебное пособие для 11 класса  
учреждений общего среднего образования  
с русским языком обучения

*Допущено  
Министерством образования  
Республики Беларусь*

2-е издание, пересмотренное и дополненное

Минск «Народная асвета» 2014  
Правообладатель Народная асвета

УДК 53(075.3=161.1)  
ББК 22.3я721  
Ж72

Рецензент

кафедра физики и технических дисциплин физико-математического факультета  
учреждения образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова»  
(кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой *В. М. Кротов*)

**Жилко, В. В.**

Ж72 Физика : учеб. пособие для 11-го кл. учреждений общ. сред.  
образования с рус. яз. обучения / В. В. Жилко, Л. Г. Маркович. —  
2-е изд., пересмотр. и доп. — Минск : Народная асвета, 2014. —  
287 с. : ил.

ISBN 978-985-03-2170-1.

Предыдущее издание вышло в 2009 г.

УДК 53(075.3=161.1)  
ББК 22.3я721

ISBN 978-985-03-2170-1

© Жилко В. В., Маркович Л. Г., 2009  
© Жилко В. В., Маркович Л. Г., 2014,  
с изменениями  
© Оформление. УП «Народная асвета»,  
2014

Правообладатель Народная асвета


## ОТ АВТОРОВ


Дорогие старшекласники! Настал последний, выпускной год, который подведет итоги многолетней работы. Нет необходимости объяснять, как важно в этом классе напряженно трудиться, чтобы сделать все возможное для успешного завершения обучения в средней школе.

В 11-м классе вы будете изучать физику колебаний и волновых процессов, а также оптику. Вам предстоит познакомиться с интересными явлениями и законами квантовой физики, физики микромира (атома, ядра, элементарных частиц), основами специальной теории относительности, которая в свое время «перевернула мир».

Ознакомление с современной физической картиной мира позволит вам собрать воедино весь изученный материал и взглянуть по-новому на окружающий мир и его дальнейшую эволюцию в обозримом будущем.

Материал данного учебного пособия представлен восьмью главами, поделенными на параграфы.

В учебном пособии имеется рубрика «Повторение», отмеченная знаком , позволяющая перед началом изучения новой темы кратко повторить ранее изученный вами материал.


В каждом из параграфов для концентрации внимания определения и формулировки законов выделены жирным шрифтом, а формулы для запоминания помещены в рамки. Контрольные вопросы к параграфу отмечены знаком , ниже следуют примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения. Для усвоения материала вам следует не только выучить теорию, но и самостоятельно выполнить задания, приведенные в упражнениях.

В конце каждой главы приведен наиболее важный материал для усвоения теоретических знаний и формирования практических умений.

Правообладатель Народная асвета



В Приложении к учебному пособию даны инструкции к лабораторным работам. В конце книги приводятся ответы к упражнениям и предметно-именной указатель.

В рубрике «Это интересно», отмеченной знаком , предлагаются интересные физические факты и явления, а также дополнительные сведения, связанные с излагаемым материалом. Эти сведения могут быть полезны при написании рефератов, подготовке докладов для школьной конференции и т. д.

Тщательно выполняйте задания и рекомендации учителя, настойчиво занимайтесь самостоятельно. Чудес не бывает — только упорный труд в классе и дома приведет вас к успеху при изучении физики.

Желаем успехов!

*Авторы*

# Глава 1

## Механические колебания и волны

Если Вы посмотрите историю физики, то увидите, что главные открытия, по существу, были колебательные.

*Л. И. Мандельштам*

А круговое движение первее прямолинейного: оно проще и более совершенно.

*Аристотель*

### § 1. Колебательное движение. Гармонические колебания. Амплитуда, период, частота, фаза колебаний. Уравнение гармонических колебаний



При движении материальной точки (МТ) по окружности радиусом  $R$  с постоянной угловой скоростью  $\omega$  угол поворота  $\varphi$  радиус-вектора МТ изменяется со временем по закону  $\varphi = \omega t$ . Центробежное (нормальное) ускорение МТ направлено к центру окружности, и его модуль равен  $a_{\text{ц}} = \omega^2 R$ .

Тело находится в равновесии, если векторная сумма всех сил, приложенных к нему, и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно любой оси равна нулю.

Движение, при котором все характеризующие его физические величины (например, координата  $x$ , проекция скорости  $v_x$ , проекция действующей силы  $F_x$ ) принимают одинаковые значения через равные промежутки времени  $T$  (рис. 1), называется **периодическим**.

Периодическое движение является колебательным, если тело или материальная точка движется вблизи положения равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону. Например, механическим колебательным движением является движение тела, подвешенного на нити (рис. 2, а), а также движение груза на пружине (рис. 2, б) и металлической пластинки, один конец которой закреплен (рис. 2, в).

При этом через любую точку траектории (кроме крайних) тело проходит как в прямом, так и в обратном направлении.

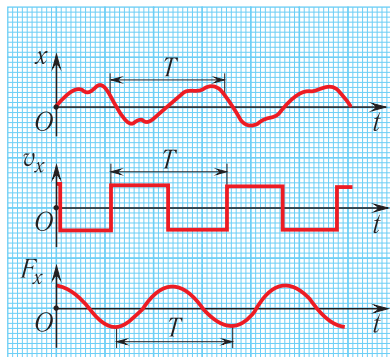


Рис. 1. Графики периодических зависимостей  $x$ ,  $v_x$ ,  $F_x$  от времени

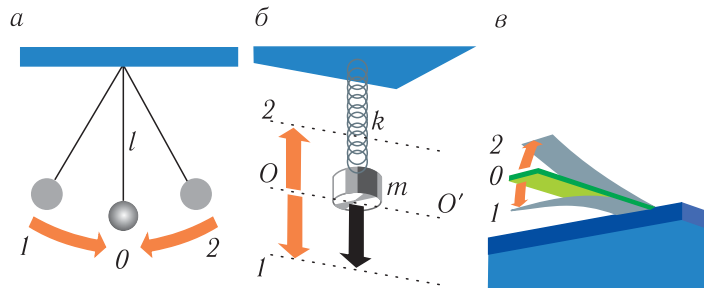


Рис. 2. Колебательные движения: *а* — тела, подвешенного на нити; *б* — груза на пружине; *в* — металлической пластинки, закрепленной на конце

Таким образом, **колебательным** называется периодическое движение (процесс), при котором любая характеризующая его физическая величина (например, координата) поочередно принимает то положительное, то отрицательное значение относительно положения устойчивого равновесия. Следовательно, периодическое колебательное движение (колебания) обладает свойством **повторяемости во времени**.

Подчеркнем, что по своей природе колебания могут быть не только механическими, но и электромагнитными (соответствуют изменениям напряжения и силы тока в электрической цепи), термодинамическими (соответствуют периодическим изменениям температуры системы с течением времени) и т. д.

Колебания — особая форма движения в том смысле, что различные по своей природе физические процессы (механические, электромагнитные и т. д.) описываются одинаковыми математическими зависимостями физических величин от времени.

Результаты экспериментов показывают, что для возникновения и существования механических колебаний необходимо выполнение определенных условий. Прежде всего, при выведении (например, при малом смещении) тела из положения равновесия в системе должна возникать результирующая сила, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия. Кроме того, в системе не должно быть большого трения, поскольку в этом случае колебания быстро затухнут (вследствие потери энергии) или не возникнут вообще.

Рассмотрим равномерное вращение материальной точки  $M$  по окружности радиусом  $R$  (рис. 3, *а*). Пусть рассматриваемое движение происходит против хода часовой стрелки. Выберем ось  $Ox$ , как показано на рисунке 3, *а*. Если в начальный момент времени  $t_0 = 0$  материальная точка находилась в положении  $M_0$ , то через промежуток времени  $\Delta t = t - t_0$  она окажется в некотором положении  $M$ .

Спроецируем на ось  $Ox$  радиус-вектор  $\vec{r} = OM$  движущейся точки, ее линейную скорость  $\vec{v}$  и центростремительное ускорение  $\vec{a}$ .

Проекция  $x$  радиус-вектора в положении  $M$  (точка  $B$ ) является смещением материальной точки от центра окружности  $O$  вдоль оси  $Ox$  (см. рис. 3, а). Следовательно, на оси  $Ox$  этому смещению точки соответствует координата  $x$  точки  $B$ .

Поскольку при равномерном вращении точки  $M$  по окружности ее координата (смещение)  $x$  будет периодически изменяться от  $x_{\max} = +R$  до  $x_{\min} = -R$ , то можно сказать, что точка  $B$  совершает *колебательное движение вдоль оси  $Ox$* , а ее координата  $x$  является координатой колеблющейся точки (рис. 3, б).

Соответственно, проекция линейной скорости материальной точки  $M$  на ось  $Ox$  является проекцией скорости  $v_x$  точки  $B$  и периодически изменяется от  $+v_0 = \omega R$  до  $-v_0 = -\omega R$ , а проекция ее центростремительного ускорения — проекцией ускорения  $a_x$  точки  $B$ , которое также периодически изменяется от  $+\omega^2 R$  до  $-\omega^2 R$ .

Радиус-вектор  $\vec{r}$  за промежуток времени  $\Delta t$  повернулся на угол  $\varphi = \omega \Delta t$  (см. рис. 3, а). При равномерном вращении точки  $M$  по окружности ее линейная скорость  $\vec{v}$  направлена по касательной, а центростремительное ускорение  $\vec{a}$  — к центру окружности (см. рис. 3, а). Таким образом,

$$x = R \cos \varphi; \quad v_x = -v_0 \sin \varphi; \quad a_x = -a_0 \cos \varphi.$$

С учетом того, что модуль линейной скорости  $v_0 = \omega R$ , модуль центростремительного ускорения  $a_0 = \omega^2 R$  и  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , выполняются соотношения:

$$v_0 = \omega R = \frac{2\pi}{T} R = \omega x_{\max}; \quad a_0 = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \omega^2 x_{\max} = \omega v_0,$$

где  $T$  — период вращения тела по окружности.

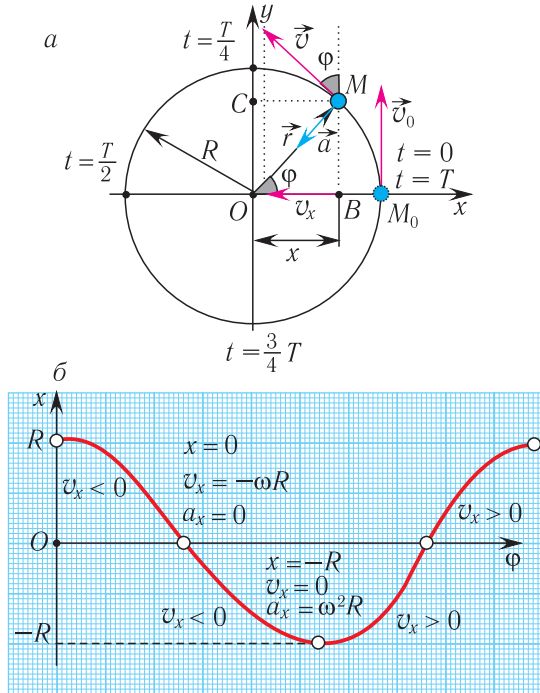


Рис. 3. Движение материальной точки  $M$  по окружности: а — характеристики движения; б — колебательная зависимость координаты  $x$  ( $\varphi$ ), соответствующая движению по окружности

Если при  $t_0 = 0$  материальная точка находилась в точке  $M_0$ , то координату  $x$ , проекции скорости  $v_x$  и ускорения  $a_x$  точки  $B$  в любой момент времени можно определить по формулам:

$$\begin{aligned}x &= R \cos \omega t = R \cos \frac{2\pi}{T}t; \\v_x &= -\omega R \sin \omega t = -\frac{2\pi}{T}R \sin \frac{2\pi}{T}t = -v_0 \sin \frac{2\pi}{T}t; \\a_x &= -\omega^2 R \cos \omega t = -\frac{4\pi^2}{T^2}R \cos \omega t = -a_0 \cos \frac{2\pi}{T}t.\end{aligned}$$

Таблица 1. Координата  $x$ , проекции скорости  $v_x$  и ускорения  $a_x$  тела, движущегося по окружности, в разные моменты времени

$t$	$x$	$v_x$	$a_x$
0	$R$	0	$-a_0$
$\frac{T}{4}$	0	$-v_0$	0
$\frac{T}{2}$	$-R$	0	$a_0$
$\frac{3T}{4}$	0	$v_0$	0
$T$	$R$	0	$-a_0$

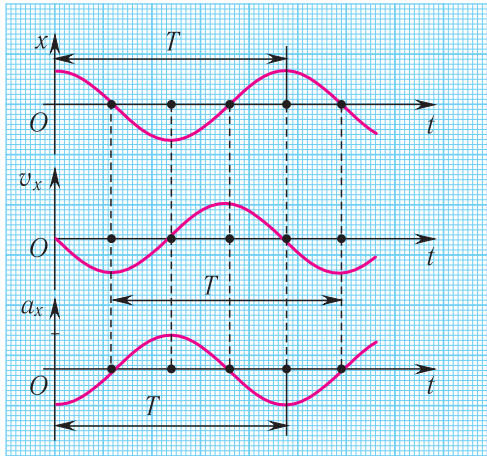


Рис. 4. Зависимости  $x$ ,  $v_x$ ,  $a_x$  от времени при колебательном движении материальной точки

Поскольку функции  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$  периодические, то через промежуток времени, равный периоду  $T$ , по истечении которого угол  $\phi$  изменится на  $2\pi$ , все характеристики движения точки  $B$  вдоль оси  $Ox$  (координата, проекция скорости и проекция ускорения) примут прежние значения (табл. 1), т. е. значения характеристик периодически повторяются.

Точка  $B$  в течение этого промежутка времени дважды проходит через начало координат, двигаясь в противоположных направлениях вдоль оси  $Ox$  (см. рис. 3, а). Как отмечалось выше, повторяемость — основной признак периодического движения.

Графики зависимостей координаты  $x$ , проекции скорости  $v_x$  и проекции ускорения  $a_x$  от времени показаны на рисунке 4, где  $t$  — время, отсчитываемое от момента начала колебаний.

Обратим внимание на то, что проекция ускорения  $a_x(t)$  ( $a_x = -\omega^2 R \cos \omega t$ ) точки  $B$  (см. рис. 3, а) в любой момент времени пропорциональна смещению (координате)  $x(t)$  ( $x = R \cos \omega t$ ) и противоположна ему по знаку:

$$a_x(t) = -\omega^2 x(t).$$

Перепишем данное соотношение в виде

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0. \quad (1)$$

Колебания, описываемые уравнением (1), являются *гармоническими*, а система, совершающая такие колебания, — **гармонической колебательной системой**, или **гармоническим осциллятором** (от лат. *oscillo* — качаюсь).

Уравнение (1) описывает **гармонические колебания**, при которых координата (смещение) тела от времени изменяется по **закону косинуса**:

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

или **синуса**:

$$x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  — *начальная фаза*, которая определяет состояние колебательной системы в начальный момент времени,  $A = x_{\max}$  — амплитуда колебаний.

Зависимость координаты от времени  $x(t)$  (соотношения (2) и (3)) называется кинематическим **законом (или уравнением) гармонических колебаний (законом движения)**, поскольку позволяет определить положение тела, его скорость, ускорение в произвольный момент времени.

Наиболее важными величинами, характеризующими механические периодические колебания, являются:

$x(t)$  — **координата** МТ (смещение из положения равновесия) в момент времени  $t$ :

$$x = f(t); \quad f(t) = f(t + T),$$

где  $f(t)$  — заданная периодическая функция времени  $t$ ,  $T$  — период этой функции.

$A$  ( $A > 0$ ) — **амплитуда колебаний** — максимальное смещение  $x_{\max}$  тела или системы тел из положения устойчивого равновесия.

$T = \frac{t}{N}$  — **период** — длительность одного полного колебания, т. е. наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебание. Здесь  $t$  — время совершения  $N$  полных колебаний.

В СИ единицей периода колебаний является **1 секунда** (1 с).

$\nu$  — **частота** — число полных колебаний, совершаемых в единицу времени:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{N}{t}.$$

В СИ единицей частоты колебаний является **1 герц** (1 Гц). 1 Гц равен частоте колебаний тела, при которой за 1 с тело совершает одно полное колебание ( $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ ).

$\omega$  — **циклическая частота** — число полных колебаний, совершаемых за промежуток времени  $\Delta t$ , равный  $2\pi$  секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

В СИ единицей циклической частоты является **1 радиан в секунду** ( $1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ).

$\varphi = \omega t + \varphi_0$  — **фаза** (от греч.  $\varphi\alpha\sigma\iota\varsigma$  (фазис) — появление, момент явления) — аргумент периодической функции, определяющий значение физической величины в любой момент времени  $t$ . Она определяет состояние колебательной системы (координаты, скорости, ускорения) в любой момент времени при заданной частоте и амплитуде.

Единицей фазы является **1 радиан** (1 рад).

$\varphi_0$  — **начальная фаза**, которая определяет состояние колебательной системы в начальный момент времени ( $t_0 = 0$ ).

Циклическая частота  $\omega$  гармонических колебаний зависит только от свойств системы, в которой происходят колебания, но не зависит от амплитуды колебаний. Амплитуда колебаний  $A$  и начальная фаза  $\varphi_0$  определяются не свойствами самой системы, а тем способом, которым в системе вызваны колебания.

Так как ускорение тела всегда обусловлено действием силы, то по второму закону Ньютона в проекции на ось  $Ox$  можно записать:

$$F_x = ma_x = -m\omega^2 x.$$

Следовательно, при гармонических колебаниях проекция силы  $F_x$ , возвращающей тело в положение равновесия ( $x = 0$ ), пропорциональна его смещению от этого положения (координате) ( $F_x = -kx$ ), причем знак «минус» отражает «возвратный» характер возникающей силы. Как уже отмечалось, появление возвращающей силы при отклонении тела от положения равновесия является необходимым условием возникновения колебаний.

**Положению равновесия** тела соответствует точка, в которой равнодействующая сил, приложенных к нему, равна нулю ( $F = 0$ ). Координату этой точки, как правило, принимают равной нулю ( $x = 0$ ).



Различают несколько видов равновесия (рис. 5). Равновесие называется **устойчивым**, если при малом отклонении тела от положения равновесия возникают силы, возвращающие его в исходное положение. Равновесие на-



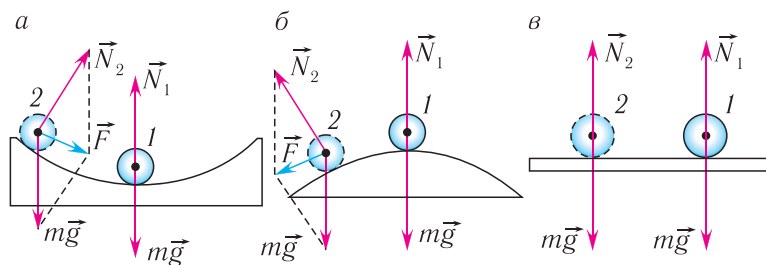


Рис. 5. Положения устойчивого (а), неустойчивого (б) и безразличного (в) равновесия

зывается *неустойчивым*, если при малом отклонении тела от положения равновесия возникают силы, вызывающие дальнейшее отклонение тела от положения равновесия. Равновесие называется *безразличным*, если при отклонении тела от положения равновесия равнодействующая сила остается равной нулю. Примером устойчивого равновесия может служить равновесие небольшого шарика в сферической ямке, а неустойчивого — равновесие шарика на вершине сферической горки. Равновесие шарика на горизонтальной поверхности является безразличным.

Таким образом, колебания материальной точки могут возникать только вблизи положения устойчивого равновесия. Если при этом они происходят под действием возвращающей силы, модуль которой прямо пропорционален смещению точки из положения равновесия, направленной к положению равновесия колеблющегося тела, то они будут *гармоническими*.

Заметим, что точно так же, как мы рассматривали изменение координаты  $x$  вращающейся по окружности материальной точки  $M$ , можно рассматривать и изменение ее координаты  $y$  (точка  $C$ ) (см. рис. 3, а). Следовательно, точка  $C$  будет совершать гармонические колебания вдоль оси  $Oy$ .

Значит, равномерное вращение материальной точки по окружности можно рассматривать как наложение двух одинаковых по амплитуде гармонических колебаний, которые происходят одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях.



1. Какое движение называют периодическим?
2. Какое движение называют колебательным?
3. Какую колебательную систему называют гармоническим осциллятором?
4. Какое уравнение описывает гармонические колебания?
5. Что называют амплитудой колебаний? Периодом? Частотой?
6. Каким соотношением связаны между собой частота  $\nu$  колебаний и циклическая частота  $\omega$ ?

Правообладатель Народная асвета

7. Что называется фазой гармонического колебания? Начальной фазой гармонического колебания?
8. Что представляет собой кинематический закон движения? Запишите закон движения маятника при гармонических колебаниях.
9. Могут ли в какой-то момент времени совпадать направления смещения и скорости гармонического осциллятора?
10. В чем сходство вращательного и колебательного движения и в чем их различие?

### Пример решения задачи

За какую часть периода тело, совершающее гармонические колебания, проходит расстояние: а) от положения равновесия до максимального смещения; б) первую половину этого расстояния; в) вторую половину этого расстояния?

### Решение

Координата  $x$  тела, совершающего гармонические колебания, определяется соотношением:

$$x = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right).$$

Здесь  $A$  — амплитуда колебаний тела,  $t$  — время, отсчитываемое с момента прохождения телом положения равновесия,  $T$  — период колебаний,  $\varphi_0$  — начальная фаза.

Пусть тело находится в положении равновесия в начальный момент времени  $t_0 = 0$ , тогда  $x(0) = 0$  и  $\varphi_0 = 0$ .

а) Промежуток времени  $\Delta t_1$ , необходимый телу для прохождения расстояния из среднего положения в крайнее  $x = A$ , определяется из уравнения:

$$A = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t_1\right).$$

Наименьшее значение  $\Delta t_1$ , при котором выполняется это равенство, получается при

$$\frac{2\pi}{T}\Delta t_1 = \frac{\pi}{2}.$$

Отсюда искомый промежуток времени:

$$\Delta t_1 = \frac{T}{4}.$$

б) Промежуток времени  $\Delta t_2$ , необходимый для прохождения первой половины этого расстояния  $x = \frac{A}{2}$ , определяется из уравнения:

$$\frac{A}{2} = A \sin \frac{2\pi}{T} \Delta t_2 \Rightarrow \frac{1}{2} = \sin \frac{2\pi}{T} \Delta t_2 \Rightarrow \frac{2\pi}{T} \Delta t_2 = \frac{\pi}{6}.$$

Правообладатель Народная асвета

Отсюда

$$\Delta t_2 = \frac{T}{12}.$$

в) Промежуток времени  $\Delta t_3$ , необходимый для прохождения второй половины этого расстояния, определяется из соотношения:

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{T}{6}.$$

Ответ: а)  $\Delta t_1 = \frac{T}{4}$ ; б)  $\Delta t_2 = \frac{T}{12}$ ; в)  $\Delta t_3 = \frac{T}{6}$ .

Таким образом, для прохождения первой половины расстояния тело затрачивает в 2 раза меньше времени, чем для прохождения второй половины.

### Упражнение 1

1. Материальная точка за промежуток времени  $\Delta t = 1,0$  мин совершила  $N = 180$  колебаний. Определите период  $T$ , частоту  $\nu$  и циклическую частоту  $\omega$  колебаний материальной точки.

2. Определите наибольшие значения модулей (амплитуду) скорости  $v_{\max}$  и ускорения  $a_{\max}$  колеблющейся материальной точки, если амплитуда ее колебаний  $A = 5,0$  см, а период колебаний  $T = 3,0$  с.

3. Материальная точка совершает колебания по закону  $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ . За период колебаний точка проходит путь  $l = 40$  см. Определите координату  $x_1$  материальной точки в момент времени  $t_1$ , когда фаза колебаний  $\varphi = 0,20\pi$ .

4. Амплитуда колебаний материальной точки  $A = 1,0$  см, частота  $\nu = 0,50$  Гц. Запишите кинематический закон движения  $x(t)$  и постройте график зависимости координаты точки от времени. Определите фазу  $\varphi$  и координату  $x$  точки через промежуток времени  $t = 2,5$  с, если начальная фаза  $\varphi_0 = 0$ .

5. Запишите кинематический закон движения  $x(t)$  материальной точки, если за промежуток времени  $t = 1,0$  мин она совершает  $N = 120$  колебаний с амплитудой  $A = 10$  см. В момент времени  $t_0 = 0$  точка двигалась в направлении оси  $Ox$  и ее координата  $x(0) = 5,0$  см.

## § 2. Пружинный и математический маятники



Второй закон Ньютона (основной закон динамики): ускорение тела прямо пропорционально результирующей силе и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N}{m}.$$

Закон Гука: при упругих деформациях сжатия и растяжения модуль силы упругости прямо пропорционален модулю изменения длины тела:

$$F_{\text{упр}} = k|l - l_0| = k|\Delta l|,$$

где  $k$  — жесткость тела,  $l_0$  — длина недеформированного тела,  $l$  — длина деформированного тела.

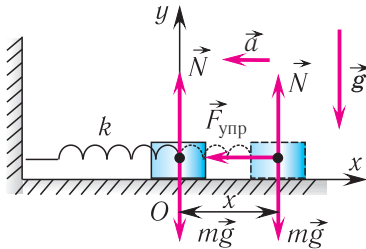


Рис. 6. Горизонтальный пружинный маятник

Колебательная система, состоящая из тела с прикрепленной к нему пружины, называется **пружинным маятником**. Пружина может располагаться как вертикально (*вертикальный пружинный маятник*), так и горизонтально (*горизонтальный пружинный маятник*).

Рассмотрим колебания горизонтального пружинного маятника. Пусть груз массой  $m$ , лежащий на гладкой горизонтальной поверхности, прикреплен к свободному концу легкой (невесомой) пружины жесткостью  $k$  (рис. 6). Второй конец пружины неподвижен относительно данной инерциальной системы отсчета (ИСО).

Выведем груз из положения равновесия, сместив его на расстояние  $x$  вправо (см. рис. 6). Тогда в пружине возникнет сила упругости  $F_{\text{упр}}$ , действующая на груз и направленная влево.

Согласно второму закону Ньютона для движения груза

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}_{\text{упр}} + m\mathbf{g} + \mathbf{N}.$$

В проекции на ось  $Ox$  действующих на груз сил (см. рис. 6) с учетом закона Гука получаем:

$$-ma_x = -F_{\text{упр}} = kx,$$

или

$$ma_x + kx = 0.$$

Перепишем полученное соотношение в виде:

$$a_x + \left(\frac{k}{m}\right)x = 0, \quad (1)$$

которое является **уравнением гармонических колебаний пружинного маятника**.

Сравнивая (1) с уравнением гармонических колебаний  $a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0$ , находим циклическую частоту колебаний горизонтального пружинного маятника:

Правообладатель Народная асвета

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

которая определяется массой  $m$  груза и жесткостью  $k$  пружины.

Для нахождения периода колебаний пружинного маятника воспользуемся формулой  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , подставив в нее выражение (2):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3)$$

Как следует из формул (2) и (3), период и частота колебаний пружинного маятника не зависят от амплитуды его колебаний (в пределах выполнимости закона Гука).

Свойство независимости периода колебаний маятника от амплитуды называется *изохронностью* (от греч.  $\text{ισος}$  (изос) — равный и  $\chi\rho\omicron\nu\omicron\varsigma$  (хронос) — время). Следовательно, колебания пружинного маятника обладают свойством *изохронности*.

Изохронность колебаний маятника была открыта Галилео Галилеем в 1583 г. при изучении движения груза, подвешенного на нити. Моделью данной колебательной системы является *математический маятник*.

Колебательная система, состоящая из находящегося в поле силы тяжести тела, подвешенного на легкой нерастяжимой нити, размеры которого малы по сравнению с длиной нити, а его масса значительно больше массы нити, называется **математическим маятником**. При таких условиях тело можно считать материальной точкой, а нить — легкой нерастяжимой (рис. 7).

Рассмотрим колебания математического маятника.

Отклонение маятника от положения равновесия будем характеризовать углом  $\alpha$  (см. рис. 7), который нить образует с вертикалью.

После отклонения маятника на него действуют две силы: направленная вертикально вниз сила тяжести  $m\vec{g}$  и направленная вдоль нити сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$ . Под действием этих сил тело движется по дуге окружности к устойчивому положению равновесия.

Согласно второму закону Ньютона для движения маятника можем записать:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a}. \quad (4)$$

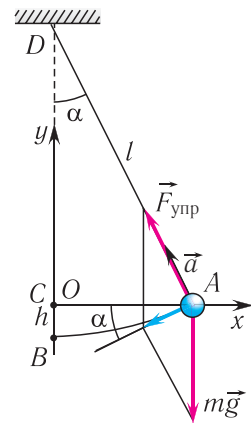


Рис. 7. Колебания математического маятника

В проекциях на выбранные оси координат  $Ox$  и  $Oy$  (см. рис. 7) получаем:

$$-F_{\text{упр}} \sin \alpha = ma_x; \quad (5)$$

$$-mg + F_{\text{упр}} \cos \alpha = ma_y. \quad (6)$$

Для углов отклонения  $\alpha \leq 10^\circ$  значения  $\alpha$  и  $\sin \alpha$  различаются меньше чем на 1 %. Поэтому при малых углах отклонения  $\sin \alpha \approx \alpha$  и длина дуги  $\widehat{AB} = l\alpha$  очень мало отличается от длины хорды  $AC = l \sin \alpha \approx l\alpha$ , где угол  $\alpha$  выражен в радианах. Тогда смещение маятника вдоль дуги  $x = l\alpha$ . Но практически маятник движется вдоль оси  $Ox$ . Из  $\triangle ACD$  находим  $\sin \alpha = \frac{x}{l}$  и, подставив это выражение в (5), получим:

$$-F_{\text{упр}} \sin \alpha \approx -F_{\text{упр}} \frac{x}{l} = ma_x. \quad (7)$$

Таким образом, силой, возвращающей маятник к устойчивому положению равновесия, является сила упругости его нити.

При малых углах отклонения маятника проекция вектора ускорения  $a_y \ll g$  и ею можно пренебречь, а  $\cos \alpha \approx 1$ , тогда из уравнения (6) следует, что  $F_{\text{упр}} \approx mg$ .

Следовательно, уравнение движения маятника вдоль оси  $Ox$  запишется в виде:

$$ma_x = -\frac{mg}{l}x,$$

где  $g$  — ускорение, сообщаемое грузу маятника силой упругости нити.

Отсюда получаем **уравнение гармонических колебаний математического маятника**:

$$a_x + \frac{g}{l}x = 0. \quad (8)$$

При сравнении уравнения (8) с уравнением гармонических колебаний  $a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0$  можно сделать вывод, что при малых отклонениях математический маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (9)$$

Тогда период малых колебаний математического маятника в поле тяжести Земли определяется по формуле **Гюйгенса**:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (10)$$

которую впервые получил ученик И. Ньютона Христиан Гюйгенс.



При углах отклонения математического маятника  $\alpha \leq 20^\circ$  погрешность расчета периода колебаний математического маятника по формуле Гюйгенса не превышает 1 %.

Как видно из формул (9) и (10), циклическая частота и период математического маятника не зависят от массы маятника и амплитуды его колебаний, а определяются только его длиной  $l$  и модулем ускорения свободного падения  $g$ .

Галилео Галилей первый экспериментально определил, что период малых колебаний ( $\alpha \leq 10^\circ$ ) математического маятника длиной  $l$  в поле силы тяжести не зависит от его массы  $m$  и амплитуды колебаний (угла начального отклонения  $\alpha$ ). Он установил также, что период этих колебаний прямо пропорционален  $\sqrt{l}$ .



Если маятник приобретает дополнительное ускорение  $\vec{a}$ , обусловленное, например, ускоренным движением точки подвеса, то при этом будет изменяться сила упругости нити. В таком случае период колебаний маятника будет определяться по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^*}},$$

где  $\vec{g}^* = \vec{g} \pm \vec{a}$  — «эффективное ускорение», равное векторной разности



1. Какой маятник называют пружинным?
2. Запишите уравнение гармонических колебаний пружинного маятника.
3. По какой формуле определяется циклическая частота колебаний пружинного маятника? Период его колебаний?
4. Как изменится характер колебаний пружинного маятника, если его привести в состояние невесомости?
5. Изменится ли период колебаний пружинного маятника, если его «перенести» с поверхности Земли на поверхность Луны?
6. Какой маятник называют математическим?
7. Запишите уравнение гармонических колебаний математического маятника.
8. Как направлена равнодействующая сил, приложенных к маятнику, в моменты, когда он находится в крайних положениях? Проходит через положение равновесия?
9. По какой формуле определяется период колебаний математического маятника?
10. Каким образом, используя математический маятник, можно определить ускорение свободного падения в данном месте?
11. Влияет ли изменение температуры на точность хода маятниковых часов?
12. Какое свойство маятника называется изохронностью?



### Примеры решения задач

1. Выведите формулу для периода колебаний вертикального пружинного маятника, если масса груза  $m$  и жесткость пружины  $k$ .

#### Решение

Рассмотрим вертикальное движение груза, происходящее под действием силы упругости пружины и силы тяжести груза после толчка. Начало координат поместим в точку, соответствующую равновесному положению тела (рис. 8). В этом положении пружина растянута на величину  $x_0$ , определяемую соотношением:

$$mg = kx_0. \quad (1)$$

При смещении груза на величину  $x$  из положения равновесия сила, действующая со стороны пружины на груз, равна  $F_x = -k(x + x_0)$ .

Тогда по второму закону Ньютона

$$-k(x + x_0) + mg = ma_x.$$

С учетом соотношения (1) это уравнение перепишем в виде:

$$-kx = ma.$$

Если ввести обозначение  $\omega^2 = \frac{k}{m}$ , то уравнение движения груза запишется в виде:

$$a + \omega^2 x = 0.$$

Оно описывает гармонические колебания вертикального пружинного маятника с частотой такой же, как у горизонтального пружинного маятника. Следовательно, период колебаний вертикального пружинного маятника такой же, как и горизонтального:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Ответ:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$

Таким образом, действующая в колебательной системе постоянная сила только смещает положения равновесия, но не изменяет частоту колебаний.

2. Определите амплитуду  $A$ , циклическую частоту  $\omega$ , период  $T$  и начальную фазу  $\varphi_0$  колебаний тела массой  $m = 500$  г, подвешенного к вертикальной пружине (рис. 9). Известно, что в состоянии покоя тело растягивает пружину на расстояние  $x_0 = 10$  мм и для возбуждения колебаний его смещают вниз на расстояние  $x = 30$  мм от положения равновесия и отпускают.

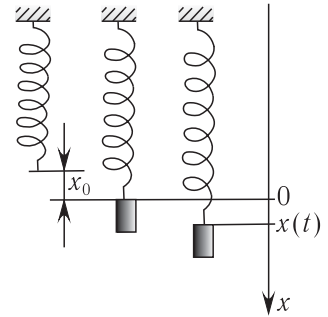


Рис. 8

Дано:

$$m = 500 \text{ г} = 0,500 \text{ кг}$$

$$x_0 = 10 \text{ мм} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$x = 30 \text{ мм} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A = ? \quad T = ? \quad \omega = ?$$

$$\varphi_0 = ?$$

Решение

Циклическая частота колебаний вертикального пружинного маятника так же, как и горизонтального, определяется по формуле (см. пример 1):

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Для нахождения жесткости  $k$  пружины запишем условие равновесия тела:

$$\vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g} = 0.$$

По закону Гука

$$F_{\text{упр}} = -kx_0.$$

В проекции на ось  $Ox$  условие равновесия запишется:

$$mg = kx_0 \Rightarrow k = \frac{mg}{x_0}.$$

Отсюда для циклической частоты  $\omega$  получаем:

$$\omega = \sqrt{\frac{mg}{x_0 m}} = \sqrt{\frac{g}{x_0}}; \quad \omega = \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}} = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

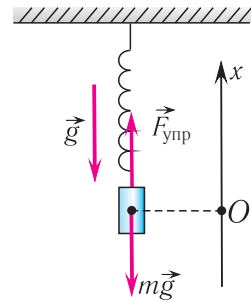


Рис. 9

Амплитуда колебаний маятника определяется начальным смещением:

$$A = x = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Период колебаний находим из соотношения:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{x_0}{g}};$$

$$T = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}} = 0,20 \text{ с}.$$

Поскольку в начальный момент времени тело было смещено на максимальную величину, то начальная фаза колебаний  $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ .

Ответ:  $A = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad \omega = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad T = 0,20 \text{ с}; \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2}.$

## Упражнение 2

1. Определите период  $T$  и частоту  $\nu$  колебаний груза массой  $m = 100 \text{ г}$ , движущегося по гладкой горизонтальной поверхности под действием легкой пружины жесткостью  $k = 0,050 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

2. Какую длину  $l$  должен иметь математический маятник на поверхности Земли, чтобы период колебаний был  $T = 1,0$  с?
3. Два тела с одинаковыми массами подвешены к двум одинаковым пружинам. Тела смещают вниз: одно — на расстояние  $x_1 = 10$  см, другое — на расстояние  $x_2 = 20$  см от положения равновесия — и затем одновременно отпускают. Какое из них первым пройдет положение равновесия?
4. На пружине колеблется груз с частотой  $\nu = 0,620$  Гц. Когда к нему прикрепили дополнительный груз массой  $\Delta m = 700$  г, частота колебаний стала  $\nu_1 = 0,480$  Гц. Найдите массу  $m$  начального груза.
5. Маятниковые часы спешат. Как надо изменить длину подвеса, чтобы они шли точно?
6. На поверхности Земли период малых колебаний математического маятника  $T = 0,60$  с. Каким будет период  $T_1$  его колебаний на Марсе, если модуль ускорения свободного падения на Марсе  $a = 0,37g$ ?
7. Один математический маятник совершил за некоторый промежуток времени  $N_1 = 10$  колебаний, а другой —  $N_2 = 8$  колебаний. Определите длину  $l_2$  другого маятника, если известно, что разность длин маятников  $\Delta l = 20$  см.
8. Тело массой  $m$  подвешено на пружине жесткостью  $k$ . Пружину разрезали пополам и прикрепили к одной половине то же тело. Во сколько раз  $n$  изменилась частота колебаний?
9. Две легкие пружины жесткостями  $k_1$  и  $k_2$  соединены один раз последовательно, другой — параллельно. Во сколько раз  $n$  будут отличаться периоды колебаний груза на таких пружинах?

### § 3. Превращения энергии при гармонических колебаниях



Механическая энергия системы равна сумме ее кинетической и потенциальной энергии. Механическая энергия замкнутой системы, в которой не действуют силы трения (сопротивления), сохраняется.

Поскольку при колебаниях гармонического осциллятора силой трения пренебрегают, то его механическая энергия сохраняется. Рассмотрим превращения энергии при колебаниях математического маятника. Выберем систему отсчета таким образом, чтобы в положении равновесия его потенциальная энергия была равна нулю.

При отклонении маятника на угол  $\alpha_{\max}$  (рис. 10), соответствующий максимальному смещению от положения равновесия, потенциальная энергия максимальна, а кинетическая энергия равна нулю:

$$(W_{\text{п}})_{\max} = mgh_{\max}; \quad W_{\text{к}} = 0.$$

Поскольку при прохождении положения равновесия потенциальная энергия равна нулю ( $W_{\text{п}} = 0$ ), то из закона сохранения механической энергии следует (см. рис. 10), что  $(W_{\text{к}})_B = (W_{\text{п}})_C$ , т. е. кинетическая энергия маятника (а следовательно, и скорость) будет максимальна:

$$(W_{\text{к}})_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}; \quad W_{\text{п}} = 0.$$

Запишем закон сохранения механической энергии, подставив в него выражения для потенциальной и кинетической энергии:

$$(W_{\text{к}})_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh_{\max} = (W_{\text{п}})_{\max}. \quad (1)$$

Отсюда найдем модуль максимальной скорости маятника:

$$v_{\max} = \sqrt{2gh_{\max}}. \quad (2)$$



Высоту  $h_{\max}$  можно выразить через длину  $l$  маятника и амплитуду  $A$  колебаний. Если колебания малые, то  $A \approx l\alpha_{\max}$ . Из  $\triangle KCD$  (см. рис. 10) находим:

$$h_{\max} = l - l \cos \alpha_{\max} = l(1 - \cos \alpha_{\max}) = l \cdot 2 \sin^2 \left( \frac{\alpha_{\max}}{2} \right) \approx 2l \left( \frac{\alpha_{\max}}{2} \right)^2 = \frac{l\alpha_{\max}^2}{2},$$

или

$$h_{\max} = \frac{l\alpha_{\max}^2}{2} = \frac{(l\alpha_{\max})^2}{2l} = \frac{A^2}{2l}. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) для  $h_{\max}$  в формулу (2), получим:

$$v_{\max} = A \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) для  $h_{\max}$  и (4) для  $v_{\max}$  в соотношение (1), находим:

$$(W_{\text{к}})_{\max} = (W_{\text{п}})_{\max} = m \frac{g}{2l} A^2. \quad (5)$$

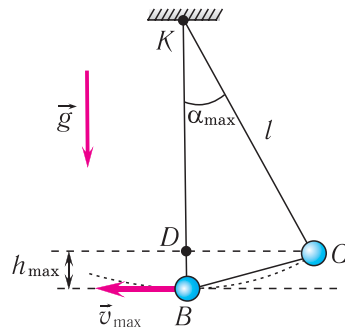


Рис. 10. Определение  $v_{\max}$  и  $h_{\max}$

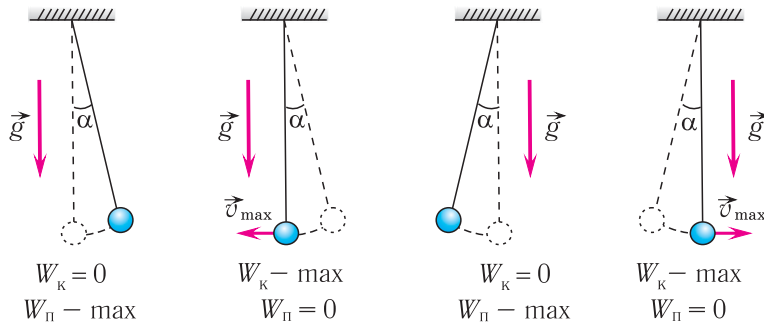


Рис. 11. Превращения энергии при колебаниях математического маятника

Таким образом, в положении равновесия потенциальная энергия полностью переходит в кинетическую, а в положениях максимального отклонения кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную (рис. 11).

В любом промежуточном положении

$$W_k + W_n = \text{const} = (W_k)_{\text{max}} = (W_n)_{\text{max}}.$$

Покажем, что аналогичные превращения энергии имеют место и для пружинного маятника (рис. 12).

В крайних положениях, когда  $x_{\text{max}} = \pm A$ , модуль скорости маятника  $v = 0$ , и кинетическая энергия груза полностью переходит в потенциальную энергию деформированной пружины:

$$(W_n)_{\text{max}} = \frac{kA^2}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, из соотношения (6) следует, что механическая энергия пружинного маятника пропорциональна квадрату амплитуды колебаний.

В положении равновесия, когда  $x = 0$ , вся энергия пружинного маятника переходит в кинетическую энергию груза:

$$(W_k)_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где  $v_{\text{max}}$  — модуль максимальной скорости груза при колебаниях.

Рис. 12. Превращения энергии при колебаниях пружинного маятника

В положениях между крайними точками полная энергия

$$W_{\text{мех}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = (W_{\text{п}})_{\text{max}} = (W_{\text{к}})_{\text{max}}.$$

С учетом выражений для координаты  $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$  и проекции скорости груза  $v = -A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)$ , а также для  $k = m\omega^2$  находим его потенциальную энергию  $W_{\text{п}} = \frac{mA^2\omega^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$  и кинетическую энергию  $W_{\text{к}} = \frac{mA^2\omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2}$  в произвольный момент времени  $t$ .

Тогда полная механическая энергия пружинного маятника в этот же момент времени есть величина постоянная и равная:

$$W_{\text{мех}} = W_{\text{к}} + W_{\text{п}} = \frac{mA^2\omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2} + \frac{mA^2\omega^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

Таким образом, начальное смещение  $A = x_{\text{max}}$  определяет начальную потенциальную, а начальная скорость  $v_0 = v_{\text{max}}$  определяет начальную кинетическую энергию колеблющегося тела. При отсутствии в системе потерь энергии процесс колебаний сопровождается только переходом энергии из потенциальной в кинетическую и обратно.

Заметим, что частота периодических изменений кинетической (потенциальной) энергии колеблющегося тела в два раза больше частоты колебаний маятника. Действительно, дважды за период механическая энергия тела будет полностью превращаться в потенциальную (в двух крайних положениях маятника) и дважды за период — в кинетическую (при его прохождении через положение равновесия) (рис. 13).

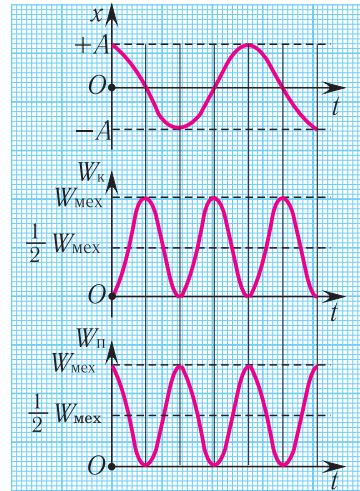


Рис. 13. Зависимости смещения маятника, его кинетической и потенциальной энергии от времени



1. Какой энергией обладает математический маятник при прохождении положения равновесия?
2. Какой энергией обладает пружинный маятник при наибольшем смещении от положения равновесия?
3. Чему равна потенциальная энергия математического и пружинного маятников в положении равновесия?
4. Как изменяется при колебаниях маятника его механическая энергия? Кинетическая? Потенциальная?

5. Как связана энергия пружинного (математического) маятника (гармонического осциллятора) с его амплитудой?
6. Запишите формулы для определения механической энергии гармонического осциллятора при прохождении им положения равновесия и при максимальном смещении из него.

### Примеры решения задач

1. Математический маятник при колебаниях от одного крайнего положения до другого смещается на расстояние  $d = 4,0$  см и при прохождении положения равновесия достигает скорости, модуль которой  $v = 10 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ . Определите период  $T$  колебаний маятника.

Дано:

$$d = 4,0 \text{ см} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$v = 10 \frac{\text{см}}{\text{с}} = 1,0 \cdot 10^{-1} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$T = ?$

Решение

По закону сохранения механической энергии

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{m\omega^2 \left(\frac{d}{2}\right)^2}{2} = \frac{m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^2}{2}.$$

Отсюда

$$T = 2\pi \frac{d}{2v} = \frac{\pi d}{v}; \quad T = \frac{3,14 \cdot 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{1,0 \cdot 10^{-1} \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 1,3 \text{ с.}$$

Ответ:  $T = 1,3$  с.

2. Груз массой  $m = 100$  г находится на гладкой горизонтальной поверхности и закреплен на легкой пружине жесткостью  $k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ . Его смещают на расстояние  $x = 3,00$  см от положения равновесия и сообщают в направлении от положения равновесия скорость, модуль которой  $v = 10,0 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ . Определите потенциальную  $W_{\text{оп}}$  и кинетическую  $W_{\text{ок}}$  энергию груза в начальный момент времени. Запишите кинематический закон движения груза.

Дано:

$$m = 100 \text{ г} = 0,100 \text{ кг}$$

$$k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$x = 3,00 \text{ см} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$v = 10,0 \frac{\text{см}}{\text{с}} = 0,100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$W_{\text{оп}} = ?$   $W_{\text{ок}} = ?$

Решение

Потенциальная энергия груза:

$$W_{\text{оп}} = \frac{kx^2}{2};$$

$$W_{\text{оп}} = \frac{100 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot (3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}{2} = 4,50 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия груза:

$$W_{\text{ок}} = \frac{mv^2}{2}; \quad W_{\text{ок}} = \frac{0,100 \text{ кг} \cdot \left(0,100 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{2} = 5,00 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

Правообладатель Народная асвета



Начальное смещение груза не является амплитудой, так как вместе с начальным отклонением грузу сообщили и скорость. Однако полная энергия может быть выражена через амплитуду колебаний:

$$W = W_{\text{оп}} + W_{\text{ок}} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{kA^2}{2}; \quad W = 4,55 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

Отсюда

$$A = \sqrt{\frac{2W}{k}}; \quad A = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,55 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}}{100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}}} = 3,02 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Циклическая частота:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \omega = \sqrt{\frac{100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}}{0,100 \text{ кг}}} = 31,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

В начальный момент времени  $t_0 = 0$  координата груза  $x = A \sin \varphi_0$ .

Отсюда начальная фаза:

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{x}{A}; \quad \varphi_0 = \arcsin \frac{3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{3,02 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = \arcsin (0,9944) = 1,46 \text{ рад.}$$

Тогда закон гармонических колебаний имеет вид (рис. 14):

$$x = 3,02 \cdot 10^{-2} \sin(31,6t + 1,46) \text{ (м).}$$

Ответ:  $W_{\text{оп}} = 4,50 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$ ;  $W_{\text{ок}} = 5,00 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ ;  
 $x = 3,02 \cdot 10^{-2} \sin(31,6t + 1,46) \text{ (м).}$

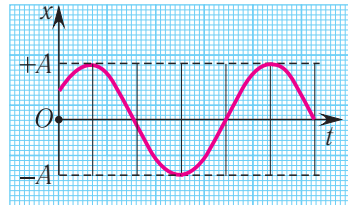


Рис. 14. Зависимость смещения маятника от времени

### Упражнение 3

1. Определите механическую энергию  $W$  горизонтального пружинного маятника, который совершает колебания с амплитудой  $A = 4,0$  см, если жесткость пружины  $k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

2. Определите механическую энергию  $W$  гармонических колебаний материальной точки, если известны ее масса  $m$ , частота  $\nu$  и амплитуда  $A$  колебаний.

3. Вертикальный пружинный маятник совершает гармонические колебания с амплитудой  $A = 2,4$  см. Определите смещение  $x_1$  груза от положения равновесия в точке, в которой на него действует возвращающая сила, модуль которой  $F = 30$  мН, если полная механическая энергия маятника  $W = 3,6$  мДж.

4. Пружинный маятник, находящийся на гладкой горизонтальной поверхности, вывели из положения равновесия и без толчка отпустили. Через какую часть  $n$

периода кинетическая энергия  $W_k$  прикрепленного к пружине тела будет равна потенциальной энергии  $W_n$  деформированной пружины?

5. Материальная точка массой  $m$  совершает гармонические колебания с периодом  $T$  и начальной фазой  $\varphi_0 = 0$ . Максимальная кинетическая энергия колеблющейся точки ( $W_k$ )<sub>max</sub>. Определите амплитуду  $A$  колебаний, модуль максимальной скорости  $v_{\text{max}}$  точки и запишите кинематический закон ее движения.

6. Пуля массой  $m = 10$  г, движущаяся горизонтально со скоростью, модуль которой  $v = 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , попала в подвешенный на легкой нити деревянный шар массой  $M = 1,0$  кг и застряла в нем. При этом нить отклонилась от вертикали на угол  $\alpha = 20^\circ$ . Определите период  $T$  колебаний шара.

## § 4. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс



Силы взаимодействия тел системы называют внутренними. Тела, не входящие в систему, называют внешними телами. Силы, которые действуют на тела системы со стороны внешних тел, называют внешними силами.

Как вам уже известно, механическая энергия гармонического осциллятора (например, груза на пружине) пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний. Колебания, происходящие с постоянной во времени амплитудой, называются **незатухающими колебаниями**.

Колебания, которые совершает система около положения устойчивого равновесия под действием внутренних сил после того, как она была выведена из состояния равновесия и предоставлена самой себе, называются **свободными (собственными) колебаниями**.

Свободные колебания происходят со строго определенной частотой  $\omega_0$ , называемой **частотой свободных (собственных) колебаний системы**. Эта частота зависит только от параметров системы. Примерами таких колебаний могут служить колебания математического и пружинного маятников, происходящие в отсутствие сил трения. Амплитуда свободных колебаний определяется начальными условиями, т. е. тем начальным отклонением или толчком, которым маятник или груз на пружине приведен в движение. Свободные колебания являются самым простым видом колебаний.

В любой реальной колебательной системе всегда присутствуют силы трения (сопротивления), поэтому механическая энергия системы с течением времени уменьшается, переходя во внутреннюю энергию. Вместе с тем убыль механической энергии означает и уменьшение амплитуды колебаний.

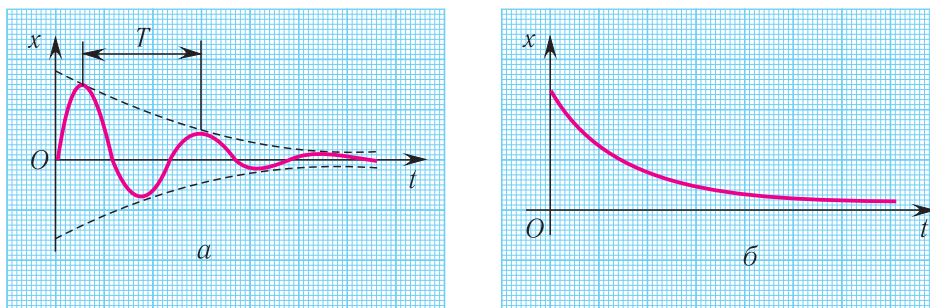


Рис. 15. Затухающие механические колебания: а — малая сила трения; б — большая сила трения

Колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени вследствие потери энергии колебательной системой, называются **затухающими колебаниями** (рис. 15). Уменьшение механической энергии системы (превращение ее во внутреннюю энергию) происходит вследствие трения и сопротивления окружающей среды.



Систему называют диссипативной (от лат. dissipation — рассеяние), если ее механическая энергия с течением времени уменьшается за счет превращения ее во внутреннюю энергию.

При малых потерях энергии колебания можно считать периодическими и пользоваться такими понятиями, как период и частота колебаний. Так, например, период — промежуток времени между двумя последовательными максимумами колеблющейся физической величины (см. рис. 15, а).

Колебания в любой реальной системе рано или поздно затухают. Чтобы колебания не затухали, необходимо воздействие внешней силы. Однако не всякая внешняя сила заставляет систему двигаться периодически. Например, невозможно раскачать качели, если действовать на них постоянной силой. Внешняя сила тоже должна быть *периодической*.

Проведем следующий эксперимент. Соединим математический маятник с метрономом (рис. 16). Изменяя частоту колебаний маятника метронома, добиваемся увеличения амплитуды колебаний математического маятника. Оказывается, что его амплитуда будет максимальной при совпадении собственной частоты колебаний маятника и маятника метронома.

Колебания тел под действием внешней периодической силы называются **вынужденными**, а сила — **вынуждающей**. В слу-

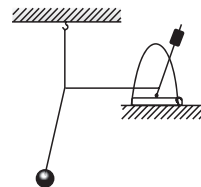


Рис. 16. Наблюдение явления резонанса в системе математического маятника

чае гармонической силы:  $F(t) = F_0 \sin \omega t$  или  $F(t) = F_0 \cos \omega t$ . Вначале действия внешней силы наблюдается достаточно сложное движение тела. Спустя некоторое время после начала действия внешней силы колебания приобретают стационарный характер и не зависят от начальных условий. Таким образом, при вынужденных колебаниях система полностью «забывает» свое начальное состояние. Частота установившихся вынужденных колебаний всегда равна частоте вынуждающей силы.

Амплитуда колебаний и энергия, передаваемая системе за период вынужденных колебаний, зависят от того, насколько различаются частота  $\omega$  вынуждающей силы и частота  $\omega_0$  собственных колебаний, а также от величины трения в системе.

При вынужденных колебаниях возможно явление, называемое *резонансом* (от лат. *resono* — откликаюсь, звучу в ответ).

**Резонанс** — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при действии на колебательную систему внешней силы с частотой  $\omega$ , совпадающей с собственной частотой  $\omega_0$  системы ( $\omega = \omega_0$ ) (рис. 17).

Подвесим на упругой нити ( $AB$ ) четыре математических маятника с одинаковыми грузами, три из которых имеют различную длину, а длина четвертого равна длине второго (рис. 18). Сначала посмотрим, что будет с маятниками, если раскачать первый или третий маятник. Наблюдения показывают, что через некоторое время начнут качаться и остальные маятники. Но амплитуда их колебаний мала, и вскоре колебания затухают. А вот если раскачать второй маятник, то амплитуда колебаний четвертого будет непрерывно возрастать, пока не достигнет наибольшего значения.

Это происходит потому, что частота собственных колебаний четвертого маятника совпадает с частотой колебаний внешней силы (частотой колебаний второго маятника), так как их длины равны. А колебания первого и третьего маятников, как и в первом эксперименте, быстро затухают.

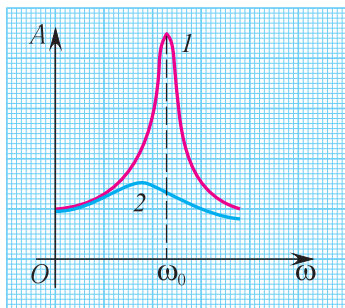


Рис. 17. Резонанс: 1 — малая сила трения; 2 — большая сила трения

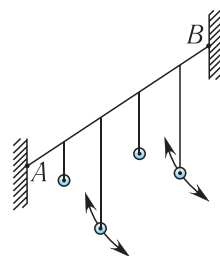


Рис. 18. Наблюдение явления резонанса в системе маятников

При резонансе создаются оптимальные условия для передачи системе энергии от внешнего источника, так как в течение всего периода работа внешней силы над системой положительна. Вспомните процесс раскачивания на качелях: если качели толкать очень быстро или очень медленно, их практически невозможно будет раскачать. Если же подбирать частоту толчков, близкую к частоте собственных колебаний качелей, то раскачивание будет эффективным.

Большинство сооружений и машин, обладая определенной упругостью, способны совершать свободные колебания. Поэтому при внешних периодических воздействиях в них вследствие явления резонанса могут возбуждаться колебания большой амплитуды, которые могут привести к разрушительным последствиям. Например, для исключения разрушения мостов вследствие явления резонанса при прохождении по ним войсковых частей приказывают идти вольным шагом (не в ногу). Поезда переезжают мосты либо очень медленно, либо с максимальной скоростью.



В 1750 г. цепной мост вблизи г. Анжер (Франция) был разрушен в результате резонанса, во время прохождения по нему отряда солдат, так как частота их шага совпала с частотой свободных колебаний моста.

В 1906 г. в г. Петербурге (Россия) обрушился Египетский мост, по которому проходил кавалерийский эскадрон.

7 ноября 1940 г. сильный порыв ветра вызвал резонансные колебания Такома-ского моста (США), что привело к его разрушению.



1. Какие колебания называются незатухающими?
2. Какие колебания называются свободными (собственными)?
3. Почему колебания реального маятника затухают с течением времени?
4. От чего зависит частота собственных колебаний?
5. Какие колебания называются вынужденными?
6. От чего зависит частота вынужденных колебаний?
7. Почему для возникновения колебаний в системе внешняя сила должна быть периодической?
8. Что такое резонанс?
9. Вода, которую мальчик несет в ведре, начинает сильно расплескиваться. Почему расплескивание прекращается при изменении темпа ходьбы?

### Пример решения задачи

Определите модуль скорости  $v$  движения поезда, при которой математический маятник, подвешенный в вагоне, особенно сильно раскачивается. Длина маятника  $l = 11$  см, длина рельса  $L = 12,5$  м.

Дано:

$$l = 11 \text{ см} = 0,11 \text{ м}$$

$$L = 12,5 \text{ м}$$

 $v = ?$ 

Решение

Маятник начинает сильно раскачиваться, когда частота его собственных колебаний

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

совпадает с частотой вынуждающей силы

$$\nu_2 = \frac{1}{T} = \frac{v}{L},$$

которая совпадает с частотой ударов колес вагона о стыки рельсов:  $\nu_1 = \nu_2$ .

Отсюда

$$\frac{v}{L} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad v = \frac{L}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad v = \frac{12,5 \text{ м}}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{0,11 \text{ м}}} = 19 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $v = 19 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

#### Упражнение 4

1. Для чего все вибрирующие установки высотных зданий (электродвигатели, дизельные установки и т. д.) ставятся на специальные резиновые или металлические амортизаторы?

2. Какой длины  $l$  математический маятник необходимо подвесить в вагоне, чтобы он раскачивался наиболее сильно при движении поезда со скоростью, модуль которой  $v = 72,0 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , если расстояние между стыками рельсов  $L = 15,0 \text{ м}$ ?

3. Через ручей переброшена длинная узкая доска. Когда девочка стоит на ней неподвижно, доска прогибается на  $\Delta x = 10 \text{ см}$ . Определите длину  $l$  шагов девочки, при которых доска начнет раскачиваться так, что девочка с трудом будет удерживать равновесие при движении со скоростью, модуль которой  $v = 3,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .

### § 5. Распространение колебаний в упругой среде.

#### Продольные и поперечные волны

Что будет происходить, если горизонтальные пружинные маятники соединить друг с другом в цепочку (рис. 19) и подействовать на один из шариков (например, первый) периодической внешней силой, направленной вдоль цепочки?

Поскольку между телами цепочки действуют силы упругости, обусловленные пружинами, то в колебательное движение вдоль цепочки с той же частотой придут

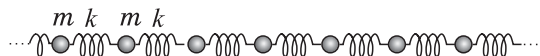


Рис. 19. Цепочка соединенных пружинами шариков

и все последующие шарики. Будет происходить процесс распространения колебаний, но колебания каждого последующего шарика будут запаздывать по сравнению с колебаниями предыдущего. Это запаздывание обусловлено инертностью шариков, смещения которых определяют силы упругости пружин.

Рассмотренная система (цепочка шариков, связанных между собой пружинами) представляет собой простейшую (одномерную) модель *упругой среды*. **Упругой** называется среда, частицы которой связаны между собой силами упругости.

Результаты экспериментов показывают, что колебания, возбужденные в какой-либо точке упругой среды, с течением времени передаются в ее другие точки. Так, от камня, брошенного в спокойную воду озера, кругами расходятся волны, которые со временем достигают берега. Колебания сердца, расположенного внутри грудной клетки, можно ощутить на запястье, что используется для определения пульса. Перечисленные примеры связаны с явлением распространения *механических колебаний в среде*.

**Механической (упругой) волной** называется процесс распространения колебаний в упругой среде, который *сопровождается передачей энергии* от одной точки среды к другой.



Механические волны не могут распространяться в безвоздушном пространстве.

Источником механических волн всегда является какое-либо колеблющееся тело. Колеблющееся тело, которое создает волновое движение в окружающей среде, называется *источником колебаний (вибратором)*. Механизм образования волны можно представить следующим образом. Источник колебаний (например, камертон) воздействует на частицы упругой среды, соприкасающиеся с ним, и заставляет их совершать вынужденные колебания (рис. 20). Среда вблизи

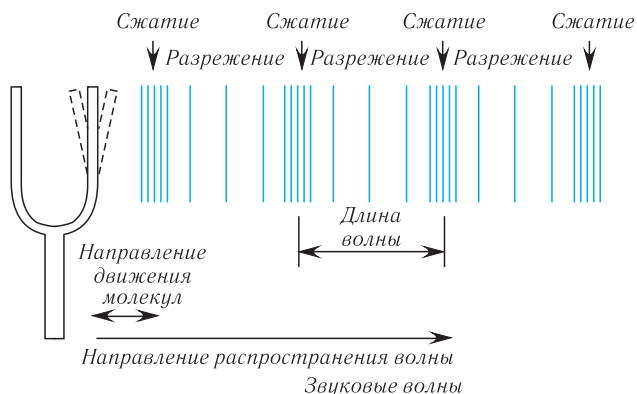


Рис. 20. Образование звуковых волн при колебании камертона

источника деформируется, и в ней возникают силы упругости, препятствующие деформации. Если частицы среды сближаются, то возникающие силы их отталкивают, а если удаляются друг от друга, то, наоборот, притягивают. Постепенно силы будут действовать на все более удаленные от источника частицы среды, приводя их в колебательное движение. В результате оно будет распространяться в виде волны.

Если источник колебаний колеблется синусоидально, то и волна в упругой среде будет иметь форму синусоиды. Колебания, вызванные в каком-либо месте упругой среды, распространяются в ней с определенной скоростью, зависящей от плотности и упругих свойств среды.

Подчеркнем, что при распространении волн *отсутствует перенос вещества*, т. е. частицы среды при этом колеблются вблизи положений равновесия.

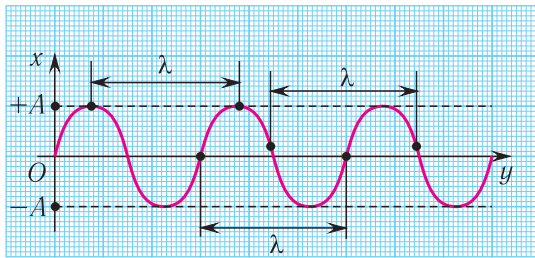


Рис. 21. Основные характеристики волны

**амплитуда** ( $A$ ) — модуль максимального смещения точек среды из положений равновесия при колебаниях;

**период** ( $T$ ) — время полного колебания (период колебаний точек среды равен периоду колебаний источника волны):

$$T = \frac{\tau}{N},$$

где  $\tau$  — промежуток времени, в течение которого совершаются  $N$  колебаний;

**частота** ( $\nu$ ) — число полных колебаний, совершаемых в данной точке в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{\tau},$$

частота волны определяется частотой колебаний источника;

**длина волны** ( $\lambda$ ) — наименьшее расстояние между двумя точками, колебания в которых происходят в одинаковой фазе, т. е. расстояние, на которое волна распространяется за промежуток времени, равный периоду колебаний источника:

$$\lambda = \nu T;$$

**Волновой фронт** (волновая поверхность) — это поверхность, все точки которой колеблются в одинаковых фазах, т. е. это поверхность равных фаз. Если волновыми поверхностями являются плоскости, то волна называется *плоской*.

Основными характеристиками волны являются (рис. 21):



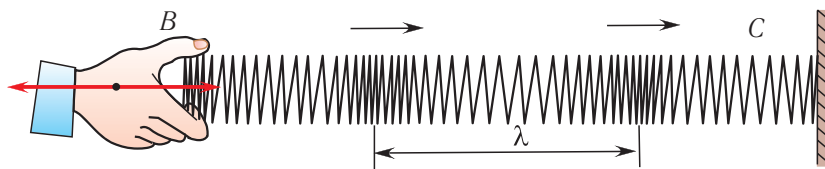


Рис. 22. Продольная волна

**скорость распространения волны** ( $v$ ) — это скорость распространения гребня волны или любой другой точки волны с определенной фазой (это не скорость частиц), модуль этой скорости:

$$v = \lambda \nu.$$

**Бегущую волну** можно наблюдать, проведя следующий эксперимент. Если один конец резинового шнура, лежащего на гладком горизонтальном столе, закрепить и, слегка натянув шнур рукой, привести его второй конец в колебательное движение в направлении, перпендикулярном шнуру, то по нему побежит волна.

Волна называется **продольной**, если колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волны. Распространение волн вдоль цепочки горизонтальных пружинных маятников (см. рис. 19) является примером распространения продольных упругих волн. При этом распространение волны сопровождается образованием сгущений и разрежений вдоль направления ее распространения.

Продольную волну легко получить с помощью длинной пружины, которая лежит на гладкой горизонтальной поверхности и один конец ее закреплен. Легким ударом по свободному концу  $B$  пружины мы вызовем появление волны (рис. 22). При этом каждый виток пружины будет колебаться вдоль направления распространения волны  $BC$ . Упругие волны в газах и жидкостях возникают только при сжатии или разрежении среды и не могут возникать при сдвиге частиц жидкости или газа. Поэтому в таких средах возможно распространение только продольных волн.

Волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Поперечная волна будет распространяться вдоль цепочки пружинных маятников (рис. 23), если на один из них подействовать периодичес-

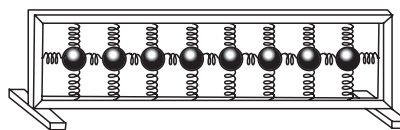


Рис. 23. Устройство для демонстрации продольных и поперечных волн

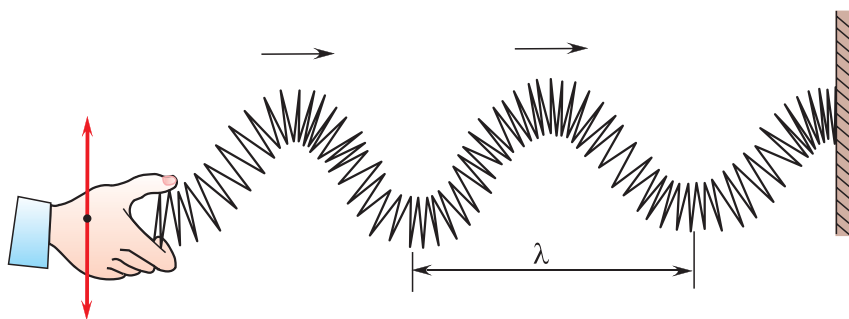


Рис. 24. Поперечная волна

кой силой, направленной перпендикулярно цепочке. Используя длинную пружину, можно также продемонстрировать распространение поперечных волн, если совершать колебания незакрепленного конца перпендикулярно продольной оси пружины (рис. 24).

В отличие от жидкостей и газов в твердых телах возможно распространение и поперечных волн, так как они возникают при смещении или сдвиге одних слоев среды относительно других. Вследствие того что распространение продольных волн связано с деформацией сжатия, поперечных — с деформацией сдвига, а упругие свойства тел в отношении этих видов деформации неодинаковы, то и скорости их распространения будут отличаться. Например, в стали поперечные волны распространяются со скоростью, модуль которой  $3300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а продольные —  $6100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



Землетрясения являются источниками сейсмических волн, причем они могут быть как продольными, так и поперечными. Вследствие того что скорости продольных волн больше, чем скорости поперечных, по времени запаздывания поперечной волны можно определить расстояние до очага землетрясения.



1. Что называется механической волной?
2. Какими физическими величинами характеризуются волны?
3. Что такое волновой фронт?
4. Что такое длина волны?
5. Как связаны длина волны и частота?
6. Какая волна называется продольной? Поперечной?
7. Какие волны могут распространяться в газах? Жидкостях? Твердых телах?

### Упражнение 5

1. Определите модуль скорости  $v$  распространения волны, если ее длина  $\lambda = 15$  м, а период колебаний  $T = 0,20$  с.

2. Неподвижный наблюдатель за промежуток времени  $t = 20$  с насчитал  $N = 8$  гребней волн, прошедших мимо него. Определите период  $T$  колебаний частиц.

3. Источник частотой  $\nu = 1,0$  кГц и амплитудой  $A = 0,50$  мм возбуждает в упругом шнуре волны длиной  $\lambda = 0,70$  м. Определите: а) модуль скорости  $v$  распространения волны; б) модуль максимальной скорости  $v_{\max}$  колеблющихся точек шнура.

4. Волна от катера, проходящего по озеру, дошла до берега через промежуток времени  $t = 5,0$  мин, причем расстояние между соседними гребнями оказалось равным  $l = 1,5$  м, а промежуток времени между двумя последовательными ударами волн о берег  $\Delta t = 4,0$  с. На каком расстоянии  $L$  от берега проходил катер?

5. Рыболов заметил, что за промежуток времени  $t = 20$  с поплавок совершил  $N_1 = 40$  колебаний на волнах. При этом расстояние между берегом и рыболовом  $l = 12$  м и на этом расстоянии укладывается  $N_2 = 20$  гребней волны. Определите модуль  $v$  скорости распространения волны.

6. Определите расстояние  $l$  от сейсмической станции до места землетрясения, если приход продольной и поперечной волн на станции был зарегистрирован с интервалом  $t = 4,0$  мин. Модуль скорости распространения продольной волны  $v_{\parallel} = 9,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , поперечной —  $v_{\perp} = 5,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

## § 6. Звук

Особенно важное место среди всех типов упругих волн занимают звуковые волны (звуки). Мир окружающих нас звуков разнообразен и сложен, однако мы достаточно легко ориентируемся в нем и можем безошибочно отличить пение птиц от шума городской улицы.

Рассмотрим в качестве примера источника звука барабан (рис. 25). Мембрана барабана создает попеременно сжатие и разрежение в прилегающей к ней области воздуха, и образуется про-

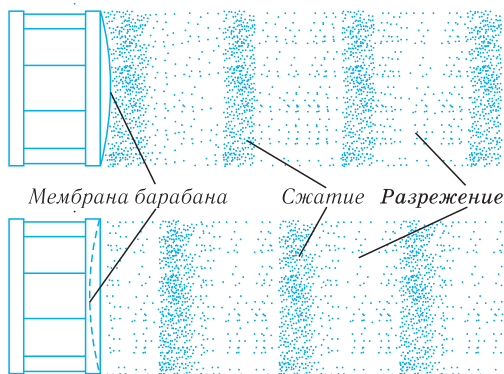


Рис. 25. Образование звуковой волны, создаваемой мембраной барабана

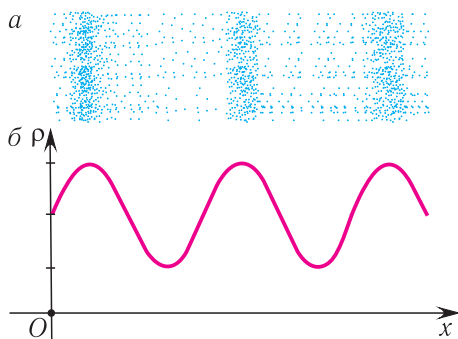


Рис. 26. Зависимость плотности  $\rho$  воздуха от координаты  $x$  в продольной волне

дольная волна, которая распространяется в воздухе. Графически ее можно представить как зависимость плотности молекул воздуха от координаты (рис. 26).

Таким образом, в процессе распространения звуковой волны с течением времени изменяются такие характеристики среды, как плотность и давление.

Для распространения звуковых волн необходимы среды с упругими свойствами. Если поместить источник звука (звонок) под колокол воздушного насоса и постепенно откачивать воздух, то звук стано-

вится все слабее и слабее, а затем исчезает. Следовательно, звуковые волны в безвоздушном пространстве не распространяются.

Если окружить звонок слоем пористого материала (поролона, ваты, войлока и т. п.), то звуковые волны в нем быстро затухают. Поэтому такие материалы широко используются для звукоизоляции.

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются **звуковыми волнами** или просто **звуком**. Человеческое ухо воспринимает звук в частотном диапазоне от 16 до 20 000 Гц.

Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется **акустикой**.

Звуковые волны классифицируются по частоте следующим образом (рис. 27):

инфразвук ( $\nu < 16$  Гц);

слышимый человеком звук ( $16 \text{ Гц} < \nu < 20\,000 \text{ Гц}$ );

ультразвук ( $20\,000 \text{ Гц} < \nu < 10^9 \text{ Гц}$ );

гиперзвук ( $10^9 \text{ Гц} < \nu < 10^{12} \text{ Гц} - 10^{13} \text{ Гц}$ ).



Рис. 27. Шкала звуковых волн



Многие животные могут воспринимать ультразвуки. Например, собаки могут слышать звуки частотой до 50 000 Гц, а летучие мыши — до 100 000 Гц.

Инфразвук, распространяясь в воде на сотни километров, помогает китам и многим другим морским животным ориентироваться в толще воды.

Основными физическими характеристиками звука являются *интенсивность* и *спектральный состав (спектр)*.

Для характеристики энергии, переносимой волнами, используется понятие **интенсивности** волны ( $I$ ), определяемое как энергия ( $W$ ), переносимая волной

в единицу времени ( $\Delta t = 1$  с) через поверхность площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ , расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны:

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

Другими словами, интенсивность представляет собой мощность ( $P$ ), переносимую волнами через поверхность единичной площади перпендикулярно к направлению распространения волны.

Единицей интенсивности в СИ является **1 ватт на метр в квадрате** ( $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ).



Уровень интенсивности звука  $L$  определяют обычно, используя шкалу, единицей которой является **1 бел (Б)** или ее дольная единица — **1 децибел (дБ)** (одна десятая бела). Уровень интенсивности самого слабого звука, который воспринимает наше ухо, соответствует 1 белу (1 Б). Единица названа в честь изобретателя телефона Александра Белла.

Так, поезд метро создает уровень интенсивности звука 100 дБ, мощные усилители — 120 дБ, а реактивный самолет — 150 дБ. Тем, кто при работе подвергается воздействию шума свыше 100 дБ, следует пользоваться наушниками.

Интенсивность звука, улавливаемого ухом человека, лежит в очень широких пределах: от  $1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  (*порог слышимости*) до  $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  (*порог болевого ощущения*) (рис. 28).

Минимальная интенсивность, при которой ухо человека перестает воспринимать звук, называется **порогом слышимости**. Кривая порога слышимости для всего звукового диапазона приведена на рисунке 28 (в логарифмическом масш-

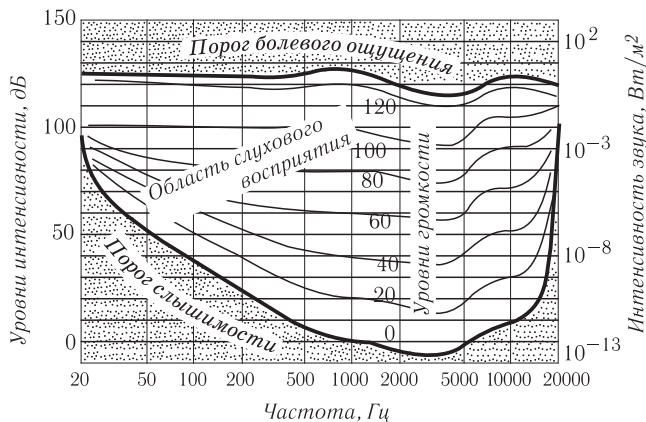


Рис. 28. Диаграмма восприятия звука ухом человека

табе). Наиболее чувствительно наше ухо к волнам частотой примерно 3 кГц, так как интенсивности порядка  $10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  уже достаточно, чтобы ухо восприняло звук. А для того, чтобы услышать звук на частоте 50 Гц, его интенсивность должна быть примерно в 100 000 раз больше, т. е. порядка  $10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

При значительной интенсивности колебаний ухо перестает воспринимать колебания как звук, испытывая при этом болевое ощущение. Такая интенсивность, выше которой отмечается боль, называется **порогом болевого ощущения**. Порог болевого ощущения соответствует интенсивности, равной примерно  $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .



Реактивный самолет может создать звук интенсивностью порядка  $10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , мощные усилители на концерте в закрытом помещении — до  $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , поезд метро —  $10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

В технике предпочитают измерять изменение интенсивности звука не по изменению энергии волны (на диаграмме справа), а в других единицах — децибелах (на диаграмме слева).

Таким образом, для возникновения звуковых ощущений необходимо:

наличие источника звука;

наличие упругой среды между источником звука и ухом;

частота колебаний источника звука должна находиться в пределах 16—20 000 Гц;

мощность звуковых волн должна быть достаточной для того, чтобы вызывать ощущение звука.

**Спектр** называется набор звуков различных частот, образующих данный звуковой сигнал. Спектр может быть *сплошным* или *дискретным*.

**Сплошной спектр** означает, что в данном наборе присутствуют волны, частоты которых заполняют весь заданный спектральный диапазон.

**Дискретный спектр** означает наличие конечного числа волн с определенными частотами и амплитудами, которые образуют рассматриваемый сигнал.

По типу спектра звуки разделяются на *шумы* и *музыкальные тоны*.

**Шум** — совокупность разнообразных кратковременных звуков (*хруст, шелест, шорох, стук* и т. п.) — представляет собой наложение большого числа колебаний с близкими амплитудами, но различными частотами (*имеет сплошной спектр*).

**Музыкальный тон** создается периодическими колебаниями звучащего тела (*камертон, струна*) и представляет собой гармоническое колебание одной час-

тоты. На основе музыкальных тонов создана музыкальная азбука — *ноты* (*до, ре, ми, фа, соль, ля, си*), которые позволяют воспроизводить одну и ту же мелодию на различных музыкальных инструментах. Интервал частот музыкальных звуков, на границах которого звуки по частоте отличаются в 2 раза, называют *октавой*.

**Музыкальный звук (созвучие)** — результат наложения нескольких одновременно звучащих музыкальных тонов, из которых можно выделить **основной тон**, соответствующий наименьшей частоте. Основной тон называется также *первой гармоникой*. Все остальные тоны называются **обертонами**. Обертоны называются *гармоническими*, если частоты обертонов кратны частоте основного тона. Таким образом, музыкальный звук имеет *дискретный спектр*.

Физическим характеристикам звука соответствуют определенные (субъективные) характеристики, связанные с восприятием его конкретным человеком. Это обусловлено тем, что восприятие звука — процесс не только физический, но и физиологический. Человеческое ухо воспринимает звуковые колебания определенных частот и интенсивностей (это объективные, не зависящие от человека характеристики звука) по-разному, в зависимости от «характеристик приемника» (здесь влияют субъективные индивидуальные черты каждого человека).

Основными физиологическими характеристиками звука являются *громкость, высота и тембр*.

**Громкость** (степень слышимости звука) определяется как интенсивностью звука (амплитудой колебаний в звуковой волне), так и различной чувствительностью человеческого уха на разных частотах. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в диапазоне частот от 1000 до 5000 Гц.



С возрастом порог слышимости человека возрастает. Следует отметить, что болевой порог изменяется в зависимости от частоты не столь существенно, как порог слышимости.

При увеличении интенсивности в 10 раз уровень громкости увеличивается на 20 дБ. Вследствие этого звук в 50 дБ оказывается в 100 раз интенсивнее звука в 30 дБ.

**Высота звука** определяется частотой звуковых колебаний, обладающих наибольшей интенсивностью в спектре.

**Тембр** (оттенок звука) зависит от того, сколько *обертонов* присоединяются к *основному тону* и какова их интенсивность и частота. По тембру мы легко отличаем звуки скрипки и рояля, флейты и гитары, голоса людей (табл. 2) и т. д.

Таблица 2. Частота колебаний различных источников звука

Источник звука	$\nu$ , Гц	Источник звука	$\nu$ , Гц
<i>Мужской голос:</i>	80—500	Контрабас	60—8000
бас	80—350	Виолончель	70—8000
баритон	100—400	Труба	60—6000
тенор	130—500	Саксофон	80—8000
<i>Женский голос:</i>	170—1400	Рояль	90—9000
контральто	170—780	<i>Музыкальные тоны</i>	
меццо-сопрано	200—1000	(первая октава):	
сопрано	250—1300	нота <i>до</i>	261,63
колоратурное сопрано	260—1400	нота <i>ре</i>	293,66
Орган	22—16 000	нота <i>ми</i>	329,63
Флейта	260—15 000	нота <i>фа</i>	349,23
Скрипка	260—15 000	нота <i>соль</i>	392,0
Арфа	30—15 000	нота <i>ля</i>	440,0
Барабан	90—14 000	нота <i>си</i>	493,88

Модуль скорости звука зависит от упругих свойств, плотности и температуры среды. Чем больше упругие силы, тем быстрее передаются колебания частиц соседним частицам и тем быстрее распространяется волна. Поэтому модуль скорости звука в газах меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях, как правило, меньше, чем в твердых телах (табл. 3).

Модуль скорости звука в идеальных газах с ростом температуры растет пропорционально  $\sqrt{T}$ , где  $T$  — абсолютная температура. В воздухе модуль скорости

Таблица 3. Скорость звука в различных средах

Среда	$t$ , °C	$v$ , $\frac{м}{с}$
Воздух	0	331
Воздух	20	343
Вода	20	1490
Глицерин	20	1920
Ртуть	20	1450
Лед	0	3280
Сталь	20	5050
Стекло	20	5300
Чугун	20	3850

звуча  $v = 331 \frac{м}{с}$  при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  и  $v = 343 \frac{м}{с}$  при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ . В жидкостях и металлах модуль скорости звука, как правило, уменьшается с ростом температуры (исключение — вода).

Впервые модуль скорости звука в воздухе был определен в 1640 г. французским физиком Мареном Мерсенном. Он измерял промежуток времени между моментами появления вспышки и звука при ружейном выстреле. Мерсенн определил, что модуль скорости звука в воздухе равен  $414 \frac{м}{с}$ .





Способ ориентации или исследования окружающих объектов, основанный на излучении ультразвуковых импульсов с последующим восприятием отраженных импульсов (эха) от различных объектов, называется **эхолокацией**, а соответствующие приборы — **эхолокаторами**.

Эхолокацию используют различные китообразные (дельфины), а также летучие мыши, птицы гуахаро, гнездящиеся в глубоких пещерах Венесуэлы и на острове Тринидад, стрижи-салаганы, живущие в пещерах Юго-Восточной Азии. Волны ультразвуковых частот широко используются в медицине в диагностических целях. УЗИ-сканеры позволяют исследовать внутренние органы человека.



1. Какова природа звука и каковы его источники?
2. Как классифицируются звуки?
3. Какой диапазон звуковых частот воспринимает ухо человека?
4. Чему равна скорость распространения звука в воздухе?
5. От чего и как зависит высота звука?
6. В каких пределах находятся частоты инфразвуковых и ультразвуковых волн?
7. Какими основными физическими величинами характеризуется звук?
8. Что такое порог слышимости? Болевой порог?
9. На какой частоте человеческое ухо обладает наилучшей чувствительностью?

### Пример решения задачи

Стальные детали проверяются ультразвуковым дефектоскопом. Определите толщину  $d$  детали и глубину  $h$  расположения дефекта, если после излучения ультразвукового сигнала получены два отраженных сигнала через промежутки времени  $\tau_1 = 0,15$  мс и  $\tau_2 = 0,10$  мс. Модуль скорости распространения ультразвука  $v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Дано:

$$\tau_1 = 0,15 \text{ мс} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$\tau_2 = 0,10 \text{ мс} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$d$  — ?  $h$  — ?

Решение

Так как сигнал проходит деталь туда и обратно, то толщину детали определим по формуле:

$$d = \frac{v\tau_1}{2}; \quad d = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,39 \text{ м.}$$

Аналогично определяется глубина, на которой находится дефект:

$$h = \frac{v\tau_2}{2}; \quad h = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,26 \text{ м.}$$

Ответ:  $d = 0,39$  м;  $h = 0,26$  м.

### Упражнение 6

1. Расстояние между двумя железнодорожными станциями  $l = 8,3$  км. Сколько времени ( $\tau_1$ ) распространяется звук от одной станции к другой по воздуху и по стальным рельсам ( $\tau_2$ )? Температура воздуха  $t = 20$  °С.

2. Дельфины испускают ультразвуковые импульсы частотой  $\nu = 250$  кГц. Определите длину волны такого ультразвука в воде ( $\lambda_1$ ) и в воздухе ( $\lambda_2$ ) при температуре  $t = 20$  °С.

3. Определите глубину моря  $H$  в данном месте, если ультразвуковой импульс возвратился на судно через промежуток времени  $t = 0,20$  с после посылки. Модуль скорости распространения ультразвука в морской воде  $v = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

4. Человек видит, как тяжелый камень падает на бетонный тротуар. Некоторое время спустя он слышит два звука от удара камня: один пришел по воздуху, а другой распространялся в бетоне. Промежуток времени между ними  $\Delta t = 1,2$  с. На каком расстоянии  $l$  от человека упал камень, если модуль скорости распространения звука в бетоне  $v_6 = 4500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ? Температура воздуха  $t = 20$  °С.

5. Длина звуковой волны в первой среде втрое больше, чем во второй. Во сколько раз  $k$  изменится модуль скорости распространения звуковой волны при переходе из первой среды во вторую?

6. При выстреле из орудия под углом  $\alpha = 60,0^\circ$  к горизонту снаряд имеет начальную скорость, модуль которой  $v_0 = 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через какой промежуток времени  $t$  после выстрела артиллерист услышит звук от разрыва снаряда на земле? Модуль скорости распространения звука в воздухе  $v_{\text{в}} = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

7. Как по звукам, издаваемым мухой и комаром, определить, кто из них в полете чаще машет крыльями?

8. Почему понижается высота звука циркулярной пилы, когда к ней прижимают доску?

### САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 1

**Периодическим** называется движение, при котором физические величины, характеризующие колебательную систему, через равные промежутки времени принимают одинаковые значения.

**Колебательным** называется движение (процесс), при котором любая характеризующая это движение (процесс) физическая величина поочередно изменяется

то в одну, то в другую сторону от ее значения в положении устойчивого равновесия.

**Периодическим колебательным движением (колебаниями)** называют любой процесс, который обладает свойством повторяемости во времени.

Колебания любой физической природы, описываемые уравнением

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0,$$

являются **гармоническими**, а система, совершающая такие колебания, — **гармонической колебательной системой**, или **гармоническим осциллятором**.

Колебания, при которых зависимость координаты (смещения) тела от времени определяется соотношениями

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

или

$$x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

называются **гармоническими**.

Зависимость координаты от времени  $x(t)$  называется кинематическим **законом гармонических колебаний (законом движения)**.

Колебания материальной точки являются **гармоническими**, если они происходят под действием возвращающей силы, модуль которой прямо пропорционален смещению точки из положения равновесия  $F_x = -kx$ , направленной к положению равновесия колеблющегося тела.

**Амплитуда колебаний**  $A$  ( $A > 0$ ) — максимальное смещение  $x_{\max}$  тела или системы тел из положения равновесия.

**Фаза колебаний**  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  определяет состояние колебательной системы (координаты, скорость, ускорение) в любой момент времени при заданной амплитуде. В начальный момент времени  $t = 0$  она равна начальной фазе  $\varphi_0$ .

Единицей фазы является *1 радиан* (1 рад).

**Циклическая частота**  $\omega$  — число полных колебаний за промежуток времени  $\Delta t = 2\pi$  секунд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

**Период колебания**  $T$  — время одного полного колебания:

$$T = \frac{t}{N}.$$

**Частота колебаний**  $\nu$  — число полных колебаний, совершаемых в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}.$$

Колебательная система, состоящая из тела с прикрепленной к нему пружины, называется **пружинным маятником**. Его период колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Колебательная система, состоящая из небольшого тела, подвешенного на легкой нерастяжимой нити, называется **математическим маятником**.

Период малых колебаний математического маятника определяется по **формуле Гюйгенса**:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

**Собственные (свободные) колебания** — это колебания, происходящие в отсутствие внешних воздействий на систему. Они происходят со строго определенной частотой, называемой **частотой собственных колебаний** системы.

**Затухающими** называются колебания, энергия которых уменьшается с течением времени.

**Вынужденными** называются колебания системы, вызываемые действием на нее периодических внешних сил.

**Резонансом** называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, когда частота периодической внешней силы совпадает с собственной частотой колебаний системы.

**Механической волной** называется процесс распространения колебаний в упругой среде, который *сопровождается передачей энергии* от одной точки среды к другой.

**Длина волны** — расстояние, пройденное волной в среде за промежуток времени, равный периоду колебаний частиц:

$$\lambda = vT.$$

**Скорость распространения волны** — это скорость распространения гребня волны или любой другой точки волны с определенной фазой, модуль которой

$$v = \lambda\nu.$$

Волна называется **продольной**, если колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волны.

Волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются **звуковыми волнами** или просто **звуком**.

Основными физическими характеристиками звука являются *интенсивность* и *спектральный состав (спектр)*.

**Единицы основных величин механических колебаний и волн**

Наименование	Обозначение	Единицы	Выражение через основные единицы в СИ
Частота	$\nu$	Герц ( Гц)	$\text{с}^{-1}$
Период	$T$	Секунда (с)	с
Циклическая (круговая) частота	$\omega$	РадIAN в секунду $\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$	$\text{с}^{-1}$
Амплитуда	$A$	Метр (м)	м
Длина волны	$\lambda$	Метр (м)	м
Модуль скорости волны	$v$	Метр в секунду $\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$

# Глава 2

## Электромагнитные колебания и волны

Правильно ... рассматривать сходство в вещах, далеко отстоящих друг от друга.

Аристотель

### § 7. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Формула Томсона. Превращения энергии в колебательном контуре



Явление возникновения ЭДС в любом контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, называется явлением электромагнитной индукции.

Под явлением самоиндукции понимают возникновение в замкнутом проводящем контуре ЭДС индукции, создаваемой вследствие изменения силы тока в самом контуре.

Правило Ленца: возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, стремится компенсировать изменение магнитного потока, вызвавшее данный ток.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных конденсатора электроемкостью  $C$  и катушки (соленоида) индуктивностью  $L$

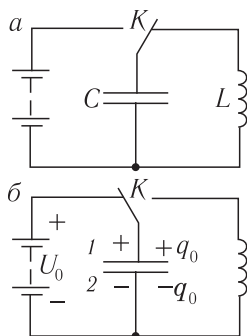


Рис. 29. Колебательный контур (а); зарядка конденсатора от источника (б)

(рис. 29, а), называемую **идеальным колебательным контуром** или **LC-контуром**. Электрическое сопротивление идеального контура считают равным нулю ( $R = 0$ ). Следовательно, идеальный колебательный контур является упрощенной моделью реального колебательного контура.

Подключив (при помощи ключа  $K$ ) источник тока, зарядим конденсатор до напряжения  $U_0$ , сообщив ему заряд  $q_0$  (рис. 29, б). Следовательно, в начальный момент времени ( $t = 0$ ) конденсатор заряжен так, что на его обкладке 1 находится заряд  $+q_0$ , а на обкладке 2 — заряд  $-q_0$ .

При этом электростатическое поле, создаваемое зарядами обкладок конденсатора, обладает энергией  $W_C = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2}$ .

Рассмотрим процесс разрядки конденсатора в колебательном контуре. После соединения заряженного конденсатора с катушкой (при помощи ключа  $K$ ) (рис. 30) он начнет разряжаться, так как под действием электрического поля, создаваемого зарядами на обкладках конденсатора, свободные электроны будут перемещаться по цепи от отрицательно заряженной обкладки к положительно заряженной. На рисунке 30 стрелкой показано начальное направление тока в электрической цепи.

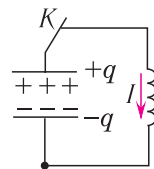


Рис. 30. Прохождение тока в колебательном контуре

Таким образом, в контуре появится нарастающий по модулю электрический ток, сила  $I(t)$  которого будет изменяться с течением времени (рис. 31, а). Но мгновенная разрядка конденсатора невозможна, так как изменение магнитного поля катушки, создаваемое нарастающим по модулю током, вызывает возникновение вихревого электрического поля. Действительно, в катушке индуктивности возникнет изменяющийся во времени магнитный поток, который вызовет появление ЭДС самоиндукции. Согласно правилу Ленца ЭДС самоиндукции стремится противодействовать вызвавшей ее причине, т. е. увеличению силы тока по модулю.

Вследствие этого модуль силы тока в колебательном контуре будет в течение некоторого промежутка времени плавно возрастать от нуля до максимального значения  $I_0$ , определяемого индуктивностью катушки и электроемкостью конденсатора (рис. 31, б).

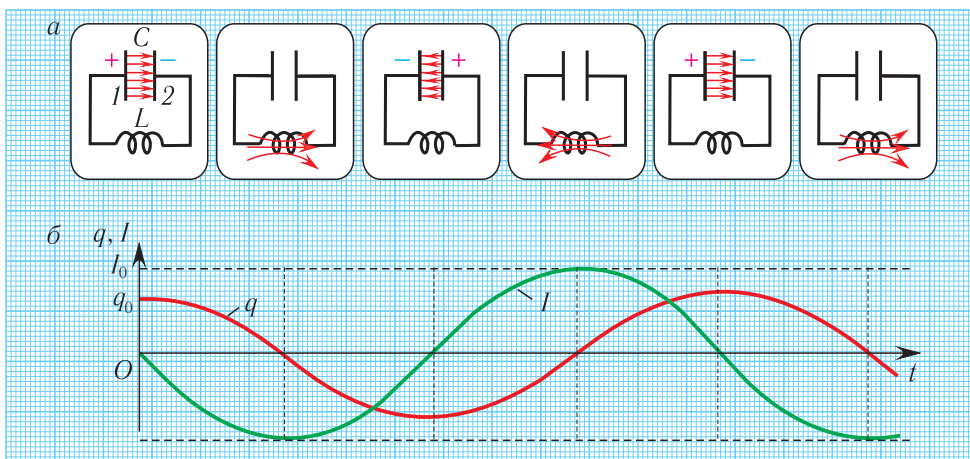


Рис. 31. Электромагнитные колебания в идеальном  $LC$ -контуре (а) и зависимости заряда конденсатора, силы тока в катушке от времени (б)

При разрядке конденсатора энергия его электростатического поля превращается в энергию магнитного поля катушки с током. Согласно закону сохранения энергии суммарная энергия идеального колебательного контура остается постоянной с течением времени (уменьшение энергии электростатического поля конденсатора равно увеличению энергии магнитного поля катушки):

$$\frac{q_0^2}{2C} - \frac{q^2}{2C} = 0 + \frac{LI^2}{2}, \text{ или } \frac{q_0^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2},$$

где  $q(t)$  — мгновенное значение заряда конденсатора и  $I(t)$  — сила тока в катушке в некоторый момент времени  $t$  после начала разрядки конденсатора.

В момент полной разрядки конденсатора ( $q = 0$ ) сила тока в катушке  $I(t)$  достигнет своего максимального по модулю значения  $I_0$  (см. рис. 31, б). В соответствии с законом сохранения энергии запасенная в конденсаторе энергия электростатического поля перейдет в энергию магнитного поля, запасенную в этот момент в катушке:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

После разрядки конденсатора сила тока в катушке начинает убывать по модулю. Это также происходит не мгновенно, поскольку вновь возникающая ЭДС самоиндукции согласно правилу Ленца создает индукционный ток. Он имеет такое же направление, как и уменьшающийся по модулю ток в цепи, и поэтому «поддерживает» его. Индукционный ток, создаваемый ЭДС самоиндукции катушки, перезаряжает конденсатор до начального напряжения  $U_0$ , но знак заряда на каждой обкладке оказывается противоположным знаку начального заряда. Соответственно, к моменту исчезновения тока заряд конденсатора достигнет максимального значения  $q_0$ . При этом его обкладка, первоначально заряженная положительно, будет заряжена отрицательно. Далее процесс повторится с той лишь разницей, что электрический ток в контуре будет проходить в противоположном направлении, что отражено на рисунке 31, а.

Таким образом, в идеальном  $LC$ -контуре будут происходить периодические изменения значений силы тока и напряжения, причем полная энергия контура будет оставаться постоянной. В этом случае говорят, что в контуре возникли *свободные электромагнитные колебания*.

**Свободные электромагнитные колебания** в  $LC$ -контуре — это периодические изменения заряда на обкладках конденсатора, силы тока и напряжения в контуре, происходящие без пополнения энергии от внешних источников.

Таким образом, существование свободных электромагнитных колебаний в контуре обусловлено перезарядкой конденсатора, вызванной возникновением ЭДС



самоиндукции в катушке. Заметим, что заряд  $q(t)$  конденсатора и сила тока  $I(t)$  в катушке достигают своих максимальных значений  $q_0$  и  $I_0$  в различные моменты времени (см. рис. 31 а, б).

Наименьший промежуток времени, в течение которого  $LC$ -контур возвращается в исходное состояние (к начальным значениям заряда на каждой из обкладок), называется **периодом** свободных (собственных) электромагнитных колебаний в контуре.

Получим формулу для периода свободных электромагнитных колебаний в контуре, используя закон сохранения энергии. Поскольку полная энергия идеального  $LC$ -контюра, равная сумме энергий электростатического поля конденсатора и магнитного поля катушки, сохраняется, то в любой момент времени справедливо равенство:

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const.} \quad (1)$$

Процессы, происходящие в колебательном контуре, аналогичны колебаниям пружинного маятника. Для полной механической энергии пружинного маятника в любой момент времени:

$$W_{\text{мех}} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2}, \quad (2)$$

где  $k$  — жесткость пружины,  $m$  — масса груза,  $x$  — проекция смещения тела от положения равновесия,  $v_x$  — проекция его скорости на ось  $Ox$ .

Период его колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3)$$

Проанализируем соотношения (1) и (2). Видно, что энергия электростатического поля конденсатора  $W_C = \frac{q^2(t)}{2C}$  является аналогом потенциальной энергии упругой деформации пружины  $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ . Соответственно, энергия магнитного поля катушки  $W_L = \frac{LI^2(t)}{2}$ , которая обусловлена упорядоченным движением зарядов, является аналогом кинетической энергии груза  $W_{\text{к}} = \frac{mv_x^2}{2}$ . Следовательно, аналогом координаты  $x(t)$  пружинного маятника при колебаниях в электрическом контуре является заряд конденсатора  $q(t)$ . Тогда, соответственно, аналогом проекции скорости груза будет сила тока в колебательном контуре, поскольку сила тока характеризует скорость изменения заряда конденсатора с течением времени.

Следуя проведенной аналогии, заменим в формуле для периода колебаний пружинного маятника массу  $m$  на индуктивность  $L$  и жесткость  $k$  на  $\frac{1}{C}$ , тогда для периода свободных колебаний в  $LC$ -контуре получим формулу:

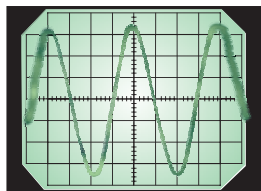
$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (4)$$

которая называется **формулой Томсона**.

Несложные дальнейшие рассуждения позволяют установить аналогии между физическими величинами при электромагнитных и механических колебаниях (табл. 4).

Таблица 4. Сопоставление физических величин, характеризующих механические и электромагнитные колебания

Механические колебания пружинного маятника	Электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре
$m$ (масса тела)	$L$ (индуктивность катушки)
$k$ (жесткость пружины)	$\frac{1}{C}$ (величина, обратная емкости)
$x(t)$ (проекция смещения от положения равновесия или координата)	$q(t)$ (заряд конденсатора)
$v_x(t)$ (проекция скорости тела)	$I(t)$ (сила тока)
$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ (потенциальная энергия упругой деформации пружины)	$W_C = \frac{q^2}{2C}$ (энергия электростатического поля конденсатора)
$W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$ (кинетическая энергия груза)	$W_L = \frac{LI^2}{2}$ (энергия магнитного поля катушки)
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (период колебаний)	$T = 2\pi\sqrt{LC}$ (период колебаний)
$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (циклическая частота колебаний)	$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (циклическая частота колебаний)



Для наблюдения и исследования электромагнитных колебаний применяют электронный осциллограф, на экране которого получают временную развертку колебаний (рис. 32).

Рис. 32. Гармонические электромагнитные колебания на экране осциллографа

Зависимость заряда конденсатора от времени имеет такой же вид, как и зависимость координаты (проекции смещения) тела, совершающего гармонические колебания, от времени:

$$q = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Также по гармоническому закону изменяются сила тока (но с другой начальной фазой) в цепи и напряжение на конденсаторе.

Для определения начальной фазы  $\varphi_0$  и максимального заряда  $q_0$  необходимо знать заряд конденсатора и силу тока в катушке в начальный момент времени ( $t = 0$ ).

Отметим, что колебательный контур, в котором происходит *только* обмен энергией между конденсатором и катушкой, называется *закрытым*.

Полная энергия идеального колебательного контура ( $R = 0$ ) с течением времени сохраняется, поскольку в нем при прохождении тока теплота не выделяется. Реальный колебательный контур всегда имеет некоторое электрическое сопротивление  $R$ , которое обусловлено сопротивлением катушки и соединительных проводов. Это приводит к тому, что электромагнитные колебания в реальном контуре с течением времени затухают, тогда как в идеальном контуре они будут происходить сколь угодно долго.

Таким образом, механическим аналогом идеального колебательного контура является пружинный маятник без учета трения, а механическим аналогом реального колебательного контура — пружинный маятник с учетом трения.



1. Какие электромагнитные колебания в контуре называются свободными?
2. Из каких основных элементов состоит идеальный колебательный контур?
3. От каких физических величин зависит период свободных колебаний в идеальном колебательном контуре?
4. По какому закону изменяются зависимости заряда конденсатора и силы тока в катушке колебательного контура с течением времени?
5. Почему в контуре, состоящем из конденсатора и резистора, не могут возникнуть электромагнитные колебания?
6. В колебательном контуре изменили начальное значение заряда конденсатора. Какие величины, характеризующие электромагнитные колебания в контуре, изменятся, а какие — останутся прежними?
7. Как распределена энергия электромагнитных колебаний между электростатическим полем конденсатора и магнитным полем катушки в идеальном колебательном контуре в моменты времени  $\frac{T}{4}$ ;  $\frac{T}{2}$ ;  $\frac{3T}{4}$ ;  $T$  после начала разрядки конденсатора?
8. Почему свободные электромагнитные колебания в реальном колебательном контуре ( $R \neq 0$ ) являются затухающими?
9. Зависит ли период свободных электромагнитных колебаний от энергии, запасенной в контуре в начальный момент времени?

**Пример решения задачи**

Идеальный колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C = 400$  пФ и катушки индуктивностью  $L = 10$  мГн. Определите максимальное значение силы тока  $I_0$  в контуре, если максимальное значение напряжения на конденсаторе  $U_0 = 500$  В.

Дано:

$$C = 400 \text{ пФ} = 4,00 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$L = 10 \text{ мГн} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$U_0 = 500 \text{ В.}$$

$$I_0 = ?$$

Решение

Максимальная энергия электростатического поля конденсатора:

$$W_C = \frac{CU_0^2}{2},$$

а максимальная энергия магнитного поля катушки:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Так как контур идеальный ( $R = 0$ ), то его полная энергия сохраняется с течением времени. По закону сохранения энергии  $W_C = W_L$ , т. е.

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Отсюда

$$I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}};$$

$$I_0 = 500 \text{ В} \sqrt{\frac{4,00 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}}} = 0,10 \text{ А.}$$

Ответ:  $I_0 = 0,10 \text{ А.}$

**Упражнение 7**

1. Определите период  $T$  свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $C = 15$  мкФ и катушки индуктивностью  $L = 2,5$  мГн.

2. Конденсатор емкостью  $C = 1,2$  мкФ соединен с катушкой индуктивностью  $L = 16$  мкГн. Определите частоту  $\nu$  свободных электромагнитных колебаний в контуре.

3. Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в контуре, если индуктивность  $L$  катушки контура увеличить (уменьшить) в  $n = 16$  раз при неизменной емкости конденсатора?

4. Входной контур радиоприемника содержит катушку индуктивностью  $L = 0,32$  мГн. В каких пределах должна изменяться емкость  $C$  конденсатора конту-

ра, чтобы радиоприемник мог принимать сигналы радиостанции, работающей в диапазоне частот от  $\nu_1 = 8,0$  МГц до  $\nu_2 = 24$  МГц?

5. В колебательном контуре индуктивность катушки  $L = 0,20$  Гн, а максимальное значение силы тока  $I_0 = 40$  мА. Найдите энергию электрического поля  $W_C$  конденсатора и магнитного поля  $W_L$  катушки в тот момент, когда мгновенное значение силы тока в два раза меньше его максимального значения.

6. Идеальный колебательный контур содержит катушку индуктивностью  $L = 2,0$  мГн и плоский конденсатор, площадь каждой обкладки которого  $S = 20$  см<sup>2</sup>, а расстояние между ними  $d = 1,0$  мм. Определите диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  среды, заполняющей пространство между обкладками, если максимальное значение силы тока в контуре  $I_0 = 12$  мА, а максимальное значение напряжения  $U_0 = 10$  В.

## § 8. Вынужденные электромагнитные колебания.

### Переменный электрический ток. Действующие значения силы тока и напряжения



Магнитный поток  $\Phi$  однородного поля через плоскую поверхность равен произведению модуля индукции  $B$  магнитного поля на площадь поверхности  $S$  и косинус угла  $\alpha$  между индукцией  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности:  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

Закон электромагнитной индукции: ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения пронизывающего его магнитного потока, взятой с противоположным знаком:  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Незатухающие электромагнитные колебания находят широкое применение в науке и технике. Для получения незатухающих колебаний необходимо компенсировать потери энергии в контуре. Для механических колебаний это достигается действием периодической внешней силы, в результате чего в системе возникают вынужденные колебания. Аналогично этому **вынужденные электромагнитные колебания** в колебательном контуре происходят под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС или внешнего изменяющегося напряжения. При этом напряжение в цепи и сила тока изменяются как по знаку, так и по модулю.

**Ток, сила и направление которого периодически меняются, называется переменным.**

Основная часть электроэнергии в мире в настоящее время вырабатывается генераторами переменного тока, создающими *синусоидальное напряжение*. Такая же функциональная зависимость силы тока от времени позволяет, по сравнению с другими зависимостями, наиболее просто и экономично осуществлять передачу, распределение и использование электрической энергии.

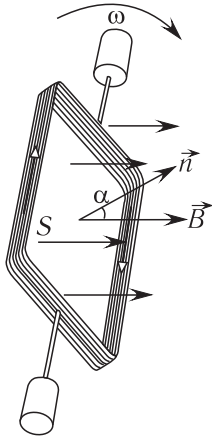


Рис. 33. Вращение проводящей рамки в магнитном поле

Электротехническое устройство, предназначенное для преобразования механической энергии в энергию переменного электрического тока, называется *генератором переменного тока*.

Принцип действия индукционного генератора переменного тока основан на явлении электромагнитной индукции.

Пусть проводящая рамка площадью  $S$  вращается с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси, расположенной в ее плоскости перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля индукцией  $B$  (рис. 33).

При равномерном вращении рамки угол  $\alpha$  между направлениями индукции магнитного поля и нормали к плоскости рамки меняется с течением времени по линейному закону. Если в момент времени  $t_0 = 0$  угол  $\alpha_0 = 0$  (см. рис. 33), то

$$\alpha = \omega t.$$

Подставляя полученное выражение для  $\alpha$  в формулу для магнитного потока через поверхность, ограниченную рамкой,  $\Phi = BS \cos \alpha$ , найдем зависимость этого потока от времени:

$$\Phi(t) = BS \cos \omega t.$$

Поскольку магнитный поток, пронизывающий рамку, изменяется со временем (рис. 34), то в ней согласно закону Фарадея индуцируется ЭДС индукции  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ . Найдем отношение  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  при достаточно малых значениях  $\Delta t$ . Для этого запишем:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \Phi(t + \Delta t) - \Phi(t) = BS(\cos(\omega t + \omega \Delta t) - \cos \omega t) = \\ &= BS(\cos \omega t \cdot \cos \omega \Delta t - \sin \omega t \cdot \sin \omega \Delta t - \cos \omega t). \end{aligned}$$

Поскольку  $\omega \Delta t \ll 1$ , то  $\cos \omega \Delta t \approx 1$  и  $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$ .

Окончательно

$$\Delta \Phi \approx BS(\cos \omega t - \omega \Delta t \cdot \sin \omega t - \cos \omega t) \approx -BS\omega \Delta t \sin \omega t.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -BS\omega \sin \omega t.$$

Следовательно,

$$\mathcal{E}(t) = BS\omega \sin \omega t.$$

Правообладатель Народная асвета

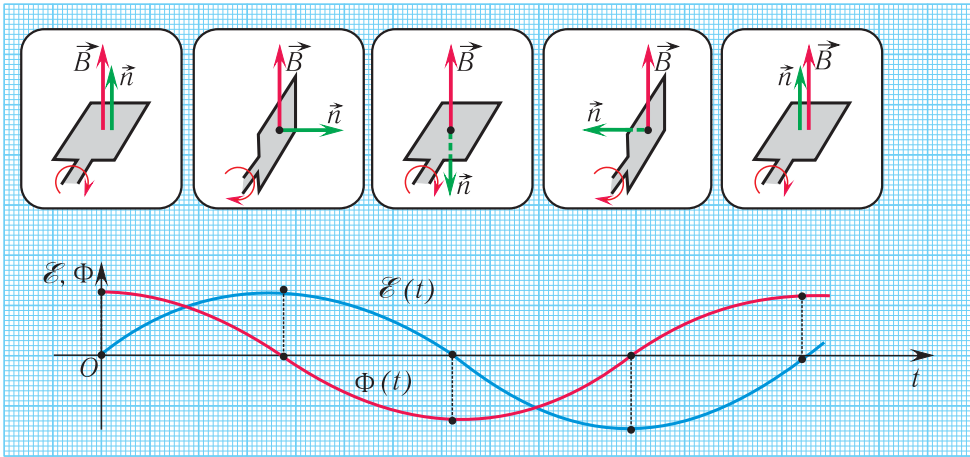


Рис. 34. Возникновение ЭДС индукции при вращении проводящей рамки в магнитном поле

Как видно, ЭДС индукции изменяется по синусоидальному закону:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_0 = BS\omega$  — амплитудное (максимальное) значение ЭДС.

При подключении к выводам рамки устройства, потребляющего энергию, например нагрузки с достаточно большим сопротивлением  $R \gg r$  ( $r$  — сопротивление рамки), по нему будет проходить переменный электрический ток. По закону Ома для полной цепи сила проходящего тока:

$$I = \mathcal{E} \frac{1}{R} = \frac{BS\omega}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $I_0 = \frac{BS\omega}{R}$  — максимальное значение силы тока.

Анализируя выражения (1) и (2), можем сделать вывод, что в цепи, содержащей, кроме рамки, только активное сопротивление  $R$ , колебания напряжения и колебания силы тока совпадают по фазе, одновременно достигая максимумов и минимумов.

В общем случае (например, при наличии в цепи конденсатора и (или) катушки) колебания силы тока в цепи и напряжения на конденсаторе или катушке будут происходить с одинаковой частотой  $\omega$ , но не будут совпадать по фазе:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi),$$

где  $U_0$  — амплитудное значение напряжения на конденсаторе или катушке,  $\Delta\varphi$  — разность фаз колебаний силы тока и напряжения.

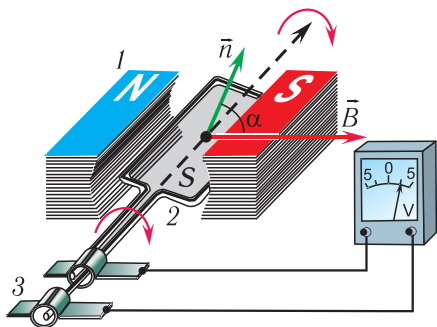


Рис. 35. Части индукционного генератора: 1 — индуктор; 2 — якорь; 3 — коллектор со щетками

Подчеркнем, что ток в цепи проходит в одном направлении в течение полуоборота рамки, а затем меняет направление на противоположное, которое также остается неизменным в течение следующего полуоборота.

Основными частями индукционного генератора переменного тока являются (рис. 35): **индуктор** — постоянный магнит или электромагнит, который создает магнитное поле;

**якорь** — обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС;

**коллектор** — контактные кольца и скользящие по ним контактные пластинки (щетки) — устройство, посредством которого ток снимается или подводится к вращающимся частям.

Неподвижная часть генератора называется **статором**, а подвижная — **ротором**.



В зависимости от конструкции генератора его якорь может быть как ротором, так и статором. Для получения переменных токов большой мощности якорь делают неподвижным, чтобы конструктивно упростить схему передачи тока в промышленную сеть. Кроме того, это делает генератор более надежным в эксплуатации вследствие уменьшения искрения и обгорания щеток.

На современных гидроэлектростанциях падающая вода вращает вал электрогенератора с частотой 1—2 оборота в секунду. Таким образом, если бы якорь генератора имел только одну рамку (обмотку), то получался бы переменный ток частотой 1—2 Гц. Поэтому для получения переменного тока промышленной частотой 50 Гц якорь должен содержать несколько обмоток, позволяющих увеличить частоту вырабатываемого тока до необходимой величины.



Для паровых турбин, ротор которых вращается очень быстро, используют якорь с одной обмоткой. В этом случае частота вращения ротора совпадает с частотой переменного тока, т. е. ротор должен делать  $50 \frac{\text{об}}{\text{с}}$  ( $3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ).

Для увеличения амплитудного значения ЭДС индукции нужно либо увеличивать индукцию магнитного поля, пронизывающего обмотки якоря, либо увеличивать число витков его обмоток. Для увеличения индукции магнитного



поля  $\vec{B}$  обмотку индуктора размещают в стальном сердечнике, а зазор между сердечниками якоря и индуктора делают как можно меньшим.

Мощные генераторы вырабатывают напряжение 15—20 кВ и обладают КПД 97—98 %.

При подключении электрических цепей к источнику переменного тока возникают новые закономерности, которые и рассмотрим ниже.

Пусть источник тока создает переменное гармоническое напряжение:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t.$$

Согласно закону Ома для участка цепи сила тока на участке цепи, содержащем только резистор сопротивлением  $R$  (рис. 36), подключенный к этому источнику, изменяется со временем также по синусоидальному закону:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t,$$

где  $I_0 = \frac{U_0}{R}$ .

Сила тока во всей такой цепи также меняется с течением времени по синусоидальному закону.

Максимальные величины напряжения и силы тока  $U_0$ ,  $I_0$  называются **амплитудными значениями напряжения и силы тока** соответственно.

Значения напряжения  $U(t)$  и силы тока  $I(t)$  в любой момент времени называются **мгновенными**. Зная мгновенные значения  $U(t)$  и  $I(t)$ , можно вычислить мгновенную мощность переменного тока  $P(t) = U(t)I(t)$ , которая, в отличие от цепей постоянного тока, изменяется с течением времени.

С учетом зависимости силы тока от времени перепишем выражение для мгновенной мощности на резисторе сопротивлением  $R$  в цепи переменного тока в виде:

$$P(t) = U(t)I(t) = I^2(t)R = I_0^2 R \sin^2 \omega t.$$

Поскольку мгновенная мощность изменяется со временем, то использовать эту величину на практике в качестве характеристики длительно протекающих процессов крайне неудобно.

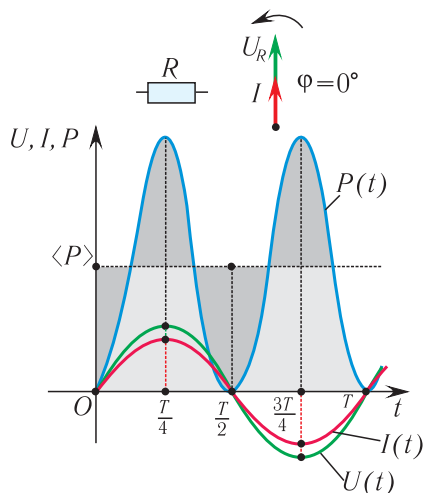


Рис. 36. Зависимости  $U$ ,  $I$  и  $P$  от времени в электрической цепи с активным сопротивлением

Перепишем формулу для мгновенной мощности по-другому:

$$P = UI = U_0 I_0 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} U_0 I_0 (1 - \cos 2\omega t) = \frac{U_0 I_0}{2} - \frac{U_0 I_0}{2} \cos 2\omega t.$$

Первое слагаемое не зависит от времени. Второе слагаемое — переменная составляющая — функция косинуса двойного угла. Ее среднее значение за промежуток времени, равный (или кратный) периоду колебаний, равно нулю ( $\langle \cos 2\omega t \rangle = 0$ ) вследствие того, что половину периода косинус имеет положительные значения, а другую половину периода — такой же набор отрицательных значений.

Поэтому среднее значение мощности переменного электрического тока за длительный по сравнению с периодом колебаний промежуток времени можно найти по формуле:

$$\langle P \rangle = \frac{U_0 I_0}{2} = \frac{I_0^2 R}{2}.$$

Это выражение позволяет ввести *действующие (эффективные)* значения силы тока и напряжения, которые используются в качестве основных характеристик переменного тока.

**Действующее (эффективное) значение** силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, который, проходя в электрической цепи по резистору сопротивлением  $R$ , выделяет за промежуток времени, кратный периоду колебаний ( $\tau = nT$ ), такое же количество теплоты, что и данный переменный ток.

Поскольку для постоянного тока  $P_{\text{пост}} = I^2 R$ , то с учетом ранее полученного выражения для среднего значения мощности переменного тока *действующее значение силы синусоидального переменного тока*:

$$I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично можно ввести *действующее значение* и для напряжения:

$$U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, выражения для расчета мощности, потребляемой резисторами в цепях постоянного тока, аналогичны и для переменного тока, если использовать в них действующие значения силы тока и напряжения:

$$P = U_d I_d = I_d^2 R = \frac{U_d^2}{R};$$

$$I_d = \frac{U_d}{R}.$$

В цепях переменного тока большинство электроизмерительных приборов измеряют действующие значения тока и напряжения. Так, например, действующим значением напряжения в Беларуси в бытовых сетях переменного тока является  $U_d = 220 \text{ В}$ .

Необходимо отметить, что закон Ома для участка цепи переменного тока, содержащего только резистор сопротивлением  $R$ , выполняется как для амплитудных и действующих, так и для мгновенных значений напряжения и силы тока вследствие того, что их колебания совпадают по фазе (см. рис. 36).

Таким образом, резисторы оказывают сопротивление как постоянному, так и переменному току, при этом в обоих случаях в них происходит превращение электрической энергии в энергию теплового движения частиц. Вследствие этого сопротивление резисторов  $R$  получило название **активного** или **омического** сопротивления.



1. Для чего служит генератор переменного тока?
2. На каком явлении основана работа индукционного генератора переменного тока?
3. Из каких основных частей состоит индукционный генератор переменного тока?
4. Объясните назначение каждой части генератора.
5. Почему в рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, возбуждается ЭДС и от каких величин она зависит?
6. Какой ток называют переменным?
7. Что такое период, частота, фаза переменного тока?
8. Какое значение переменного тока называют мгновенным? Амплитудным?
9. Что называется действующим значением силы переменного тока?
10. Когда для расчета мощности переменного тока можно пользоваться формулой  $P = UI$ ?

### Упражнение 8

1. Включенный в сеть переменного тока вольтметр показывает напряжение  $U = 220 \text{ В}$ . Определите амплитудное значение напряжения  $U_0$  в сети.

2. В цепи переменного тока напряжение изменяется по закону  $U = U_0 \sin \omega t$ , где  $U_0 = 200 \text{ В}$ ,  $\omega = 50\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определите частоту  $\nu$  переменного тока, а также действующее значение напряжения  $U_d$  в цепи. На какое напряжение  $U$  должна быть рассчитана изоляция проводов?

3. Сила тока в цепи переменного тока изменяется по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ , где  $I_0 = 3,0 \text{ А}$ ,  $\omega = 100\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определите частоту  $\nu$  колебаний тока в цепи и действующее значение силы тока  $I_d$ .

4. Напряжение на участке электрической цепи, по которому проходит переменный ток, изменяется со временем по закону  $U = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$ . Определите

амплитудное значение напряжения  $U_0$ , если в момент времени  $t = \frac{T}{6}$  мгновенное значение напряжения  $U = 6,0$  В.

5. Плоский проводящий виток площадью  $S = 0,12$  м<sup>2</sup> равномерно вращается в однородном магнитном поле, совершая  $n = 5,0 \frac{\text{об}}{\text{с}}$  вокруг оси, расположенной в плоскости витка и перпендикулярной линиям индукции. Как изменяется ЭДС индукции в витке с течением времени, если модуль индукции магнитного поля  $B = 50$  мТл и в начальный момент времени плоскость витка перпендикулярна линиям индукции магнитного поля? Определите амплитудное значение ЭДС  $\mathcal{E}_0$  в витке.

## § 9. Преобразование переменного тока. Трансформатор

Генераторы переменного тока создают в расчете на определенные значения напряжения. Для практического использования электрической энергии во всевозможных устройствах и приборах необходимы различные значения напряжений. Для этого используются *трансформаторы* (от лат. transformo — преобразую). Первую модель (прототип) трансформатора создал в 1831 г. Майкл Фарадей, намотав на железное кольцо две изолированные обмотки, которую использовал в своих экспериментах. Трансформатор был впервые использован для изменения напряжения в 1878 г. русским ученым Павлом Николаевичем Яблочковым для питания изобретенных им источников света — «электрических свечей».

**Трансформатор** (рис. 37, а) — это электромагнитное устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения с сохранением его частоты.

Трансформатор, увеличивающий напряжение, называют *повышающим*, а уменьшающий напряжение — *понижающим*. Схематическое изображение и условное обозначение трансформатора показаны на рисунке 37 б, в.

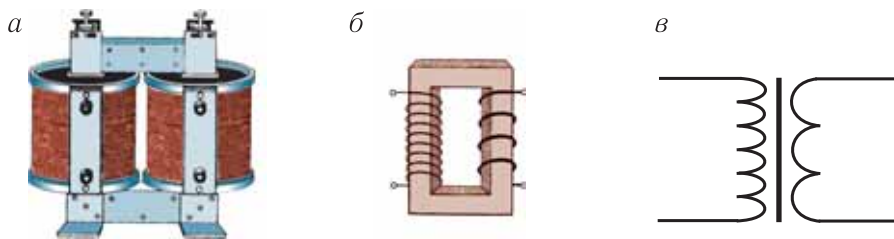


Рис. 37. Трансформатор: а — общий вид; б — схематическое изображение; в — условное обозначение

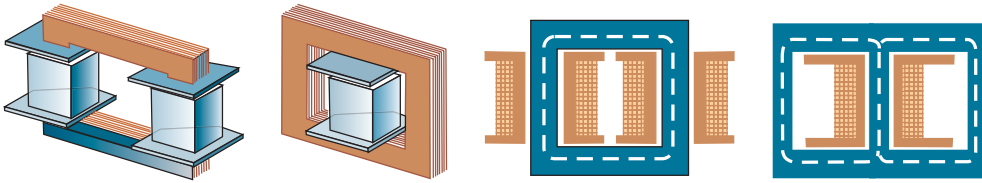


Рис. 38. Различные расположения обмоток трансформаторов

Самый простой трансформатор состоит из двух обмоток (катушек), надетых на общий замкнутый сердечник (см. рис. 37, а). Обмотка трансформатора, на которую подается переменное напряжение, называется *первичной*, а обмотка, с которой снимается преобразованное переменное напряжение, — *вторичной*. Число витков в первичной обмотке трансформатора обозначим  $N_1$ , а во вторичной —  $N_2$ .

Обмотки трансформатора могут быть расположены на сердечнике различным образом (рис. 38).

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Магнитное поле, создаваемое переменным током в первичной обмотке (см. рис. 37, а), благодаря наличию замкнутого сердечника практически без потерь (без рассеяния) пронизывает витки вторичной обмотки. Для этого сердечник изготавливается из специального (ферромагнитного) материала, что позволяет создаваемое током в обмотках поле почти полностью локализовать внутри сердечника. В результате магнитный поток существует только внутри сердечника и одинаков во всех сечениях. Это дает возможность считать мгновенные значения магнитных потоков во всех сечениях сердечника одинаковыми.

Пусть первичная обмотка трансформатора подключена к источнику тока с переменной ЭДС и на нее подается напряжение  $U_1$ . Если пренебречь потерями магнитного потока в сердечнике, то согласно закону Фарадея ЭДС индукции, возникающая в каждом витке вторичной обмотки, будет такой же, как ЭДС индукции в каждом витке первичной обмотки. Следовательно, отношение ЭДС в первичной  $\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  и во вторичной  $\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  обмотках равно отношению числа витков в них:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1 e}{N_2 e} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

где  $e$  — значение ЭДС индукции в одном витке.

Вследствие малого активного сопротивления первичной обмотки

$$U_1 \approx \mathcal{E}_1.$$

**Режимом холостого хода** трансформатора называется режим с разомкнутой вторичной обмоткой. В этом случае напряжение на вторичной обмотке равно индуцируемой в ней ЭДС:

$$U_2 \approx \mathcal{E}_2.$$

Следовательно, в режиме холостого хода из соотношения (1) получаем:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1, \quad (2)$$

т. е. действующее значение напряжения  $U_2$  на вторичной обмотке пропорционально действующему значению напряжения  $U_1$  на первичной обмотке.

Как следует из выражения (2), в зависимости от отношения числа витков в обмотках напряжение  $U_2$  может быть как больше напряжения  $U_1$  (трансформатор повышающий), так и меньше его (трансформатор понижающий).

Тип трансформатора определяется **коэффициентом трансформации**, который равен отношению числа витков первичной катушки к числу витков вторичной:

$$k = \frac{N_1}{N_2}.$$

Согласно выражению (2) отношение действующих значений напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформатора в режиме холостого хода равно коэффициенту трансформации:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (3)$$

Как следует из соотношения (3),  $U_2 = \frac{U_1}{k}$ , и при  $k > 1$  напряжение на вторичной обмотке будет меньше напряжения на первичной ( $U_2 < U_1$ ). Значит, в этом случае трансформатор будет *понижающим*. Соответственно, при  $k < 1$  трансформатор будет *повышающим*.

**Рабочим ходом (режимом)** трансформатора называется режим, при котором в цепь его вторичной обмотки включена некоторая нагрузка. Включение нагрузки во вторичную цепь трансформатора приводит к появлению в ней тока. Согласно правилу Ленца магнитный поток, создаваемый током во вторичной обмотке, стремится скомпенсировать изменение магнитного потока через витки вторичной обмотки, а значит, и через витки первичной обмотки (общий сердечник).

Это приводит к некоторому уменьшению магнитного потока в первичной обмотке, для компенсации которого действующее значение силы тока в первичной обмотке трансформатора увеличивается. Следовательно, после включения нагрузки трансформатора во вторичную обмотку сила тока в его первичной ка-

тушке увеличивается таким образом, чтобы суммарный магнитный поток через первичную обмотку достиг прежней величины.



Трансформатор не производит, а преобразовывает энергию. Согласно закону сохранения энергии мощность тока, выделяемая в цепи вторичной обмотки трансформатора в режиме нагрузки, поступает из цепи его первичной обмотки, т. е. от внешнего источника. Пренебрегая потерями энергии, связанными с нагреванием обмоток и работой по перемагничиванию сердечника, которые в современных трансформаторах не превышают 2 %, можем записать, что мощности тока в цепях обеих обмоток трансформатора практически одинаковы:

$$U_2 I_2 \approx U_1 I_1 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}.$$

Таким образом, повышая напряжение в несколько раз, трансформатор во столько же раз уменьшает силу тока.

**Режимом короткого замыкания** называется режим, при котором вторичная обмотка трансформатора замкнута без нагрузки. Данный режим опасен для трансформатора, поскольку в этом случае действующее значение тока во вторичной обмотке максимально и происходят электрическая и тепловая перегрузки системы.

При работе трансформатора всегда имеются энергетические потери, связанные с такими физическими процессами, как:

- нагревание обмоток трансформатора при прохождении электрического тока;
- работа по перемагничиванию сердечника;
- рассеяние магнитного потока.

Наиболее значительные энергетические потери при работе трансформатора обусловлены тепловым действием *вихревых токов (токов Фуко)*, возникающих в сердечнике при изменении магнитного потока.

Для уменьшения тепловых потерь сердечники (магнитопроводы) трансформаторов изготавливают не из сплошного куска металла, а из тонких пластин специальной трансформаторной стали, разделенных тончайшими слоями диэлектрика (пластины покрывают лаком). Такая конструкция сердечника позволяет значительно увеличить его электрическое сопротивление, что приводит к уменьшению потерь на его нагревание.

Для предотвращения перегрева мощных трансформаторов используется масляное охлаждение.

Современные трансформаторы имеют очень высокие КПД (до 98—99 %), что позволяет им работать практически без потерь.



1. Что называется трансформатором? Опишите устройство простейшего трансформатора.
2. На каком физическом явлении основан принцип действия трансформатора?
3. Какая взаимосвязь между действующими значениями напряжения на входе и выходе трансформатора?
4. Какой режим работы трансформатора называется холостым ходом?
5. Что называют коэффициентом трансформации?
6. Чем отличается рабочий режим трансформатора от режима холостого хода?
7. Чем опасен режим короткого замыкания трансформатора?
8. Может ли трансформатор использоваться для преобразования постоянного тока?

### Пример решения задачи

Определите силу тока  $I_1$  в первичной обмотке трансформатора, если напряжение на ее зажимах на  $\Delta U = 1500$  В выше, чем на вторичной обмотке. Сопротивление первичной обмотки  $R_1 = 35$  Ом, коэффициент трансформации  $k = 20$ .

Дано:

$$\Delta U = 1500 \text{ В}$$

$$R_1 = 35 \text{ Ом}$$

$$k = 20$$

$$I_1 = ?$$

Решение

По закону Ома сила тока в первичной обмотке:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1},$$

где  $U_1$  — напряжение на первичной обмотке.

Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_1}{U_2},$$

где  $U_2$  — напряжение на вторичной обмотке.

По условию задачи:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_1 \left( \frac{k-1}{k} \right).$$

Тогда сила тока в первичной обмотке:

$$I_1 = \frac{\Delta U k}{R_1 (k-1)}; \quad I_1 = \frac{1500 \text{ В} \cdot 20}{35 \text{ Ом} (20-1)} = 45 \text{ А}.$$

Ответ:  $I_1 = 45$  А.

### Упражнение 9

1. Первичная обмотка трансформатора содержит  $N_1 = 185$  витков, вторичная —  $N_2 = 65$ . Какой это трансформатор — повышающий или понижающий? Во сколько раз  $k$  он изменяет напряжение, подаваемое на первичную обмотку?

2. Для питания неоновых трубок световой рекламы требуется действующее значение напряжения  $U_2 = 120$  В. Каким должно быть отношение  $k$  числа витков



в первичной и во вторичной обмотках трансформатора для питания трубок от сети с действующим значением напряжения  $U_1 = 1,2$  кВ?

3. Первичная обмотка трансформатора содержит  $N_1 = 1800$  витков, вторичная —  $N_2 = 120$ . Пренебрегая потерями, определите действующее значение силы тока  $I_1$  в первичной обмотке, если во вторичной обмотке оно —  $I_2 = 8,0$  А. Найдите действующее значение напряжения  $U_2$  во вторичной обмотке, если в первичной обмотке  $U_1 = 120$  В.

4. В трансформаторе мощностью  $P = 280$  Вт выходное действующее значение напряжения  $U_2 = 6,0$  В, а действующее значение силы тока в первичной обмотке  $I_1 = 20$  А. Какой это трансформатор — понижающий или повышающий? Во сколько раз  $k$  изменяется напряжение? Потерями в трансформаторе пренебречь.

5. По двум проводам, сопротивлением  $R = 0,055$  Ом каждый, передается электрическая мощность  $P = 80$  кВт. Каких потерь мощности в линии удастся избежать, если сначала повысить действующее значение напряжения от  $U = 120$  В до  $U_1 = 1200$  В, а в конце линии понизить до  $U = 120$  В с помощью трансформаторов, КПД каждого из которых  $\eta = 99$  %?

6. В радиоприемнике установлен трансформатор, имеющий две вторичные обмотки, действующее значение напряжения на первой  $U_{21} = 4,0$  В, а на второй —  $U_{22} = 40$  В. Действующее значение напряжения в первичной обмотке трансформатора, содержащей  $N_1 = 180$  витков,  $U_1 = 120$  В. Найдите число витков  $N_{21}$  и  $N_{22}$  во вторичных обмотках трансформатора.

## § 10. Производство, передача и потребление электрической энергии. Экологические проблемы производства и передачи электрической энергии

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях. В зависимости от вида используемого носителя энергии все современные электростанции делятся на тепловые, гидроэлектростанции и атомные. Приведем характеристики основных типов электростанций.

**Тепловые электростанции (ТЭС)** используют теплоту, получаемую при сжигании угля, нефти, мазута, газа и других горючих ископаемых (КПД  $\eta = 40$  %).

**Гидроэлектростанции (ГЭС)** используют энергию движущейся воды рек, водохранилищ и иных водных потоков (КПД  $\eta = 90—93$  %).

**Атомные электростанции (АЭС)** работают на энергии, выделяющейся при расщеплении ядер урана и плутония (КПД  $\eta = 20$  %).

При передаче электроэнергии от электростанций к крупным промышленным центрам и городам наиболее часто используют проводные линии передач, которые



Рис. 39. Высоковольтная линия электропередачи

являются надежным и сравнительно недорогим способом передачи энергии. Часть передаваемой энергии неизбежно теряется в соответствии с законом Джоуля — Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t, \quad (1)$$

где  $I$  — действующее значение силы тока в линии электропередачи,  $R$  — сопротивление проводов,  $\Delta t$  — промежуток времени передачи энергии.

Как следует из закона Джоуля — Ленца, для уменьшения тепловых потерь в линиях передач необходимо уменьшать их сопротивление и действующее значение силы тока. Однако уменьшение сопротивления ( $R = \rho \frac{l}{S}$ ) проводов возможно только за счет увеличения их поперечного сечения, что приводит к значительному увеличению их массы.

Вследствие этого наиболее эффективно передавать электроэнергию при малом действующем значении силы тока. Уменьшение силы тока в  $n$  раз снижает тепловые потери в проводах в  $n^2$  раз. Для сохранения величины передаваемой по линиям передач мощности следует повышать действующее значение напряжения во столько же раз, во сколько уменьшили действующее значение силы тока, исходя из формулы  $I_1 U_1 \approx I_2 U_2$ . Поэтому на практике применяют высоковольтные (сотни тысяч вольт) линии электропередач (рис. 39).

Поскольку генераторы переменного тока на электростанциях дают напряжения не более 16—20 кВ, то для повышения напряжения в линиях передач до необходимого значения применяют повышающие трансформаторы.

Для безопасного обслуживания потребителей энергии (станков, бытовых приборов и др.) напряжение их питания должно быть низким, что легко достигается при использовании понижающих трансформаторов. Понижение напряжения обычно происходит в несколько этапов.

Рассмотрим блок-схему передачи и распределения электроэнергии (рис. 40):  
 генератор переменного тока (10—20 кВ)  $\Rightarrow$   
 повышающий трансформатор (до 110 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ)  $\Rightarrow$   
 высоковольтная линия электропередачи  $\Rightarrow$   
 понижающий трансформатор (до 220 В, 127 В, 380 В, 660 В)  $\Rightarrow$   
 потребитель.

Правообладатель Народная асвета

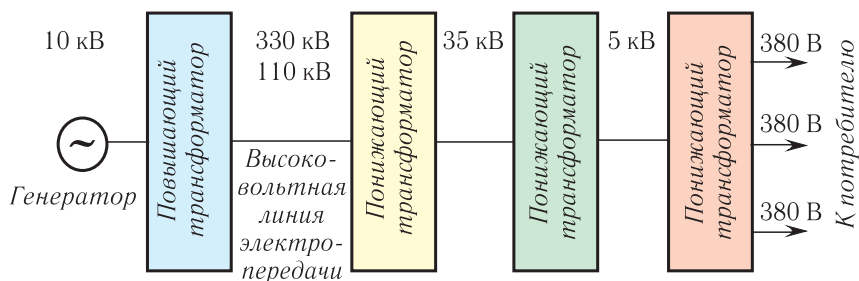


Рис. 40. Блок-схема передачи электроэнергии

В современном обществе потребление электроэнергии распределяется примерно следующим образом: промышленность — 70 %; транспорт — 15 %; сельское хозяйство — 10 %; бытовое потребление — 5 %.

В настоящее время все большее распространение получают линии передач, работающие на постоянном токе. Хотя преобразование постоянного напряжения сложнее и дороже, но постоянный ток по сравнению с переменным обладает рядом преимуществ.

Во-первых, постоянный ток, в отличие от переменного, не создает переменные магнитные поля, которые индуцируют токи в близлежащих проводниках, что приводит к потерям мощности.

Во-вторых, постоянный ток можно передавать при более высоком напряжении, так как действующее напряжение в цепи равно амплитудному, и не следует опасаться электрического пробоя изолятора или воздуха при том же амплитудном напряжении.

Развитие цивилизации сопровождается непрерывным ростом энергопотребления на нашей планете. Однако запасы природного топлива (нефти, газа, угля, торфа) и иных полезных ископаемых на Земле ограничены, поскольку из-за изменения геологических условий их формирование в настоящее время практически прекратилось.

Явным лидером среди энергоносителей на сегодняшний день является нефть, поскольку ее сравнительно легко добывать, транспортировать, очищать и использовать. Помимо этого, нефть также является источником разнообразных синтетических материалов — красок, лекарств, синтетических волокон, пластмасс и др.

По различным оценкам, в настоящее время выработано около 60 % разведанных основных месторождений угля и нефти.

В нашей стране запасы нефти и угля не являются стратегическими. На территории Республики Беларусь к основным видам добываемых топливных ресурсов следует отнести дрова и торф.



Рис. 41. Ветряные генераторы

Работа электростанций вследствие их значительной мощности существенным образом влияет на состояние окружающей среды и приводит к появлению следующих экологических проблем:

ТЭС — загрязнение атмосферы продуктами сгорания, изменение природного теплового баланса из-за рассеяния тепловой энергии;

ГЭС — изменение климата, нарушение экологического равновесия, уменьшение пахотных площадей;

АЭС — опасность радиоактивного загрязнения среды при авариях, проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Одной из главных экологических проблем современности является рост выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива (в первую очередь углекислого газа). Углекислый газ «окутывает» Землю подобно пленке, препятствуя ее охлаждению. Это приводит к *парниковому эффекту*, при котором средняя температура на Земле медленно повышается. Соответственно, за последние десятилетия на планете происходит *глобальное потепление*, которое, согласно прогнозам ученых, может привести к необратимым изменениям в климате Земли.

Рост энергопотребления заставляет ученых и инженеров искать **альтернативные источники энергии**, которые имели бы **возобновляемый** характер, т. е., в отличие от нефти и газа, могли бы самостоятельно восстанавливаться с течением времени.

К возобновляемым источникам энергии относят ветер, недра Земли (геотермальную энергию), морские приливы, а также солнечное излучение, используемое напрямую.

**Ветроэнергетика** — использование кинетической энергии *ветра* для получения электроэнергии. Энергия ветра уже достаточно успешно преобразуется в электроэнергию в многочисленных небольших ветряных генераторах в зонах устойчивых ветров (рис. 41).



Проекты будущего предлагают использовать в качестве возобновляемых источников энергии колоссальную энергию океанических и воздушных течений, тропических ураганов и торнадо. Ключевая причина их формирования — неравномерное нагревание Солнцем различных участков поверхности Земли.

Правообладатель Народная асвета

**Геотермальная энергетика** — использование естественного тепла *Земли* для выработки электрической энергии. Геотермальная энергия в местах естественных разломов земной коры используется для нужд человека. Например, столица Исландии — Рейкьявик полностью отапливается за счет геотермальных источников. Запасы геотермальной энергии достаточно велики, о чем можно судить по громадной разрушительной силе землетрясений и извержений вулканов и гейзеров.



Рис. 42. Солнечные батареи в космосе

**Приливная энергетика** использует энергию морских *приливов*. В настоящее время делаются первые шаги для использования энергии океанических приливов и отливов. Инженерная идея подобных проектов проста: использовать перепад уровней воды во время прилива и отлива для вращения водой гидротурбин, чтобы на соединенных с ними гидрогенераторах производить электричество.

**Гелиоэнергетика** — получение электрической энергии из энергии *солнечного излучения*. Развитие современных технологий позволяет эффективно использовать энергию, вырабатываемую солнечными батареями. Так, в южных широтах энергии подобных батарей, установленных на крыше, хватает для энергоснабжения небольшого дома. Современные технологии позволяют, используя солнечные батареи, получать электрическую энергию от солнечного излучения не только на Земле, но и в космосе (рис. 42). Есть смелые проекты, в которых предлагается разместить солнечные батареи в ближнем космосе на расстоянии 36 000 км от поверхности Земли. Это так называемая «синхронная» орбита, на которой батареи будут казаться неподвижными для земного наблюдателя, поскольку период их обращения будет равен 24 ч. В этом случае батареи будут находиться в тени Земли только 2 % времени, что позволит производить в десятки раз больше энергии, чем на Земле. Энергия Солнца, преобразованная в электромагнитный пучок сверхвысокой частоты, будет передаваться на Землю на большие антенны.

**Водородная энергетика.** Самым распространенным перспективным источником энергии в масштабах Вселенной следует считать *водород*, поскольку его изотопы позволяют осуществить реакцию термоядерного синтеза (см. § 41). Энергия термоядерного синтеза предпочтительнее энергии ядерного расщепле-

ния (см. § 39), поскольку из одинаковой массы вещества при синтезе может быть извлечено в 10 раз больше энергии, чем при расщеплении. Кроме того, водород (топливо синтеза) гораздо легче добывать в Мировом океане, чего нельзя сказать об уране и тории, служащими топливом при реакциях ядерного расщепления. Немаловажным является и тот факт, что при реакции термоядерного синтеза не возникает радиоактивных отходов, поскольку ее основной продукт — гелий, являющийся инертным газом. А радиоактивные изотопы гелия  ${}^5_2\text{He}$ ,  ${}^6_2\text{He}$  имеют периоды полураспада  $2 \cdot 10^{-21}$  с и 0,81 с соответственно.

Возобновляемые источники энергии сравнительно безопасны, поскольку их использование не приводит к загрязнению окружающей среды.



1. Какова частота промышленного переменного тока?
2. Какие типы электростанций вы знаете?
3. Как осуществляется передача электроэнергии на большое расстояние?
4. Назовите альтернативные способы получения электроэнергии, не загрязняющие окружающее пространство.
5. Перечислите наиболее распространенные виды природного топлива.
6. Какие виды природного топлива добываются в Республике Беларусь?
7. В чем заключается сущность парникового эффекта?
8. Чем опасно глобальное потепление?
9. Какие источники энергии называются возобновляемыми?
10. Перечислите основные проекты использования возобновляемых источников энергии. Какие из них являются наиболее перспективными для Республики Беларусь?
11. Перечислите преимущества реакции термоядерного синтеза перед реакцией расщепления (деления) тяжелых ядер, используемых на АЭС в настоящее время.

## § 11. Электромагнитные волны и их свойства.

### Шкала электромагнитных волн

Впервые гипотезу о существовании электромагнитных волн высказал в 1864 г. английский физик Джеймс Максвелл. В своих работах он показал, что источниками электрического поля могут быть как электрические заряды, так и магнитные поля, изменяющиеся во времени.

В свою очередь, магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися электрическими зарядами (электрическим током), либо переменными электрическими полями.

Изменение индукции магнитного поля с течением времени вызывает появление в окружающем пространстве вихревого электрического поля. Силовые линии этого поля замкнуты и охватывают линии индукции магнитного поля, и

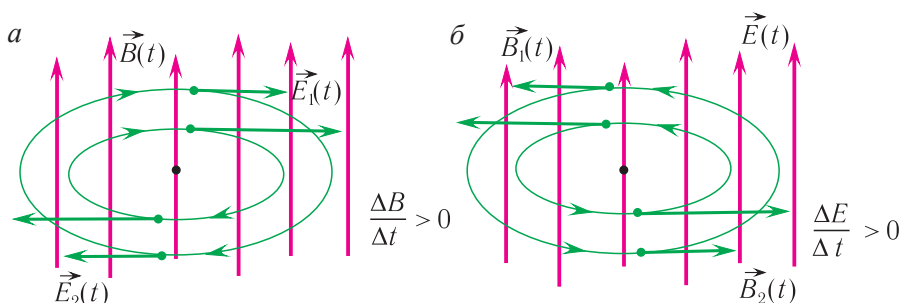


Рис. 43. Переменные электрические и магнитные поля, порождающие друг друга

напряженность электрического поля  $\vec{E}(t)$  в любой точке пространства перпендикулярна индукции  $\vec{B}(t)$  магнитного поля (рис. 43, а). Максвелл предположил, что любое изменение напряженности вихревого электрического поля сопровождается возникновением переменного магнитного поля (рис. 43, б). Далее этот процесс может повторяться до бесконечности, поскольку поля смогут попеременно воспроизводить друг друга даже в вакууме.

Таким образом, в вакууме возникает система изменяющихся и взаимно порождающих друг друга электрических и магнитных полей, охватывающих все большие и большие области пространства (рис. 44).

Совокупность связанных друг с другом периодически изменяющихся электрического и магнитного полей называют переменным **электромагнитным полем**. Согласно теории Максвелла электромагнитное поле распространяется в пространстве с конечной скоростью.

Рассмотрим подробнее процесс образования электромагнитного поля в пространстве, окружающем проводник.

Пусть в проводнике возбуждены электромагнитные колебания, в результате чего сила электрического тока в нем непрерывно меняется. Поскольку сила тока связана со скоростью движения свободных зарядов в проводнике, то скорость движения последних также будет непрерывно изменяться с течением времени. Это говорит о том, что свободные заряды внутри проводника будут двигаться с ускорением.

Согласно теории Максвелла при ускоренном движении свободных зарядов в проводнике в пространстве вокруг него создается переменное магнитное поле, которое порождает переменное вихревое электрическое поле. Последнее, в свою очередь, вновь вызывает появление переменного магнитного поля уже на боль-

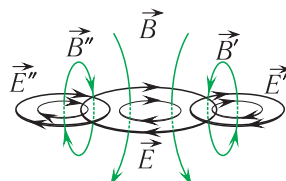


Рис. 44. Образование электромагнитной волны



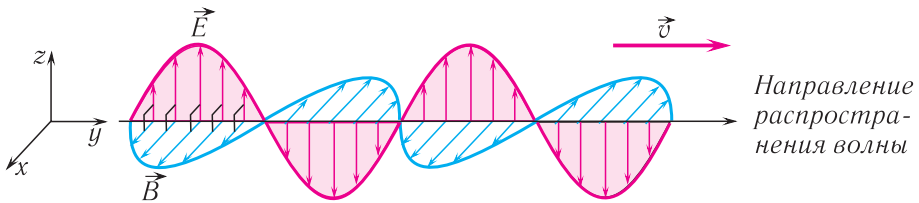


Рис. 45. Электромагнитная волна

шем расстоянии от заряда и т. д. Таким образом, в пространстве вокруг проводника образуются взаимосвязанные электрические и магнитные поля, которые распространяются с течением времени в виде волны.

Электромагнитное поле, распространяющееся в вакууме или в какой-либо среде с конечной скоростью, называется **электромагнитной волной** (рис. 45).

Электромагнитные волны являются поперечными. В них направления колебаний векторов напряженности  $E$  электрического поля и индукции  $B$  магнитного поля волны происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (см. рис. 45).

Подобно упругим механическим волнам, электромагнитные волны испытывают отражение от препятствий, но, в отличие от упругих волн, они могут распространяться и в вакууме.



Частота электромагнитных волн совпадает с частотой колебаний излучающих частиц. Максимальное значение ускорения при гармонических колебаниях пропорционально квадрату частоты колебаний:  $a \sim \nu^2$ . Так как излучают только ускоренно движущиеся заряды, то модуль напряженности электрического поля так же, как и модуль индукции магнитного поля, пропорционален модулю ускорения:  $E \sim a$ ,  $B \sim a$ , значит,  $E \sim \nu^2$ . Тогда интенсивность излучения электромагнитной волны пропорциональна четвертой степени частоты  $I \sim \langle E^2 \rangle \sim \nu^4$ . Следовательно, для получения интенсивных электромагнитных волн в их источнике необходимо создать колебания достаточно высокой частоты.

Одним из важнейших результатов теории Максвелла было теоретическое определение модуля скорости распространения электромагнитных волн (света). Согласно этой теории модуль скорости распространения  $c$  электромагнитной волны в вакууме связан с электрической постоянной  $\epsilon_0$  и магнитной постоянной  $\mu_0$  следующим соотношением:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Правообладатель Народная асвета



Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме является максимально (предельно) достижимой величиной. В любом веществе скорость их распространения меньше  $c$  и зависит от его электрических и магнитных свойств.

Совпадение скорости электромагнитных волн со скоростью света дало возможность Джеймсу Максвеллу предположить, что свет имеет электромагнитную природу. Благодаря этому произошло объединение в одно учение оптики и электромагнетизма.

Электромагнитные волны были экспериментально открыты немецким физиком Генрихом Герцем в 1887 г. Для их генерации он использовал специальное устройство (рис. 46, *а*), впоследствии названное *вибратором Герца*.

Герц исследовал излучаемое вибратором электромагнитное поле. В воздушном зазоре между шарами при переменном напряжении, достигающем значения пробоя воздуха, происходил искровой разряд. При этом в вибраторе возникали электромагнитные колебания высокой частоты. Индикатором электромагнитных волн, возникающих в опытах Герца, служила искра, образующаяся в приемном контуре (рис. 46, *б*). Размеры приемного контура выбирались таким образом, чтобы собственная частота возникающих в нем колебаний была равна частоте излучаемых волн.

Изменяя положение приемного контура по отношению к вибратору и наблюдая появление в нем искры, Герц определял наличие поля в различных точках пространства. Таким образом, Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

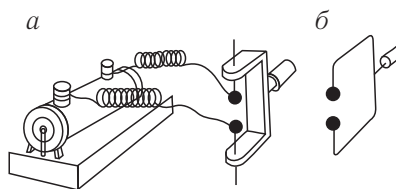


Рис. 46. Схематическое изображение экспериментальной установки Герца: *а* — вибратор Герца; *б* — приемный контур



Длина волны, возникшей в вибраторе Герца, была  $\lambda = (0,6—10)$  м.

К 1889 г. Герц сумел не только убедительно доказать существование электромагнитных волн, но и установить их основные свойства:

распространяются не только в различных средах, но и в вакууме;

в вакууме распространяются со скоростью, модуль которой  $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

отражаются и преломляются на границах раздела сред;

являются поперечными.

Герц считал, что электромагнитные волны невозможно использовать для осуществления связи без проводов. Однако русский ученый Александр Степанович Попов 7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Пе-

тербурге сообщил о возможности приема электромагнитных сигналов. 18 декабря 1897 г. он передал на расстояние 250 м первую в мире радиограмму из двух слов «Генрих Герц».



В 1901 г. итальянский инженер Г. Маркони впервые осуществил радиосвязь через Атлантический океан.

Исследования по передаче информации электромагнитными волнами, проведенные Поповым, показали, что для радиосвязи можно использовать колебательный контур.

Закрытый контур излучает слабо, так как электрическое поле сосредоточено в основном между обкладками конденсатора, а магнитное — в катушке, т. е. поля пространственно разделены. Такая система с сосредоточенными параметрами практически не излучает электромагнитные волны.

Проследим за изменениями в системе при увеличении расстояния  $d$  между обкладками конденсатора, при уменьшении площади  $S$  обкладок конденсатора и при уменьшении числа  $N$  витков катушки. Так как при этом электроемкость конденсатора и индуктивность катушки уменьшаются, то собственная частота колебаний контура  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  увеличивается. Соответственно, увеличится и интенсивность излучения, которая при прочих равных условиях  $I \sim \omega^4$ .

Таким образом, для эффективного излучения контур необходимо «открыть», раздвинув обкладки конденсатора, т. е. создать условия «ухода» поля в пространство (рис. 47, а). Если заменить катушку прямым проводом, то частота  $\omega$  увеличится еще больше. В результате приходим к *открытому колебательному контуру* — это прямой провод (рис. 47, б). Однако в таком виде его невозможно использовать на практике, так как мощность излучения и в этом случае невелика. Интенсивное излучение начинается при достижении частот порядка сотен тысяч герц. Поэтому в действительности контур состоит из катушки и длинного

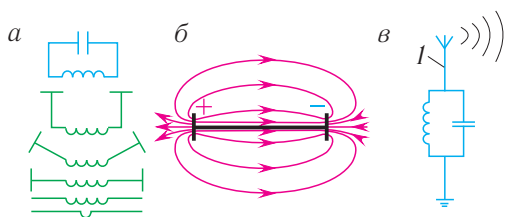


Рис. 47. Схема получения открытого колебательного контура (а); открытый колебательный контур (б); колебательный контур с антенной  $I$  (в)

провода — антенны (рис. 47, в). Один конец провода соединен с землей (заземлен), второй — поднят над поверхностью Земли. Длина антенны изготовляется кратной половине длины волны, так как в этом случае она настроена в резонанс с генератором колебаний, что обеспечивает оптимальные условия для излучения и приема электромагнитных волн. Вынужденные колебания высокой

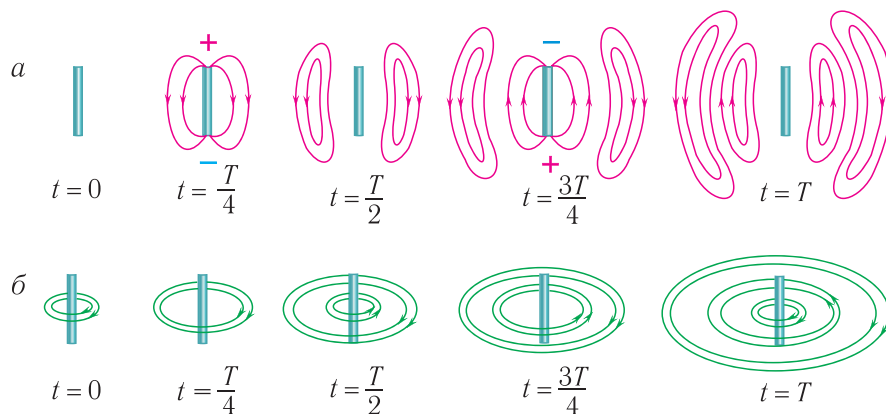


Рис. 48. Излучение электромагнитных волн простейшей антенной (диполем): а — расположение силовых линий электрического поля; б — расположение линий индукции магнитного поля

частоты в антенне создают в окружающем пространстве электромагнитное поле, и электромагнитные волны распространяются от антенны (рис. 48).

Спектр электромагнитного излучения удобно изображать в виде шкалы электромагнитных волн, приведенной на рисунке 49.

Свойства электромагнитных волн сильно зависят от их частоты. Излучение электронов, обусловленное их движением в проводниках, позволяет генерировать электромагнитные волны с частотой до  $10^{12}$  Гц. Для генерации излучений с частотой выше  $10^6$  Гц используют излучение атомов. Верхний предел частот, которые могут генерировать атомные системы, составляет  $10^{20}$  Гц. Излучения более высоких частот (например, гамма-излучение) испускаются атомными ядрами.

Классификация электромагнитных волн в зависимости от частот (длин волн) приведена в таблице 5.

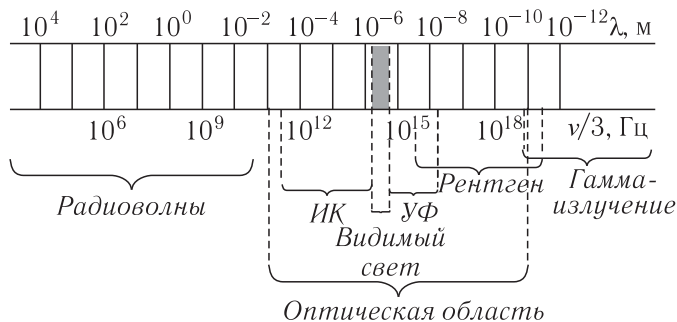


Рис. 49. Шкала электромагнитных волн

Таблица 5. Классификация электромагнитных волн

Виды излучения	Интервал частот, Гц	Интервал длин волн (вакуум), м	Источники излучения
Низкочастотные волны	$< 3 \cdot 10^3$	$> 1 \cdot 10^5$	Высоковольтные ЛЭП, генераторы переменного тока, электрические машины
Радиоволны	$3 \cdot 10^3 — 3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^5 — 1 \cdot 10^{-1}$	Колебательные контуры, вибраторы Герца
Микроволны	$3 \cdot 10^9 — 1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-1} — 1 \cdot 10^{-4}$	Лазеры, полупроводниковые приборы
Инфракрасное излучение	$1 \cdot 10^{12} — 4 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{-4} — 7 \cdot 10^{-7}$	Солнце, электролампы, лазеры, космическое излучение
Видимое излучение	$4 \cdot 10^{14} — 8 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{-7} — 4 \cdot 10^{-7}$	Солнце, электролампы, люминесцентные лампы, лазеры
Ультрафиолетовое излучение	$8 \cdot 10^{14} — 1 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-7} — 3 \cdot 10^{-8}$	Солнце, космическое излучение, лазеры, электрические лампы
Рентгеновское излучение	$1 \cdot 10^{16} — 3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-8} — 1 \cdot 10^{-10}$	Бетатроны, солнечная корона, небесные тела, рентгеновские трубки
Гамма-излучение	$3 \cdot 10^{20} — 3 \cdot 10^{29}$	$1 \cdot 10^{-10} — 1 \cdot 10^{-21}$	Космическое излучение, радиоактивные распады, бетатроны

В настоящее время электромагнитные волны находят широкое применение в науке и технике в таких процессах и явлениях, как:

плавка и закалка металлов в электротехнической промышленности, изготовление постоянных магнитов (*низкочастотные волны*);

телевидение, радиосвязь, радиолокация (*радиоволны*);

мобильная связь, радиолокация (*микроволны*);

сварка, резка, плавка металлов лазерами, приборы ночного видения (*инфракрасное излучение*);

освещение, голография, лазеры (*видимое излучение*);

люминесценция в газоразрядных лампах, лазеры (*ультрафиолетовое излучение*);

рентгенотерапия, рентгеноструктурный анализ, лазеры (*рентгеновское излучение*);

Правообладатель Народная асвета

дефектоскопия, диагностика и терапия в медицине, исследование внутренней структуры атомов, военное дело (*гамма-излучение*).



1. Что является источником вихревого электрического поля?
2. Чем отличается вихревое электрическое поле от: а) магнитного; б) электростатического?
3. Что называется электромагнитной волной?
4. Перечислите основные интервалы частот (длин волн), соответствующие различным типам электромагнитных волн.
5. Чем электромагнитные волны отличаются от механических?
6. Почему для излучения электромагнитных волн необходимо использовать открытый колебательный контур?
7. Приведите примеры применения электромагнитных волн различных частот.

### Пример решения задачи

Радиоприемник настроен на радиостанцию, работающую на длине волны  $\lambda_1 = 25$  м. Во сколько раз  $n$  необходимо изменить емкость приемного колебательного контура радиоприемника, чтобы настроить его на длину волны  $\lambda_2 = 31$  м?

Дано:

$$\lambda_1 = 25 \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 31 \text{ м}$$

$$n = ?$$

Решение

Длина волны определяется по формуле:

$$\lambda = cT,$$

где  $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

По формуле Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Тогда для двух длин волн можем записать:

$$\lambda_1 = c2\pi\sqrt{LC_1};$$

$$\lambda_2 = c2\pi\sqrt{LC_2}.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}.$$

Отсюда

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2; \quad \frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{31 \text{ м}}{25 \text{ м}}\right)^2 = 1,5.$$

Ответ:  $\frac{C_2}{C_1} = 1,5$ .

### Упражнение 10

1. Радиоприемник принимает передачу на волне длиной  $\lambda = 15$  м. Определите период  $T$  и частоту  $\nu$  колебаний тока в колебательном контуре приемника.
2. Определите количество  $N$  длин волн монохроматического излучения частотой  $\nu = 150$  ГГц, которое укладывается на отрезке длиной  $l = 15$  м.
3. Определите длину волны  $\lambda$ , на которую настроен радиоприемник, если напряжение в приемном контуре меняется по закону:  $U(t) = 200 \cos(2 \cdot 10^4 \pi t)$  (В).
4. Определите длину волны  $\lambda$ , на которую настроен радиоприемник, если его колебательный контур содержит конденсатор емкостью  $C = 4,0$  нФ и катушку индуктивностью  $L = 4,0$  мГн.
5. Определите расстояние  $d_2$  между обкладками плоского воздушного конденсатора, чтобы колебательный контур приемника был настроен на длину волны  $\lambda_2 = 120$  м, если при расстоянии между ними  $d_1 = 3,6$  мм приемник настроен на длину волны  $\lambda_1 = 150$  м.
6. Рассчитайте расстояние  $l$  до объекта, если отраженный от него радиосигнал вернулся через промежуток времени  $\Delta t = 3,0$  мкс.
7. Радиолокационная станция излучает импульс электромагнитных волн, содержащий  $N = 937,5$  волны. Определите длительность  $\tau$  импульса, если длина излучаемой волны  $\lambda = 1,6$  см.

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 2

**Идеальным колебательным контуром** или **LC-контуром** называется электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности.

Период электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре определяется **формулой Томсона**:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

**Действующим (эффективным) значением** силы переменного тока называется сила такого постоянного тока, который, проходя по резистору сопротивлением  $R$  в электрической цепи, выделяет в единицу времени такое же количество теплоты, что и данный переменный ток:

$$I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Действующее значение напряжения:

$$U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Правообладатель Народная асвета

Сопротивление  $R$  резистора, на котором в цепи переменного тока происходит превращение электрической энергии во внутреннюю энергию, называется **активным** или **омическим** сопротивлением.

**Трансформатор** — электромагнитное устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения. Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции.

Тип трансформатора определяется **коэффициентом трансформации**, который равен отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки трансформатора:

$$k = \frac{N_1}{N_2}.$$

Если  $k > 1$ , то трансформатор понижающий, если  $k < 1$  — повышающий.

Совокупность связанных друг с другом изменяющихся электрического и магнитного полей называют **электромагнитным полем**.

**Электромагнитными волнами** называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

Электромагнитные волны являются поперечными, так как колебания напряженности  $E$  и индукции  $B$  происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Модуль скорости распространения электромагнитных волн в вакууме равен модулю скорости распространения света:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

# Глава 3

## Оптика

«Солнце, небо, звезд сиянье, море в блеске голубом,  
Всю природу и создания мы лишь в свете познаем».

*Либретто оперы «Иоланта» П. И. Чайковского*

### § 12. Электромагнитная природа света. Скорость света



Чем меньше скорость распространения света в среде, тем среда является оптически более плотной.

**Оптика** — раздел физики, в котором изучаются физическая природа и свойства света, а также его взаимодействие с веществом. Соответственно световые явления часто называют оптическими явлениями. Слово «оптика» произошло от греческого слова *оптико́с* (оптикос) — видимый, зрительный, поскольку основную часть информации о природе и происходящих в ней явлениях человек получает посредством зрительных ощущений, возникающих под действием света.



По количеству и качеству информации, получаемой человеком об окружающем мире, зрение намного превосходит слух. Этот факт обусловлен существенным различием длин волн видимого света ( $\lambda < 10^{-6}$  м) и слышимого звука ( $\lambda > 10^{-2}$  м). Известно, что минимальные размеры изображения, создаваемого посредством волнового процесса, сравнимы с соответствующей длиной волны.

Под **светом** в оптике понимают электромагнитные волны, частоты которых находятся в диапазоне от  $1,5 \cdot 10^{11}$  Гц до  $3,0 \cdot 10^{16}$  Гц. Этот диапазон делится на инфракрасный ( $1,5 \cdot 10^{11} — 4,0 \cdot 10^{14}$  Гц), видимый ( $4,0 \cdot 10^{14} — 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц) и ультрафиолетовый ( $7,5 \cdot 10^{14} — 3,0 \cdot 10^{16}$  Гц) диапазоны.

Современная оптика основана на электромагнитной теории света. Как вам известно, во второй половине XIX в. Дж. Максвелл доказал возможность распространения электромагнитных волн в вакууме. Согласно выводам из его теории свет имеет электромагнитную природу, поскольку скорость его распространения равна скорости электромагнитных волн в вакууме.



В 1672 г. английский ученый Роберт Гук в докладе английскому Королевскому обществу высказал гипотезу о том, что свет представляет собой быстро распространяющиеся поперечные волны.

Теорию продольных световых волн разработал голландский физик Христиан Гюйгенс в 1690 г. в «Трактате о свете». Он, исходя из аналогии между акус-

Правообладатель Народная асвета



тическими и оптическими явлениями, полагал, что свет как упругие волны распространяется в особой среде — эфире, заполняющем все пространство как внутри материальных тел, так и между ними. В трактате с позиций волновой природы света объяснялось отражение и преломление света.

Первые попытки измерения скорости света на расстоянии нескольких километров, предпринятые Галилео Галилеем и другими учеными, не увенчались успехом в силу недостаточной точности измерения времени (хронометрирования). Из этих экспериментов Галилей сделал вывод, что измерить модуль скорости света на малых расстояниях практически невозможно, поскольку свет преодолевает их мгновенно в силу большого значения скорости распространения.

Рене Декарт одним из первых предложил использовать для измерения модуля скорости света огромные (астрономические) расстояния, на преодоление которых свету потребуется значительное время, которое можно измерять с достаточной точностью.

Исторически первое экспериментальное определение модуля скорости света в вакууме в 1672 г. сделал датский астроном Олаф Рёмер, который проводил систематические наблюдения затмений спутника Юпитера — Ио в телескоп. Примерно через полгода после начала наблюдений он заметил, что момент затмения спутника Ио запаздывает почти на 16 мин по сравнению с вычисленным значением.



Описание экспериментов Рёмера по измерению скорости света Гюйгенс привел в своем «Трактате о свете».

Рёмер объяснил эту задержку конечностью скорости распространения света. Поскольку за полгода Земля переместилась из положения I (рис. 50) в положе-

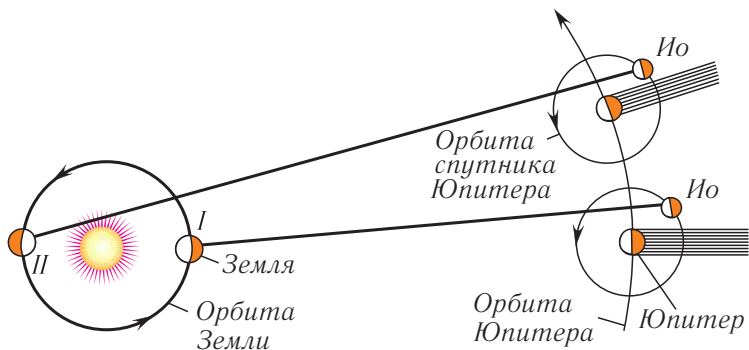


Рис. 50. Схема наблюдений Рёмера

ние II, то надо учитывать время, необходимое для того, чтобы свет прошел дополнительное расстояние, примерно равное диаметру земной орбиты.

На основании имевшихся в то время данных о диаметрах орбит Земли и Юпитера он получил для модуля скорости света значение:

$$c = 2,12 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$



Скорость распространения света в вакууме обозначается латинской буквой  $c$  (от лат. *celeritas* — скорость).

Значение модуля скорости света, полученное Рёмером, уточнил французский физик Арман Физо в 1849 г., измерив его лабораторным способом. Полученное им значение модуля скорости света —  $3,13 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .

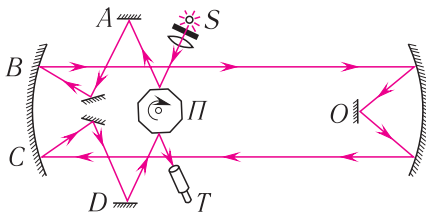


Рис. 51. Схема опыта Майкельсона:  $P$  — вращающаяся стальная призма;  $T$  — зрительная труба;  $S$  — источник света

Американский физик Альберт Майкельсон в 1926 г. для более точного измерения скорости света использовал установку, расположенную между двумя горными вершинами, расстояние между которыми  $L = 35\,373,21$  м. Схема установки изображена на рисунке 51. Зеркалом являлась восьмигранная стальная призма, которая вращалась с частотой  $\nu = 528 \text{ с}^{-1}$ . Метод измерения основывался на том, что луч света от источника  $S$  может попасть в зрительную трубу  $T$  только в том случае, если за время его распро-

странения по пути  $ABOCD$  стальная призма успеет повернуться на  $\frac{1}{8}$  оборота (см. рис. 51). Следовательно, измеренное время  $\tau = 0,00023$  с составляло  $\tau = \frac{T}{8}$ , где  $T$  — период вращения призмы.

Майкельсон получил значение модуля скорости света, близкое к современным данным:

$$c = (299\,796 \pm 4) \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

В 1972 г. значение модуля скорости света было определено на основе независимых измерений длины волны и частоты света. Это позволило значительно повысить точность измерений. В качестве источника был выбран гелиево-неоновый лазер. Таким образом, было получено значение скорости света, превосходящее по точности все ранее известные значения более чем на два порядка.

Согласно современным измерениям модуль скорости распространения света в вакууме:

$$c = (299\,792\,458,0 \pm 1,2) \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Правообладатель Народная асвета



В 1983 г. на заседании Генеральной ассамблеи мер и весов было принято новое определение эталона метра с учетом того, что скорость распространения света в вакууме *точно* равна  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Заметим, что при решении задач используют приближенное значение модуля скорости света:

$$c \approx 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Одним из параметров, характеризующих световую волну в вакууме, является длина волны  $\lambda$ , связанная с периодом колебаний  $T$  соотношением:

$$\lambda = cT$$

и с частотой  $\nu$  соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Измерения показали, что модуль скорости света  $v$  в различных веществах всегда меньше, чем модуль скорости света  $c$  в вакууме. В 1862 г. французский физик Жан Фуко измерил модуль скорости распространения света в воде и получил значение  $2,23 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через несколько лет Майкельсон определил модуль скорости распространения света в сероуглероде —  $1,71 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Следовательно, в воде модуль скорости распространения света уменьшается в 1,33 раза по сравнению с вакуумом, а в сероуглероде — в 1,64 раза.

При изучении физики 8-го класса вы узнали, что, чем меньше скорость распространения света в среде, тем среда является оптически более плотной. Мерой оптической плотности вещества является его *абсолютный показатель преломления*, который обозначается латинской буквой  $n$ .

**Абсолютный показатель преломления**  $n$  вещества характеризует его оптические свойства и показывает, во сколько раз модуль скорости распространения света в данном веществе меньше модуля скорости распространения света в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}.$$

(1)

Так как модуль скорости распространения света в любом веществе всегда меньше, чем в вакууме, то абсолютный показатель преломления вещества всегда больше единицы ( $n > 1$ ). Абсолютный показатель преломления зависит как от свойств вещества, т. е. его химического состава, агрегатного состояния, температуры, давления, так и от частоты света.

Исходя из соотношения (1), можно записать формулу для нахождения **модуля скорости распространения света в веществе**:

$$v = \frac{c}{n} \quad (n > 1). \quad (2)$$

Кроме того, из соотношения (1) следует, что для любых сред

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 = \dots = c, \quad (3)$$

где  $n_1, n_2$  — абсолютные показатели преломления сред,  $v_1, v_2$  — модули скоростей распространения света в средах.

Подставим в соотношение (3) выражение  $v = \lambda \nu$ , связывающее модуль скорости распространения света  $v$  в веществе с длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ . Так как при переходе электромагнитной волны из вакуума в вещество или из одного вещества в другое *частота колебаний* напряженности  $E$  электрического поля и индукции  $B$  магнитного поля *не изменяется* ( $\nu = \text{const}$ ), то

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 = \dots = \lambda_0,$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  — длины световых волн в средах,  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме.

Отсюда следует, что *длина световой волны*  $\lambda_n$  при переходе из одного вещества в другое *изменяется*.

**Длина световой волны  $\lambda_n$  в веществе**, абсолютный показатель преломления которого  $n$ , определяется по формуле:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (4)$$

Таким образом, при переходе света из одного вещества в другое частота остается неизменной, а изменяются скорость распространения световой волны и ее длина.

Белый свет представляет собой совокупность электромагнитных волн всевозможных частот видимого диапазона. Волна одной определенной и строго постоянной частоты называется **монохроматической** (от греч. *μονος* (монос) — свет и *χρῶμα* (хрома) — цвет, т. е. одноцветный).

Как показали результаты многочисленных экспериментов, световое ощущение у человека вызывают лишь электромагнитные волны видимого диапазона ( $4,0 \cdot 10^{14} — 7,5 \cdot 10^{14}$ ) Гц, которому соответствуют длины волн от  $\lambda_1 = 0,76$  мкм до  $\lambda_2 = 0,40$  мкм, воспринимаемые глазом человека.

Каждой частоте соответствует свое цветовое ощущение. Так, например, свет частотой  $\nu_1 = 4,0 \cdot 10^{14}$  Гц вызывает ощущение красного цвета, а  $\nu_2 = 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц — фиолетового. Поскольку цвет волн, воспринимаемых глазом, определяется только

частотой световой волны, то при переходах из одного вещества в другое *цветовое восприятие не изменяется*.



1. Что изучает оптика?
2. Что такое свет?
3. Чему равен модуль скорости распространения света в вакууме?
4. Что характеризует абсолютный показатель преломления вещества?
5. Как изменяются частота, модуль скорости и длина волны света при переходе света из одной среды в другую?
6. Электромагнитные волны какого частотного диапазона вызывают зрительное цветовое ощущение у человека?
7. Какое излучение называется монохроматическим?

### Пример решения задачи

Монохроматический свет длиной волны  $\lambda = 0,550$  мкм переходит из стекла в воздух. Определите, на какое значение  $\Delta\lambda$  увеличивается длина волны света в воздухе, если абсолютный показатель преломления стекла  $n = 1,40$ . Найдите модуль распространения скорости  $v$  света в стекле, если модуль скорости распространения света в воздухе  $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Дано:

$$\lambda = 0,550 \text{ мкм} = 5,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n = 1,40$$

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\Delta\lambda \text{ — ? } v \text{ — ?}$$

Решение

Учитывая, что частота света не зависит от свойств среды, можем записать:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}; \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu},$$

где  $\lambda_0$  — длина волны в воздухе. Поскольку длина волны прямо пропорциональна скорости распространения света, то

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}.$$

Выражая из последнего равенства  $\lambda_0$ , найдем:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda = \frac{c-v}{v}\lambda.$$

Так как  $n = \frac{c}{v}$ , то формулу для  $\Delta\lambda$  можно переписать в виде:

$$\Delta\lambda = (n-1)\lambda; \quad \Delta\lambda = (1,40-1) \cdot 5,50 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 2,20 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,220 \text{ мкм}.$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,40} = 2,14 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $\Delta\lambda = 0,220$  мкм;  $v = 2,14 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

### Упражнение 11

1. Какой промежуток времени  $\Delta t$  необходим свету, чтобы дойти от Солнца до Земли, расстояние между которыми  $l = 1,48 \cdot 10^8$  км? Влияет ли этот промежуток времени на моменты восхода и захода Солнца?

2. После вспышки молнии гром прогремел через промежуток времени  $\Delta t = 5,0$  с. Найдите, на каком расстоянии  $l$  от наблюдателя произошел грозовой разряд. Модуль скорости распространения звука в воздухе  $v_{\text{зв}} = 3,4 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

3. Определите модуль скорости  $v$  распространения света в кварце, абсолютный показатель преломления которого  $n = 1,54$ .

4. Модуль скорости распространения света в воде  $v_1 = 2,250 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ , а в стекле —  $v_2 = 1,982 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ . Определите отношение  $k$  показателей преломления стекла и воды.

5. Определите промежуток времени  $\Delta t$ , за который свет проходит расстояние  $l = 450$  км в воде, показатель преломления которой  $n = 1,33$ .

6. При переходе света из вакуума в некоторое вещество длина волны уменьшилась в  $k = 1,52$  раза. Чему равен показатель преломления  $n$  данного вещества?

## § 13. Интерференция света



Принцип суперпозиции электрических полей: напряженность  $\vec{E}$  электрического поля системы точечных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$  в некоторой точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из этих зарядов по отдельности, причем поле каждого не зависит от полей других:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Рассмотрим процесс наложения волн длиной  $\lambda$ , возбуждаемых одинаковыми точечными монохроматическими источниками света  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 52). В той области среды, где встречаются две волны от разных источников, происходит их наложение.

Согласно *принципу суперпозиции* (от лат. superposition — добавление) колебания, вызванные волнами, скла-

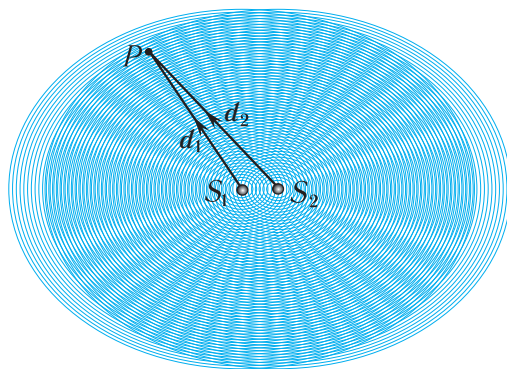


Рис. 52. Процесс наложения одинаковых волн

дываются таким образом, что результирующее смещение каждой частицы среды равно сумме отдельных смещений. Причем каждая из волн распространяется независимо друг от друга. Более того, волны свободно проходят сквозь друг друга и при этом никак не взаимодействуют между собой.

Если в точку  $P$  от монохроматических источников частотой  $\omega$  пришли две волны, прошедшие разные расстояния  $d_1$  и  $d_2$  (рис. 53), то разность расстояний  $\Delta d = d_2 - d_1$ , которую называют *разностью хода*, обуславливает сдвиг по фазе

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda}. \quad (1)$$

Следовательно, результат сложения волн зависит от разности фаз  $\Delta\varphi$  между ними, а она определяется разностью хода  $\Delta d$ .

Волны одинаковых частот, разность фаз колебаний которых в данной точке пространства не изменяется с течением времени, называются **когерентными** (от лат. *cohaerens* — связанный, сцепленный). Соответственно, свойство, характеризующее согласованность протекания в пространстве и времени нескольких колебательных или волновых процессов, называется **когерентностью**.

Предположим, что приходящие волны будут иметь в точке  $P$  напряженности электрического поля:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \sin(\omega t + \alpha_1); \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin(\omega t + \alpha_2), \quad (2)$$

где  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  — амплитуды,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — начальные фазы колебаний в каждой из волн соответственно.

Как следует из (2), волны, приходящие в некоторую точку пространства  $P$ , возбуждают в ней гармонические колебания одинаковой частоты, определяемой частотой  $\omega$  источников  $S_1$  и  $S_2$ . Будем считать, что направления колебаний в каждой из волн одинаковы.

Заметим, что разность фаз колебаний, возбуждаемых рассматриваемыми источниками в точке  $P$ , остается постоянной с течением времени, даже если начальные фазы этих колебаний различны.

Амплитуда результирующего колебания согласно принципу суперпозиции в любой момент времени равна векторной сумме амплитуд каждой волны по отдельности. Результирующее колебание представляет собой их сумму:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (3)$$

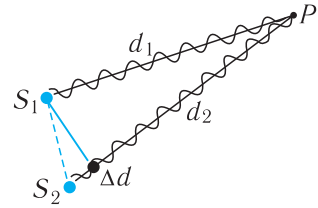


Рис. 53. Схема процесса наложения одинаковых волн

Если разность хода волн от источников  $S_1$  и  $S_2$  кратна длине волны  $\Delta d = m\lambda$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), то  $\Delta\phi = 2\pi m$ , и колебания, возбуждаемые волнами в точке  $C$  (рис. 54, *а*), происходят в одинаковой фазе.

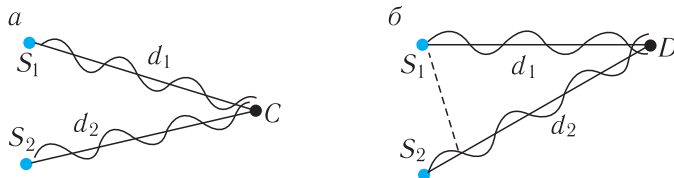


Рис. 54. Сложение монохроматических колебаний двух волн: *а* — максимальная амплитуда в точке  $C$ ; *б* — минимальная амплитуда в точке  $D$

При этом гребень одной волны накладывается на гребень другой. Соответственно, амплитуда результирующего колебания в точке  $C$  равна сумме амплитуд слагаемых волн и оказывается максимальной (рис. 55):

$$E_{\max} = E_1 + E_2. \quad (4)$$

Если же разность хода волн в точке  $D$  (рис. 54, *б*) равна нечетному числу полуволин

$$\Delta d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

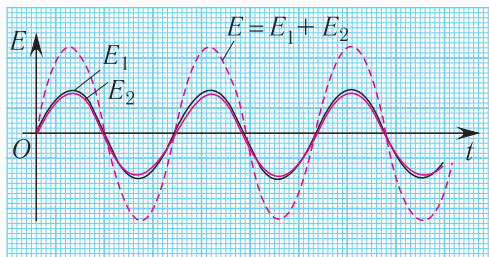


Рис. 55. Сложение амплитуд волн

то  $\Delta\phi = \pi(2m + 1)$ , и колебания происходят в противофазе.

При этом гребень одной волны накладывается на впадину другой. В этом случае амплитуда результирующего колебания равна модулю разности амплитуд накладываются волн и оказывается минимальной (рис. 56):

$$E_{\min} = |E_1 - E_2|. \quad (5)$$

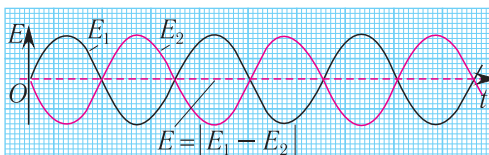


Рис. 56. Вычитание амплитуд волн

Заметим, что во всех других точках накладываются волн амплитуда  $A$  результирующего колебания имеет промежуточное значение:

$$E_{\min} \leq E \leq E_{\max}.$$



Приемники излучения фиксируют не саму световую волну, а энергию, принесенную волной в данную область пространства. Параметром, характеризующим эту энергию, является *интенсивность* световой волны, которая обозначается латинской буквой  $I$ . Интенсивность световой волны численно равна средней энергии, которая переносится волной за единицу времени через площадку единичной площади, ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны. Согласно волновой теории электромагнетизма интенсивность электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряженности ее электрического поля  $I = \langle E^2 \rangle$ . Символ  $\langle \rangle$  означает усреднение по времени.

Таким образом, интенсивность результирующей волны не равна сумме интенсивностей исходных волн. Это означает, что волны *интерферируют* друг с другом. Вследствие зависимости разности фаз (1) от точки наблюдения, в пространстве получается сложная картина распределения интенсивности результирующей волны. Устойчивое во времени распределение амплитуд колебаний в пространстве при интерференции называется **интерференционной картиной**.

**Интерференция** (от лат. *inter* — взаимно, между собой и *ferio* — ударяю, поражаю) — явление возникновения устойчивой во времени картины чередующихся максимумов и минимумов амплитуд результирующей волны при сложении двух (или нескольких) когерентных волн.

Закономерности интерференции волн справедливы для волн любой природы (рис. 57), т. е. носят универсальный характер.

При рассмотрении интерференции света (электромагнитных волн) следует учесть, что длина волны света в веществе изменяется в зависимости от показателя преломления вещества. Если одна волна распространяется в веществе с показателем преломления  $n_1$ , а другая — с показателем преломления  $n_2$ , то разность фаз колебаний

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda},$$

где

$$\delta = n_1 d_1 - n_2 d_2 = c \left( \frac{d_1}{v_1} - \frac{d_2}{v_2} \right). \quad (7)$$

Здесь  $\delta$  — **оптическая разность хода** волн от источника до точки наблюдения. Эта величина определяется расстояниями  $d_1$  и  $d_2$ , пройденными волнами с учетом их различных скоростей распространения  $v_1$  и  $v_2$  в этих средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

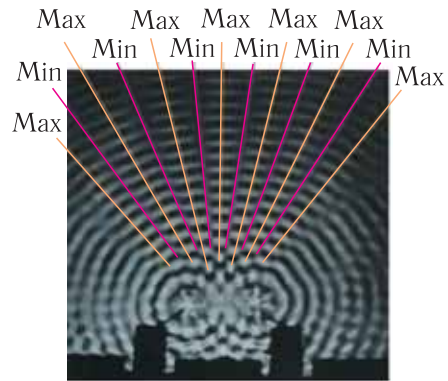


Рис. 57. Интерференционная картина поперечных волн на поверхности воды

Таким образом, если оптическая разность хода (7) равна целому числу длин волн:

$$\delta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (условие максимума интерференции), } (8)$$

то волны приходят в точку  $P$  (см. рис. 53) синфазно, поскольку разность фаз в этом случае кратна  $2\pi$ .

Действительно:

$$\Delta\varphi = k\delta = km\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}m\lambda = 2\pi m.$$

Если оптическая разность хода (7) равна нечетному числу полуволн:

$$\delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ (условие минимума интерференции), } (9)$$

то волны приходят в точку  $P$  в противофазе. Разность фаз колебаний в этом случае равна:

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi.$$

Для наблюдения интерференции света необходимы когерентные источники, излучающие волны с фиксированной разностью фаз. Распространенные обычные источники света (лампы накаливания, лампы дневного света, свечи и т. д.) не являются когерентными. Для того чтобы можно было наблюдать от них интерференцию света, свет *от одного и того же источника* необходимо разделить на два пучка и затем свести их вместе.

Для получения интерференционной картины пользуются классической **интерференционной схемой (схемой Юнга)**, где пучок света от небольшого отверстия  $A$  в ширме разделяется на два когерентных пучка с помощью небольших отверстий  $B$  и  $C$  в следующей ширме (рис. 58). Поскольку эти пучки созданы

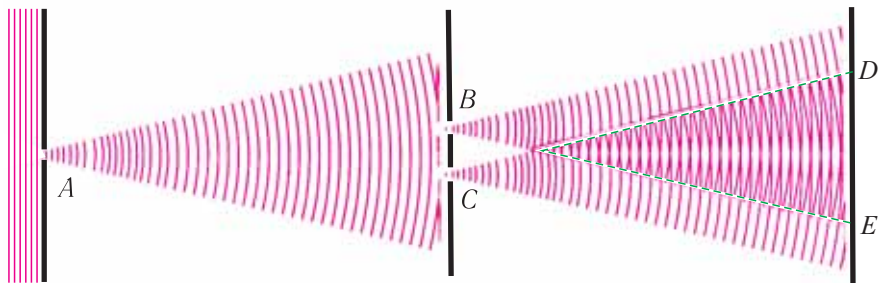


Рис. 58. Схема эксперимента Юнга по интерференции света

одним и тем же источником  $A$ , они являются когерентными. Поэтому на экране в области перекрытия пучков  $DE$  наблюдается интерференционная картина.



Классический эксперимент по наблюдениям интерференции света английский ученый Томас Юнг провел в 1801 г. Это позволило измерить длину световой волны и убедительно подтвердить волновую природу света.

Изобретение и распространение когерентных источников излучения — *лазеров* — сделало демонстрацию явления интерференции достаточно простой.



Отметим еще один распространенный случай интерференции — сложение волн одинаковой частоты, распространяющихся в противоположных направлениях (например, падающей и отраженной волн). Это приводит к образованию в пространстве устойчивой картины чередования максимумов амплитуды колебаний (пучностей) и минимумов (узлов) (рис. 59). Волна, возникающая в результате сложения двух волн одинаковой частоты, распространяющихся в противоположных направлениях, называется **стоячей волной**.

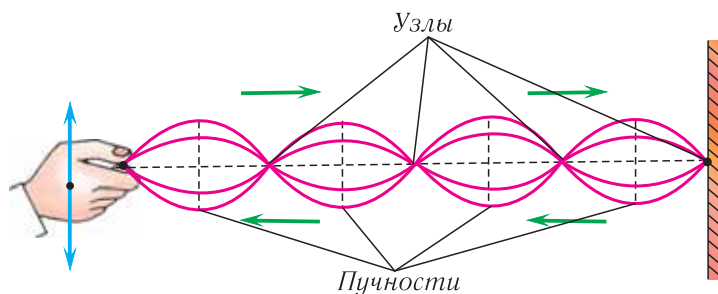


Рис. 59. Стоячая волна



1. Что такое когерентность? Какие волны называются когерентными?
2. Что называют интерференцией волн? При каких условиях происходит это явление?
3. Что называют разностью хода волн? Оптической разностью хода волн?
4. Запишите условия образования интерференционных максимумов и минимумов. Какой должна быть оптическая разность хода двух волн, чтобы их интерференция приводила к ослаблению (усилению) результирующего сигнала?
5. Почему не возникает интерференционной картины от света двух фар удаленной автомашины?
6. Если две волны интерферируют друг с другом, то влияет ли одна волна на распространение другой?

### Пример решения задачи

Рассчитайте положения максимумов и минимумов интерференционной картины на экране, находящемся на расстоянии  $L = AO = 2,0$  м от двух одинаковых когерентных источников света  $S_1$  и  $S_2$ , которые расположены в вакууме на расстоянии  $d = 5,0$  мм друг от друга (рис. 60). Длина волны излучения источников  $\lambda = 600$  нм. Найдите расстояние  $\Delta x$  между соседними максимумами.

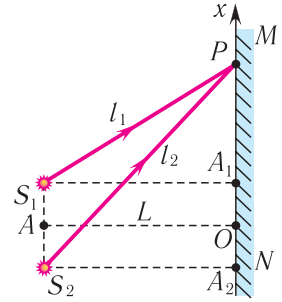


Рис. 60

Дано:

$$d = 5,0 \text{ мм} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$L = 2,0 \text{ м}$$

$$\lambda = 600 \text{ нм} = 6,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$\Delta x$  — ?

Решение

До некоторой точки  $P$  на экране каждая из волн проходит различные пути  $l_1$  и  $l_2$ . Максимумы и минимумы будут наблюдаться при выполнении условий:

$$\delta = l_1 - l_2 = m\lambda;$$

$$\delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Из треугольников  $S_1PA_1$  и  $S_2PA_2$  по теореме Пифагора находим:

$$l_1^2 = L^2 + \left(x_m - \frac{d}{2}\right)^2; \quad (1)$$

$$l_2^2 = L^2 + \left(x_m + \frac{d}{2}\right)^2, \quad (2)$$

где  $x_m$  — координата точки  $P$ .

Отсюда, вычитая из соотношения (2) соотношение (1), получаем:

$$l_2^2 - l_1^2 = 2x_md.$$

С учетом того, что  $d \ll L$  и  $l_1 + l_2 \approx 2L$ , находим:

$$(l_1 + l_2)(l_1 - l_2) \approx 2L(l_1 - l_2) = 2x_md \Rightarrow l_1 - l_2 = \delta = \frac{x_md}{L}.$$

Из условия максимумов следует:

$$m\lambda = x_{m\max} \frac{d}{L}.$$

Тогда расстояние от центра экрана до  $m$ -й светлой полосы находится из соотношения:

$$x_{m\max} = m\lambda \frac{L}{d}.$$

Правообладатель Народная асвета

Из условия для минимумов находим положение темных полос:

$$(2m + 1) \frac{\lambda}{2} = x_{m \min} \frac{d}{L}.$$

Отсюда

$$x_{m \min} = (2m + 1) \frac{\lambda L}{2d}.$$

Расстояние между соседними максимумами:

$$\Delta x = x_{(m+1) \max} - x_{m \max} = \lambda \frac{L}{d}.$$

Из полученной формулы видно, что ширина интерференционных полос увеличивается при уменьшении расстояния  $d$  между когерентными источниками.

$$\Delta x = 6,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \frac{2,0 \text{ м}}{5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Ответ:  $x_{m \max} = m\lambda \frac{L}{d}$ ;  $x_{m \min} = (2m + 1) \frac{\lambda L}{2d}$ ;  $\Delta x = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

## Упражнение 12

1. Две когерентные волны, длины которых  $\lambda = 404 \text{ нм}$ , приходят в одну точку на экране. Что будет наблюдаться в этой точке (усиление или ослабление света), если оптическая разность хода равна  $\delta = 17,17 \text{ мкм}$ ?

2. Что будет наблюдаться в некоторой точке пространства в результате интерференции двух когерентных волн длиной волны  $\lambda = 400 \text{ нм}$ , оптическая разность хода которых  $\delta = 2,25 \text{ мкм}$ ?

3. Сколько длин волн  $N$  монохроматического излучения частотой  $\nu = 800 \text{ МГц}$  укладывается на отрезке длиной  $l = 2,0 \text{ м}$ ?

4. Экран  $MN$  освещен когерентными монохроматическими источниками  $S_1$  и  $S_2$  (см. рис. 60), период колебаний которых  $T$ . Усиление или ослабление света будет наблюдаться в точке  $P$ , если от источника  $S_2$  свет в нее приходит позже на промежуток времени  $\tau = 2,5T$ , чем от источника  $S_1$ ?

5. Два когерентных источника света  $S_1$  и  $S_2$  освещают экран  $MN$ , плоскость которого параллельна отрезку  $S_1S_2$  (рис. 61). Докажите, что в точке  $O$  будет максимум освещенности, если  $S_1O = S_2O$ .

6. В установке Юнга расстояние между щелями  $d = 1,5 \text{ см}$ , экран расположен на расстоянии  $l = 2,0 \text{ м}$  от щелей. Щели освещаются монохроматическим источником, длина волны которого  $\lambda = 687 \text{ нм}$ . Определите расстояние  $\Delta x$  между интерференционными полосами на экране.

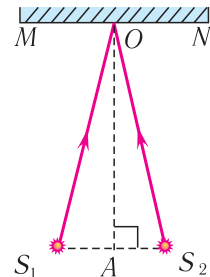


Рис. 61

7. На экран  $A$  от точечного источника, находящегося от него на большом расстоянии, падает свет. В экране имеются две параллельные щели на расстоянии  $d = 1,0 \cdot 10^{-4}$  м одна от другой. На экране  $B$ , расположенном на расстоянии  $l = 1,0$  м параллельно экрану  $A$ , расстояние между интерференционными полосами  $\Delta x = 5,6 \cdot 10^{-3}$  м. Определите длину волны  $\lambda$  излучения.

## § 14. Принцип Гюйгенса — Френеля. Дифракция света. Дифракционная решетка



Среда называется однородной, если ее физические свойства по всему объему одинаковы во всех точках пространства. Среда называется изотропной, если ее физические свойства одинаковы по всем направлениям в пространстве.

Волновой фронт — это поверхность, все точки которой колеблются в одинаковых фазах, т. е. это поверхность равных фаз.

Волна называется плоской, если ее волновой фронт является плоскостью.

Закономерности распространения волн любой природы в различных средах носят универсальный характер.

Для наглядности рассмотрим процесс распространения волн на поверхности воды. Волны, возбуждаемые точечным источником  $S$ , распространяются по всем направлениям с одинаковой по модулю скоростью  $v$ . Следовательно, фронт волны будет иметь вид окружности (рис. 62). Соответственно, если волна будет распространяться в однородной изотропной среде по всем направлениям в пространстве, то ее волновой фронт будет иметь вид сферической поверхности.

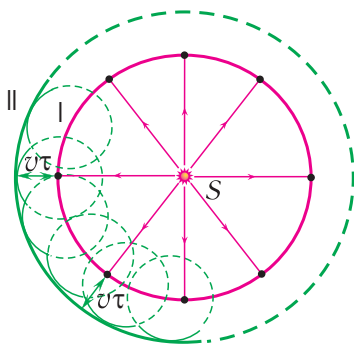


Рис. 62. Перемещение фронта волны по принципу Гюйгенса

Как видно из рисунка 62, если в некоторый момент времени  $t$  фронт волны занимал положение I, то через промежуток времени  $\tau$  фронт займет положение II, точки которого будут удалены от начального фронта волны на расстояние  $l = v\tau$ .

Общие закономерности процесса распространения волн объяснил Христиан Гюйгенс, сформулировав в 1690 г. в «Трактате о свете» принцип, позволяющий определять положение волнового фронта через небольшой промежуток времени, зная его положение в данный момент времени. Согласно

**принципу Гюйгенса:**

Правообладатель Народная асвета

*каждая точка среды, которой волновой фронт достиг в момент времени  $t$ , становится источником вторичных сферических волн. Новое положение волнового фронта через малый промежуток времени  $\tau$  определяется огибающей волновых фронтов вторичных волн в момент времени  $t + \tau$ .*

Таким образом, согласно принципу Гюйгенса для нахождения положения волнового фронта через промежуток времени  $\tau$  проведем окружности радиусом  $l = v\tau$ , представляющие собой фронты вторичных волн с центрами на фронте в положении I (см. рис. 62). Соответственно, огибающая волновых фронтов вторичных волн определяет новое положение волнового фронта — положение II. Напомним, что огибающей называется поверхность, касательная ко всем вторичным волнам. На очень больших расстояниях от точечного источника излучаемые им волны можно считать плоскими.

Линия, перпендикулярная волновому фронту в данной точке, называется **лучом**. Луч определяет направление распространения волны, а также направление переноса энергии волной. Например, в солнечном излучении, приходящем на Землю, световые лучи являются практически параллельными друг другу.

Принцип Гюйгенса объясняет *прямолинейное распространение* волн в однородной среде. Поскольку в такой среде радиусы фронтов вторичных волн ( $v\tau$ ) одинаковы на всех участках (рис. 63), то волновой фронт ( $A'B'$ ) плоской волны с течением времени перемещается в одном и том же направлении, оставаясь параллельным своему начальному положению  $AB$ .

Однако от закона прямолинейного распространения света наблюдаются отклонения при его распространении вблизи границ непрозрачных тел или прохождении через отверстия в непрозрачных экранах, т. е. в средах с резко выраженными неоднородностями. При этом отклонение существенно зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия. Действительно, стоя за углом дома, мы хорошо слышим, что едет автомобиль, хотя не видим его, поскольку находимся в области «тени». Таким образом, звуковые волны как бы «заворачивают за угол», в то время как световым волнам этого сделать не удастся.

Явление огибания волнами препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от

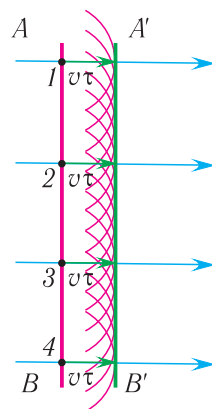


Рис. 63. Прямолинейное распространение волн (формирование фронта плоской волны)

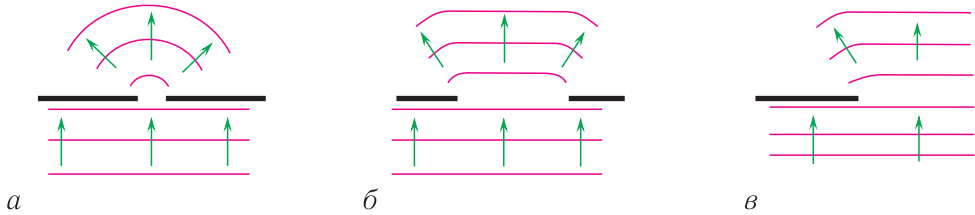


Рис. 64. Дифракция волн на различных препятствиях

прямолинейного, называется **дифракцией** (рис. 64). Явление дифракции служит одним из подтверждений волновой природы света.

Для проявления дифракции размеры препятствий (отверстий) должны быть меньше или сравнимы с длиной волн, вот почему в рассмотренном примере

звук  $\left( v \approx 3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v = 1 \cdot 10^2 \text{ Гц}, \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \cdot 10^2 \text{ Гц}} = 3 \text{ м} \right)$  мотора автомобиля

смог «завернуть за угол», а свет  $\left( c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \lambda = 500 \text{ нм} = 5,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \right)$ , отраженный от автомобиля, — нет.

Принцип Гюйгенса позволяет решать задачи лишь о направлении распространения волнового фронта и не затрагивает вопрос об амплитуде, а следовательно, и об интенсивности распространяющихся по разным направлениям волн.

Изучая дифракцию света, французский физик Огюстен Жан Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн, которые являются когерентными. **Принцип Гюйгенса — Френеля** позволил описать явление дифракции количественно:

*все источники вторичных волн, расположенные на волновом фронте, когерентны между собой. Для расчета амплитуды огибающей волны в данной точке пространства следует учесть интерференцию вторичных волн от всех участков волнового фронта в начальном положении.*

Таким образом, согласно Френелю дифракция света объясняется интерференцией вторичных волн от различных участков начального положения волнового фронта.

Для наблюдения дифракции света используется *дифракционная решетка*.

**Дифракционной решеткой** называют оптический прибор, предназначенный для точного измерения длин волн и анализа состава света.

Дифракционная решетка состоит из большого числа равноотстоящих параллельных штрихов (щелей), нанесенных на стеклянную или металлическую поверхность. Длина решеток составляет 10—15 см. Они содержат 10 000—20 000 штри-



хов на 1 см. Наблюдения проводятся как в отраженном свете (на металлических решетках), так и в проходящем свете (на стеклянных).

Рассмотрим дифракционную решетку, представляющую собой систему из  $N$  одинаковых равноотстоящих параллельных щелей (прозрачные участки) в плоском непрозрачном экране (рис. 65). Если ширина каждой щели  $b$ , ширина непрозрачной части между щелями  $a$ , то величина  $d = a + b$  называется *постоянной решетки* или ее *периодом*.

Пусть на решетку, постоянная которой равна  $d$ , падает плоская волна, длина которой  $\lambda$ . Из принципа Гюйгенса следует, что волны, дифрагировавшие на щелях, распространяются за решеткой по всем направлениям (рис. 66).

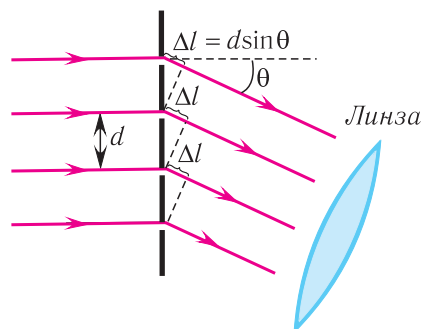


Рис. 65. Условие образования главных максимумов на дифракционной решетке

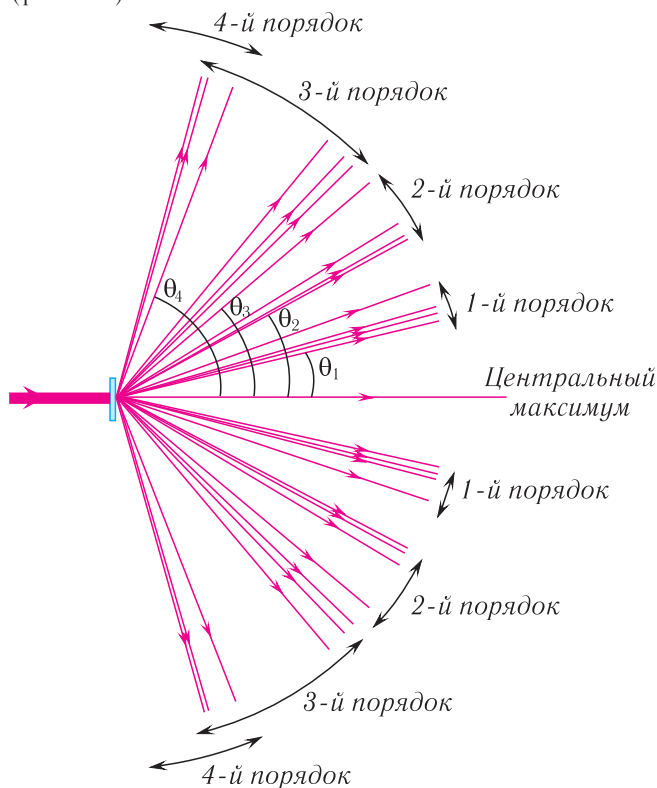


Рис. 66. Дифракционные спектры, полученные с помощью решетки, содержащей  $500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$

Для наблюдения дифракционной картины на экране между ним и решеткой размещают собирающую линзу таким образом, чтобы экран находился в фокальной плоскости линзы (см. рис. 65). Собирающая линза фокусирует на экране падающие на нее параллельные лучи (вторичные волны).

В зависимости от разности хода между вторичными волнами, испущенными разными щелями, они интерферируют друг с другом, усиливая или ослабляя друг друга. На экране получается *дифракционная картина* в виде системы светлых и темных полос.

Наиболее яркие дифракционные максимумы получили название *главных дифракционных максимумов*.

Условие возникновения главных дифракционных максимумов, наблюдаемых под углами  $\theta$ , имеет вид:

$$d \sin \theta = m\lambda. \quad (1)$$

Здесь  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  — *порядок максимума*, или *порядок спектра*,  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

Полученное условие определяет направления распространения света в пространстве, по которым на отрезке  $\Delta l = d \sin \theta$  укладывается целое число длин волн  $m\lambda$  (см. рис. 65).

Следовательно, вторичные волны от всех щелей решетки приходят в точку наблюдения синфазно (с фазами, отличающимися на число, кратное  $2\pi$ ) и усиливают друг друга.

Между максимумами интенсивности расположены минимумы, так как при изменении угла  $\theta$  на отрезке  $\Delta l$  уже не будет укладываться целое число длин волн.

Следовательно, вторичные волны приходят в точку наблюдения, ослабляя результирующее действие.

Из условия возникновения главных дифракционных максимумов (1) следует, что при  $m = 0$  для любых длин волн  $\theta = 0$ . Следовательно, прямо по центру решетки образуется нулевой максимум, который называется также *центральный* максимумом. Дифракционные максимумы, соответствующие  $m = 1$ , образуют спектр *первого порядка*,  $m = 2$  — спектр *второго порядка* и т. д. (см. рис. 66).

Количество максимумов  $m$  в дифракционной картине ограничено, поскольку  $|\sin \theta| \leq 1$ . Максимальный порядок спектра  $m_{\max}$ , который дает дифракционная решетка при нормальном падении света на нее, определяется из условия  $|\sin \theta| \leq 1$ .

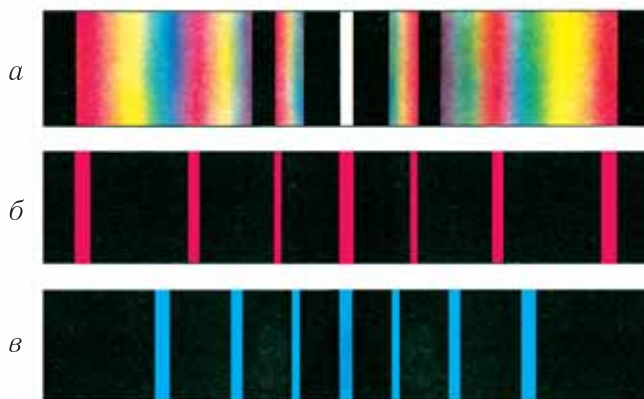


Рис. 67. Дифракционный спектр белого света (*а*); дифракционные максимумы красного света (*б*); дифракционные максимумы синего света (*в*)

Тогда из соотношения (1) следует:

$$m_{\max} \leq \frac{d}{\lambda}, \quad (2)$$

т. е. зависит от периода решетки и длины световой волны.

Таким образом, для получения спектра первого порядка ( $m_{\max} = 1$ ) необходимо, как следует из соотношения (2), чтобы период решетки был больше длины световой волны ( $d > \lambda$ ).

При падении на решетку белого света центральный максимум ( $m = 0$ ) представляет собой изображение источника (рис. 67, *а*), так как в этом направлении собирается излучение всех длин волн. Для всех максимумов ненулевого порядка ( $m \neq 0$ ) в дифракционной решетке  $\sin \theta \sim \lambda$ . Следовательно, красные лучи, имеющие большую длину волны, чем синие, отклоняются дифракционной решеткой сильнее (рис. 67, *б*, *в*).

Таким образом, при освещении решетки белым светом справа и слева от центрального максимума наблюдаются максимумы первого, второго и более высоких порядков, обращенных фиолетовым краем к центру дифракционной картины, а красным от нее (см. рис. 67, *а*).

С увеличением числа щелей в дифракционной решетке возрастает количество световой энергии, пропускаемой решеткой, следовательно, интенсивность главных максимумов при этом увеличивается.

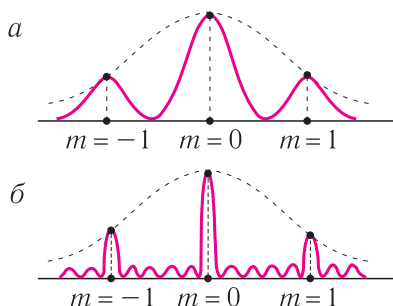


Рис. 68. Изменение дифракционной картины при увеличении числа щелей: *а* — две щели; *б* — шесть щелей

Кроме того, главные максимумы из расплывчатых превращаются в резкие и узкие, которые разделены практически темными промежутками, так как вторичные максимумы очень слабы и составляют не более 5 % от главного (рис. 68). Отношение интенсивностей максимумов в нулевом, первом и втором порядках:  $I_0 : I_1 : I_2 = 1 : 0,047 : 0,017$ . Поэтому при падении монохроматического излучения на решетки, в которых число штрихов на 1 см достигает  $10^5$ , дифракционный спектр состоит из очень резких линий.



Первая дифракционная решетка, сконструированная американским ученым Риттенхаузом, состояла из параллельного ряда волосков диаметром около 0,1 мм и длиной 10 мм, натянутых на расстоянии порядка 0,2 мм один от другого. Немецкий физик Йозеф Фраунгофер вместо волосков использовал штрихи, наносимые на стекло алмазным острием. Их число на 1 мм решетки достигало у него 300.



1. Что называют дифракцией света? При каких условиях ее наблюдают?
2. В чем сущность принципа Гюйгенса?
3. Применим ли принцип Гюйгенса к распространению звуковых волн? К распространению волн на поверхности воды?
4. Почему, когда оркестр, удаляясь, зашел за угол дома, через некоторое время слышны лишь звуки барабана и труб-басов?
5. В чем сущность принципа Гюйгенса — Френеля?
6. В чем сходство и различие между интерференцией и дифракцией?
7. Что называют дифракционной решеткой?
8. Запишите формулу для определения максимумов интенсивности, создаваемой дифракционной решеткой.
9. Как можно повысить точность измерения длины волны с использованием дифракционной решетки?
10. Чем можно объяснить радужную окраску компакт-дисков?

### Пример решения задачи

На дифракционную решетку, имеющую  $N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$ , падает монохроматическое излучение длиной волны  $\lambda = 550 \text{ нм}$ . Определите наибольший порядок  $m_{\text{max}}$  дифракционного максимума, который можно наблюдать при нормальном падении излучения на решетку.

Правообладатель Народная асвета

Д а н о:

$$\lambda = 550 \text{ нм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}} = 5,00 \cdot 10^5 \frac{\text{штр}}{\text{м}}$$

 $m_{\text{max}}$  — ?

Р е ш е н и е

Условие дифракционных максимумов:

$$d \sin \theta = \frac{\sin \theta}{N} = m \lambda.$$

Следовательно,

$$\sin \theta = N m \lambda.$$

Наибольший порядок  $m_{\text{max}}$  дифракционного максимума наблюдается при угле  $\theta$ , близком к углу  $90^\circ$ . Вследствие этого будем считать, что

$$\theta_{\text{max}} \approx \frac{\pi}{2}, \text{ т. е. } \sin \theta_{\text{max}} \approx 1,$$

тогда наибольший порядок максимума находится по формуле:

$$m \approx \frac{1}{N \lambda}.$$

Для определения  $m_{\text{max}}$  необходимо взять целую часть полученного значения:

$$m_{\text{max}} = \left[ \frac{1}{N \lambda} \right] = \left[ \frac{1}{5,00 \cdot 10^5 \frac{\text{штр}}{\text{м}} \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \right] = [3,6] = 3.$$

Ответ:  $m_{\text{max}} = 3$ .

### Упражнение 13

1. Под каким углом  $\theta$  наблюдается максимум третьего порядка при нормальном падении света длиной волны  $\lambda = 840 \text{ нм}$  на дифракционную решетку с периодом  $d = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ ?

2. В чем преимущество дифракционной решетки с большим числом щелей? С малым периодом решетки?

3. Дифракционная решетка, имеющая  $N = 5000 \frac{\text{штр}}{\text{см}}$ , освещается белым светом, падающим нормально на решетку. Дифракционные максимумы какого наибольшего порядка  $m_{\text{max}}$  можно наблюдать: а) в красной области спектра ( $\lambda_1 = 760 \text{ нм}$ ); б) в фиолетовой области спектра ( $\lambda_2 = 400 \text{ нм}$ )?

4. Белый свет с длинами волн от  $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$  до  $\lambda_2 = 700 \text{ нм}$  падает нормально на дифракционную решетку, имеющую  $N = 8000 \frac{\text{штр}}{\text{см}}$ . Определите разность углов дифракции (угловую ширину)  $\Delta\theta$  спектра первого порядка на экране.

5. Дифракционная решетка освещается падающим на нее нормально светом с длиной волны  $\lambda_1 = 589 \text{ нм}$ . На экране, отстоящем на  $l = 42,0 \text{ см}$  от решетки,

дифракционный максимум первого порядка находится на расстоянии  $x_1 = 2,48$  см от центрального максимума. При замене источника дифракционный максимум второго порядка находится на расстоянии  $x_2 = 3,84$  см от центрального максимума. Определите длину волны  $\lambda_2$  света, излучаемого этим источником.

6. Определите наибольший порядок спектра  $m_{\max}$ , наблюдаемого при нормальном падении монохроматического света на дифракционную решетку, имеющую  $N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$ , если длина волны света  $\lambda = 520$  нм.

## § 15. Закон преломления света.

### Показатель преломления. Полное отражение



Изменение направления распространения луча света при прохождении через границу раздела двух сред называется преломлением света.

**Геометрической оптикой** называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения оптического излучения на основе представления о световых лучах.

Под лучом понимают линию, вдоль которой переносится энергия электромагнитной волны. Условимся изображать световые лучи графически с помощью геометрических линий со стрелками. В геометрической оптике волновая природа света не учитывается.



Рис. 69. Световой пучок

Геометрическому лучу на практике соответствует тонкий *световой пучок*, получаемый при пропускании светового излучения, идущего от удаленного источника, через отверстие (диафрагму) в экране (рис. 69).

Таким образом, следует различать геометрический луч (математическое понятие) и световой пучок (материальный объект), получаемый от источника света.

Уже в начальные периоды оптических исследований были экспериментально установлены четыре основных закона геометрической оптики:

**закон прямолинейного распространения света;**

**закон независимости световых лучей;**

**закон отражения световых лучей;**

**закон преломления световых лучей.**

Световой поток можно разделить на отдельные световые пучки, выделяя их при помощи диафрагм. Действие выделенных световых пучков оказывается независимым друг от друга, т. е. эффект, производимый отдельным пучком, не зависит

от того, действуют ли одновременно с ним другие пучки или нет.

Световые пучки получают при пропускании светового излучения, идущего от удаленного источника, через отверстие (диафрагму) в экране  $1$  (рис. 70). Для того чтобы можно было пренебречь дифракционным расширением пучка, должно выполняться условие:

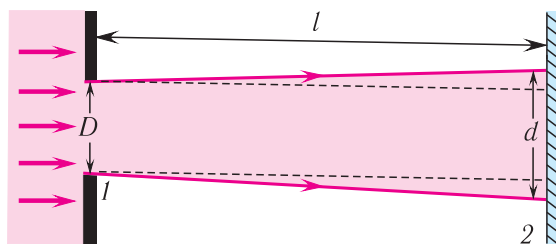


Рис. 70. Распространение света через щель

$$l \ll \frac{D^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $D$  — размер препятствия или отверстия, на котором свет дифрагирует,  $\lambda$  — длина световой волны,  $l$  — расстояние от препятствия до места наблюдения дифракционной картины.

В этом случае выходящий из диафрагмы пучок будет оставаться неизменным, и он называется *параллельным*.

Соотношение (1) выполняется, когда длина световой волны стремится к нулю ( $\lambda \rightarrow 0$ ). Поэтому геометрическая оптика является предельным приближенным случаем волновой оптики.



Если диаметр диафрагмы или размеры предмета оказываются сравнимы с длиной световой волны ( $D \approx \lambda$ ), то выходящий световой пучок становится расходящимся, свет проникает в область геометрической тени, происходит дифракция света, т. е. проявляется волновой характер светового излучения.

Лучи, выходящие из одной точки, называют **расходящимися**, а собирающиеся в одной точке — **сходящимися**. Примером расходящихся лучей может служить наблюдаемый свет далеких звезд, а примером сходящихся — совокупность лучей, попадающих в зрачок нашего глаза от различных предметов.

Для изучения свойств световых волн необходимо знать закономерности их распространения в однородной среде, а также закономерности отражения и преломления на границе раздела двух сред.

Рассмотрим падение плоской световой волны на плоскую поверхность раздела однородных изотропных и прозрачных сред при условии, что размеры поверхности раздела намного больше длины волны падающего излучения.

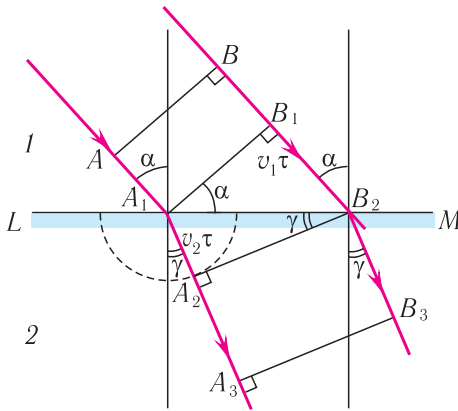


Рис. 71. Преломление света в соответствии с принципом Гюйгенса:  $AB$  — фронт падающей плоской волны;  $A_2B_2$  — фронт волны после преломления

Пусть на плоскую поверхность раздела  $LM$  двух сред падает плоская световая волна, фронт которой  $AB$  (рис. 71). Если угол падения  $\alpha$  отличен от нуля, то различные точки фронта  $AB$  волны достигнут границы раздела  $LM$  не одновременно.

Рассмотрим, что будет происходить во второй среде, считая, что модуль скорости  $v_2$  распространения света в ней меньше, чем в первой ( $v_2 < v_1$ ) (см. рис. 71).

Фронт падающей волны  $AB$  будет перемещаться со скоростью, модуль которой  $v_1$ , по направлению  $AA_1$ . К моменту времени (за промежуток времени  $\tau = \frac{B_2B_1}{v_1}$ ),

когда точка  $B_1$  фронта достигнет границы раздела двух сред (точка  $B_2$ ), вторичная волна из точки  $A_1$  (согласно принципу Гюйгенса) пройдет расстояние  $l_2 = v_2\tau$ . Фронт волны, распространяющейся во второй среде, можно получить, проводя прямую линию, касательную к полуокружности с центром в точке  $A_1$ .

Из построения видно, что  $\angle B_1A_1B_2 = \alpha$ ,  $\angle A_1B_2A_2 = \gamma$  как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Из  $\triangle A_1B_1B_2$  находим:  $A_1B_2 = \frac{v_1\tau}{\sin\alpha}$  и из  $\triangle A_1A_2B_2$  —  $A_1B_2 = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}$ .

Отсюда:

$$\frac{v_1\tau}{\sin\alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}.$$

Из этого выражения следует закон преломления:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Напомним, что абсолютным показателем преломления называется отношение модуля скорости распространения световой волны в вакууме  $c$  к модулю скорости распространения в данной среде  $v$ :  $n = \frac{c}{v}$ .

С учетом этого соотношения закон преломления принимает вид:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$



Величина

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

равная отношению абсолютных показателей преломления  $n_2$  второй и  $n_1$  первой сред, называется **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой. В отличие от абсолютного показателя преломления относительный показатель преломления может быть и меньше единицы, если  $n_2 < n_1$ .

Таким образом, исходя из волновой теории света, получен **закон преломления** световых волн:

**отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред и равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой;**

**лучи, падающий и преломленный, лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения луча к плоскости границы раздела двух сред.**



Перепишем закон преломления в следующем виде:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.$$

При такой записи закона преломления не надо запоминать абсолютный показатель преломления какой среды стоит в числителе, а какой — в знаменателе.

Необходимо всегда умножать абсолютный показатель преломления на синус угла, относящийся к одной и той же среде.

Для наблюдения явления преломления света достаточно поместить карандаш в стакан с водой и посмотреть на него со стороны — карандаш будет казаться «надломленным» (преломленным) (рис. 72), оставаясь при этом совершенно целым.



Первые упоминания о преломлении света в воде и стекле встречаются в труде Клавдия Птолемея «Оптика», вышедшем в свет во II в. н. э.

Закон преломления света был экспериментально установлен в 1620 г. голландским ученым Виллебродом Снеллиусом. Отметим, что независимо от Снеллиуса закон преломления был также открыт Рене Декартом.



Рис. 72. Преломление света на границе раздела двух сред

Причиной преломления волн, т. е. изменения направления распространения волн на границе раздела двух сред, является из-

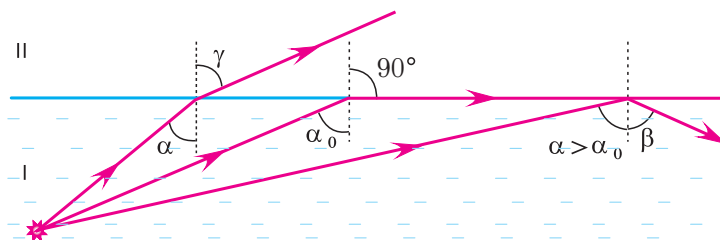


Рис. 73. Полное отражение света на границе раздела сред

менение модуля скорости распространения электромагнитных волн при переходе излучения из одной среды в другую.

Как следует из закона преломления, при переходе света из *оптически более плотной* среды I (с большим абсолютным показателем преломления  $n_1$ ) в *оптически менее плотную* среду II (с меньшим показателем преломления  $n_2$ ) угол преломления  $\gamma$  становится больше угла падения  $\alpha$  (рис. 73).

По мере увеличения угла падения, при некотором его значении  $\alpha_0$ , угол преломления станет  $\gamma = 90^\circ$ , т. е. свет не будет попадать во вторую среду. Энергия преломленной волны при этом станет равной нулю, а энергия отраженного излучения будет равна энергии падающего. Следовательно, начиная с этого угла падения, вся световая энергия полностью отражается от границы раздела этих сред в среду I.

Это явление называется **полным отражением света** (см. рис. 73). Угол  $\alpha_0$ , при котором возникает полное отражение, называется **предельным углом полного отражения**. Он определяется из закона преломления при условии, что угол преломления  $\gamma = 90^\circ$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1).$$

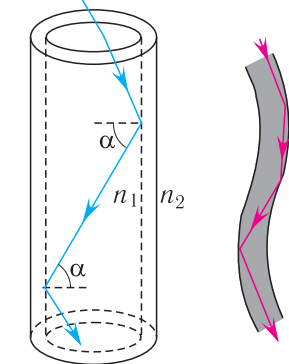


Рис. 74. Ход лучей в световоде: а — прямом; б — гибком

Таким образом, преломленная волна отсутствует при углах падения, больших предельного угла  $\alpha \geq \alpha_0$ . Например, для границы вода ( $n = 1,33$ ) — воздух предельный угол полного отражения  $\alpha_0 = 49^\circ$ , для границы алмаз ( $n = 2,42$ ) — воздух —  $\alpha_0 = 24^\circ$ .

Явление полного отражения используют в волоконной оптике для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких световодов (рис. 74), а также в отражательных призмах различных оптических приборов. В волоконно-оптических устройствах, в которых свет распространяется по тонким световодам, стеклянная световедущая жила покрыта слоем вещества с меньшим показателем преломления.



В 2009 г. китайский ученый Чарльз Пао удостоен Нобелевской премии за выдающийся вклад в исследование световодов для оптической связи.

В 1954 г. белорусским физиком, академиком Федором Ивановичем Федоровым было теоретически предсказано новое физическое явление — поперечное смещение (перпендикулярно плоскости падения) светового пучка при его полном отражении. Это смещение меньше длины волны, и для его наблюдения световой пучок должен быть ограниченным в поперечном направлении. В 1969 г. французским физиком К. Эмбером оно было подтверждено экспериментально и получило название «сдвиг Федорова».



1. Что называют лучом?
2. Можно ли считать лучом очень узкий пучок света?
3. Какому закону подчиняется распространение света в однородной прозрачной среде?
4. Какое явление называется преломлением света?
5. Что является причиной преломления волн на границе раздела сред?
6. Объясните, почему карандаш, опущенный в воду, кажется сломанным (см. рис. 72).
7. Сформулируйте закон преломления света.
8. По какой формуле рассчитывается предельный угол полного отражения света?
9. Чему равен угол преломления при нормальном падении света на границу двух сред?

### Пример решения задачи

Определите угол падения  $\alpha$  луча на стеклянную пластинку с показателем преломления  $n = 1,5$ , если между отраженным и преломленным лучами угол  $\varphi = 90^\circ$ .

Дано:

$$n = 1,5$$

$$\varphi = 90^\circ$$

$\alpha$  — ?

Решение

Из закона преломления находим:

$$\sin \alpha = n \sin \gamma.$$

Из геометрического построения (рис. 75) следует, что углы отражения и преломления связаны соотношением:

$$\beta + \gamma = 90^\circ.$$

Отсюда

$$\gamma = 90^\circ - \beta.$$

Подставляем найденный угол  $\gamma$  в формулу закона преломления и с учетом закона отражения ( $\beta = \alpha$ ) определяем искомый угол падения:

$$\sin \alpha = n \sin(90^\circ - \beta) = n \sin(90^\circ - \alpha) = n \cos \alpha.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha = n; \quad \operatorname{tg} \alpha = 1,5; \quad \alpha = 56^\circ.$$

Ответ:  $\alpha = 56^\circ$ .

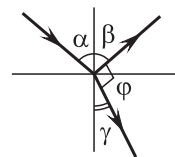


Рис. 75

### Упражнение 14

1. Матовая лампочка в виде шара диаметром  $d = 50$  мм освещает непрозрачный шар диаметром  $D = 25$  см. Определите диаметр тени  $D_1$  и полутени  $D_2$  от шара на стене, если расстояние от центра лампочки до центра шара  $l_1 = 1,0$  м и от центра шара до стены  $l_2 = 2,0$  м.

2. Постройте изображение предмета  $AB$  в плоском зеркале  $KL$  (рис. 76). Определите графически область полного видения изображения.

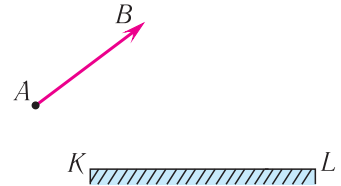


Рис. 76

3. Определите глубину реки  $h$ , если человеку, смотрящему нормально к ее поверхности, она кажется равной  $h' = 4,0$  м. Показатель преломления воды относительно воздуха принять  $n = \frac{4}{3}$ .

4. Найдите относительный показатель преломления  $n_{21}$  второй среды относительно первой, если угол отражения луча на границе раздела двух сред  $\alpha = 40^\circ$ , а угол его преломления —  $\gamma = 46^\circ$ .

5. Определите угол падения  $\alpha$  луча света на поверхность стекла из воздуха, если угол преломления в  $k = 2,0$  раза меньше угла падения. Показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

6. Определите предельный угол полного отражения  $\alpha_2$  на границе вещества со стеклом (показатель преломления стекла  $n = 1,4$ ), если на границе этого вещества с воздухом ( $n_{\text{в}} = 1,0$ ) предельный угол полного отражения  $\alpha_1 = 45^\circ$ .

## § 16. Прохождение света через плоскопараллельные пластинки и призмы

Законы отражения и преломления света широко используются для управления ходом световых пучков. Для отражения света в приборах применяются зеркала и призмы, для преломления — призмы, плоскопараллельные пластинки, линзы.

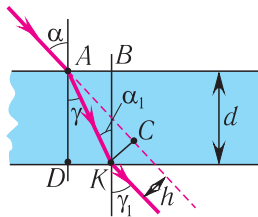


Рис. 77. Ход луча в плоскопараллельной пластинке

Зеркала, призмы, пластинки и линзы являются элементами, комбинируя которые, создают различные оптические приборы. Рассмотрим отдельные элементы оптических приборов.

**Плоскопараллельная пластинка.** Рассмотрим ход луча в плоскопараллельной пластинке. На рисунке 77 показан ход светового луча в плоскопараллельной пластинке толщиной  $d$ , находящейся в воздухе.

Согласно закону преломления на первой и второй границах раздела для луча, падающего под углом  $\alpha$  на первую границу, имеем:

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= n \sin \gamma; \\ n \sin \alpha_1 &= \sin \gamma_1.\end{aligned}$$

Здесь  $\gamma$  — угол преломления на первой границе,  $\alpha_1$  — угол падения луча на вторую границу,  $\gamma_1$  — угол преломления на второй границе,  $n$  — абсолютный показатель преломления вещества пластинки.

Накрест лежащие углы  $\gamma$  и  $\alpha_1$  при параллельных прямых  $AD$  и  $BK$  (перпендикулярах к первой и второй параллельным границам) равны, т. е.  $\alpha_1 = \gamma$ . Следовательно,  $\sin \alpha = n \sin \gamma = n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1$ . Откуда следует, что

$$\alpha = \gamma_1. \quad (1)$$

Таким образом, *луч света, проходя через плоскопараллельную пластинку, с обеих сторон которой находится одна и та же среда, смещается параллельно своему начальному направлению на некоторое расстояние  $h$ .*

Соответственно, все предметы, если смотреть на них сквозь прозрачную плоскопараллельную пластинку под углом, не равным нулю, будут также казаться смещенными.



Найдем, от каких параметров пластинки зависит смещение  $h$  луча.

Из  $\triangle AKC$  следует, что

$$h = KC = AK \sin(\alpha - \gamma).$$

Из  $\triangle AKD$  имеем:

$$AK = \frac{AD}{\cos \gamma} = \frac{d}{\cos \gamma}.$$

Отсюда:

$$h = \frac{d}{\cos \gamma} \sin(\alpha - \gamma) = \frac{d}{\cos \gamma} (\sin \alpha \cos \gamma - \sin \gamma \cos \alpha).$$

С учетом закона преломления  $\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n}$  и тригонометрического тождества  $\sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma = 1$  находим:

$$\cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}} = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{n}.$$

Расстояние  $h$  между направлениями входящего и выходящего лучей можно определить из соотношения

$$h = \left(1 - \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \alpha}{n^2}}\right) d \sin \alpha. \quad (2)$$

Как видно из соотношения (2), смещение  $h$  луча при данном угле падения  $\alpha$  зависит от толщины  $d$  пластинки и ее показателя преломления  $n$ .

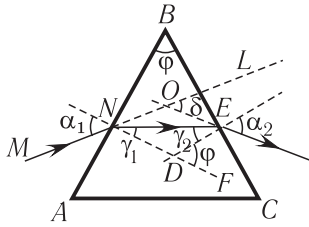


Рис. 78. Ход луча в призме

**Трехгранная призма.** Рассмотрим ход луча в трехгранной призме. Пусть световой луч  $MN$  падает под углом  $\alpha_1$  на боковую грань трехгранной призмы  $ABC$ , сечение которой показано на рисунке 78. Призма, изготовленная из вещества с абсолютным показателем преломления  $n_2$ , находится в среде с абсолютным показателем преломления  $n_1$ . Угол  $\varphi$  при вершине  $B$   $\triangle ABC$  называется **преломляющим углом** призмы. Грани призмы, образующие преломляющий угол  $\varphi$ , называются **преломляющими**. Грань, лежащая напротив преломляющего угла, называется **основанием призмы**.

Пусть луч  $MN$  и  $\triangle ABC$  лежат в одной плоскости — плоскости листа книги. Из закона преломления света находим угол преломления  $\gamma_1$ :

$$\sin \gamma_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha_1. \quad (3)$$

Если показатель призмы  $n_2 > n_1$ , то преломленный луч  $NE$  падает на вторую боковую грань призмы под углом  $\gamma_2$ . Полного отражения на второй преломляющей грани не происходит при условии  $\sin \gamma_2 < \frac{n_1}{n_2}$ , и луч выходит из призмы под углом  $\alpha_2$ . Его находим из закона преломления:

$$\sin \alpha_2 = \frac{n_2}{n_1} \sin \gamma_2. \quad (4)$$

Отклонение от начального направления луча  $MN$  вследствие преломлений на гранях призмы определяется углом  $\angle LOE = \delta$  (см. рис. 78). Угол  $\delta$  между направлениями входящего и выходящего лучей называется **углом отклонения**. Рассмотрим  $\triangle NDE$ . С учетом того, что  $\angle EDF = \varphi$ , по теореме о внешнем угле треугольника находим:

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \varphi. \quad (5)$$

Применим эту же теорему к  $\triangle ONE$ :

$$(\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) = \delta. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) определим связь угла падения  $\alpha_1$ , угла преломления  $\alpha_2$  с преломляющим углом  $\varphi$  призмы и углом отклонения  $\delta$  выходящего луча от начального направления:

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi. \quad (7)$$

В результате получим систему уравнений (3), (4), (5), (7):

$$\begin{aligned}\frac{n_2}{n_1} &= \frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2}, \\ \gamma_1 + \gamma_2 &= \varphi, \\ \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi &= \delta.\end{aligned}\tag{8}$$

Система уравнений (8) позволяет решить задачу на прохождение луча света через трехгранную призму без полного отражения на ее гранях.

Если угол падения  $\alpha_1$  на грань призмы и преломляющий угол призмы  $\varphi$  малы, то малыми будут и углы  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\alpha_2$ . Поэтому в законах преломления (3) и (4) отношение синусов можно заменить отношением углов, выраженных в радианах, т. е.:

$$\alpha_1 \approx \frac{n_2}{n_1} \gamma_1 \quad \text{и} \quad \alpha_2 \approx \frac{n_2}{n_1} \gamma_2.$$

Подставляя полученные выражения для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в соотношение (7), находим:

$$\delta \approx \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \varphi.\tag{9}$$

Из соотношения (9) следует, что, во-первых: чем больше преломляющий угол  $\varphi$ , тем больше угол отклонения  $\delta$  лучей призмой; во-вторых, угол отклонения  $\delta$  лучей увеличивается с ростом абсолютного показателя преломления  $n_2$  вещества призмы. Как видно из рисунка 78, луч света, проходя через трехгранную призму, отклоняется к ее утолщенной части, если абсолютный показатель преломления вещества призмы больше абсолютного показателя преломления окружающей среды ( $n_2 > n_1$ ).



1. Нарисуйте ход светового луча в плоскопараллельной пластинке и трехгранной призме.
2. Как ведет себя световой пучок при прохождении через стеклянную призму?
3. При каком угле падения луч света, проходя через плоскопараллельную пластинку, не смещается?
4. Останется ли параллельным пучок монохроматического света, проходя через трехгранную призму, если он был параллельным при падении на преломляющую грань призмы?

### Пример решения задачи

Определите наименьший преломляющий угол  $\varphi_{\min}$  стеклянной призмы, находящейся в воздухе, при котором луч, падающий нормально на грань призмы, не выйдет через ее вторую боковую грань (рис. 79). Показатель преломления стекла призмы  $n = 1,6$ .

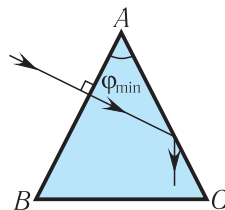


Рис. 79

Дано:  
 $n = 1,6$   
 $\varphi_{\min} = ?$

Решение

Запишем условие полного отражения на боковой грани АС:

$$\sin \alpha = \frac{1}{n}.$$

Вследствие того, что  $\alpha = \varphi_{\min}$  как углы с взаимно перпендикулярными сторонами:

$$\varphi_{\min} = \arcsin \frac{1}{1,6} = 39^\circ.$$

Ответ:  $\varphi_{\min} = 39^\circ$ .

### Упражнение 15

1. Определите смещение  $h$  луча света при его падении под углом  $\alpha = 45^\circ$  на стеклянную плоскопараллельную пластинку толщиной  $d = 6,0$  мм, если показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

2. Угол падения двух параллельных лучей света на плоскопараллельную стеклянную пластинку  $\alpha = 30^\circ$ , а расстояние между ними  $l_0 = 20$  мм. Определите расстояние  $l$  между лучами в пластинке. Показатель преломления стекла  $n = 1,6$ .

3. Определите преломляющий угол  $\varphi$  стеклянной призмы, если луч, падающий перпендикулярно к боковой грани призмы, выходит из нее отклоненным на угол  $\delta = 45^\circ$ . Показатель преломления стекла  $n = 1,55$ .

4. Луч света выходит из призмы под тем же углом, под каким он на нее падает. При этом он отклоняется от первоначального направления на угол  $\delta = 25^\circ$ . Определите показатель преломления  $n$  вещества призмы, если ее преломляющий угол  $\varphi = 45^\circ$ .

## § 17. Формула тонкой линзы



Линза называется *собирающей*, если после преломления в ней параллельный пучок становится сходящимся. Если же после преломления в линзе параллельный пучок становится расходящимся, то линза называется *рассеивающей* (рис. 80).

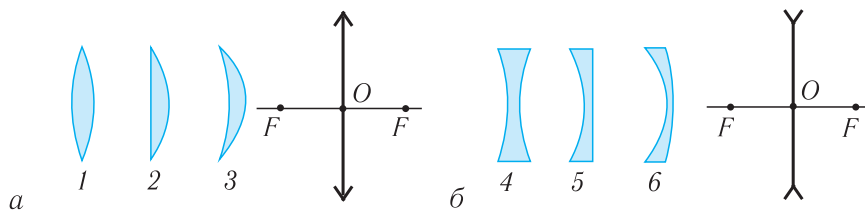


Рис. 80. Типы линз и их условные обозначения: *а* — собирающие: 1 — двояковыпуклая; 2 — плосковыпуклая; 3 — выпукло-вогнутая; *б* — рассеивающие: 4 — двояковогнутая; 5 — плосковогнутая; 6 — вогнуто-выпуклая



Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, выраженному в метрах, называется ее *оптической силой*:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Единица оптической силы — *1 диоптрия* (1 дптр).

1 дптр соответствует оптической силе линзы с фокусным расстоянием  $F = 1$  м:  $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$ .

Линзы можно представить в виде совокупности частей трехгранных призм. На рисунке 81, *а* изображена модель двояковыпуклой линзы, собранной из частей призм, повернутых основаниями к центру линзы. Соответственно, модель двояковогнутой линзы будет представлена частями призм, повернутых основаниями от центра линзы (рис. 81, *б*).

Преломляющие углы этих призм можно подобрать таким образом, чтобы падающие на нее параллельные лучи после преломления в призмах собрались в одной точке  $F$ .

Линза считается **тонкой**, если ее толщина в центре намного меньше радиусов ограничивающих ее поверхностей. Тонкая линза дает неискаженное изображение только в том случае, если свет монохроматический и предмет достаточно мал, следовательно, лучи распространяются вблизи главной оптической оси. Такие лучи получили название **параксиальных**.

Отметим условия, при **одновременном** выполнении которых линза является **собирающей**:

*толщина в центре больше толщины у краев;*

*ее показатель преломления больше показателя преломления окружающей среды.*

При невыполнении (или выполнении) *только одного* из этих условий линза является **рассеивающей**.

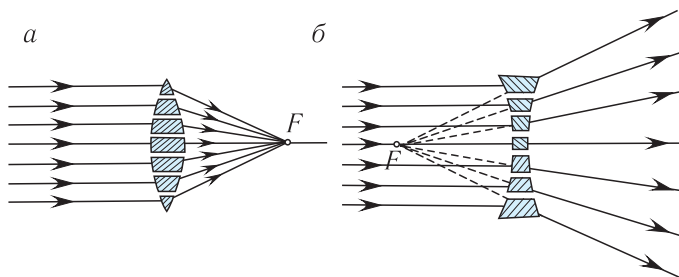


Рис. 81. Модель линзы: *а* — двояковыпуклой; *б* — двояковогнутой

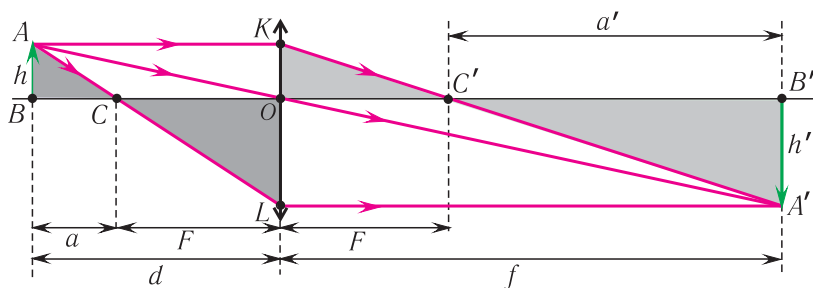


Рис. 82. Построение изображения предмета в тонкой собирающей линзе

Между фокусным расстоянием тонкой линзы, расстоянием от предмета до линзы и от линзы до изображения существует определенная количественная зависимость, называемая **формулой линзы**.

Выведем формулу тонкой линзы из геометрических соображений, рассматривая ход характерных лучей. Обратим внимание на луч, идущий через оптический центр  $O$  линзы, луч, параллельный главной оптической оси линзы, и луч, проходящий через главный фокус линзы.

Построим изображение предмета  $AB$  в тонкой собирающей линзе (рис. 82). Пусть расстояние от предмета до линзы  $d$ , расстояние от линзы до изображения  $f$ , фокусное расстояние линзы  $F$ , расстояние от предмета до переднего главного фокуса  $a$ , расстояние от заднего главного фокуса до изображения  $a'$ , высота предмета  $h$ , высота его изображения  $h'$ .

Из рисунка 82 видно, что  $\triangle ABC \sim \triangle CLO$ ,  $\triangle A'B'C' \sim \triangle KOC'$ ,  $\triangle ABO \sim \triangle A'B'O$ . Из подобия треугольников следует:

$$\frac{h}{a} = \frac{h'}{F}; \quad (1)$$

$$\frac{h'}{a'} = \frac{h}{F}; \quad (2)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{h'}{f}. \quad (3)$$

Используя соотношения (1) и (2), получим:

$$aa' = F^2. \quad (4)$$



Соотношение  $aa' = F^2$  называется **формулой Ньютона**.

С учетом того, что  $d = a + F$ ,  $f = a' + F$  (см. рис. 82), находим:  $a = d - F$  и  $a' = f - F$  и подставляем в формулу (4):

Правообладатель Народная асвета

$$(d - F)(f - F) = df - Ff - dF + F^2 = F^2 \Rightarrow df = Ff + dF.$$

Разделив обе части последнего выражения на  $dfF$ , получаем **формулу тонкой линзы**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

**Линейным (поперечным) увеличением**  $\Gamma$  называется отношение линейного размера изображения  $h'$  к линейному размеру предмета  $h$ . Из соотношения (3) находим линейное увеличение тонкой линзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}.$$



В 1604 г. в исследовании «Дополнения к Вителло» И. Кеплер изучал преломление света в линзах различной конфигурации и для малых углов падения пришел к формуле линзы.

Для практического использования формулы линзы следует твердо запомнить **правило знаков**:

для собирающей линзы, действительного источника и действительного изображения величины  $F, d, f$  считают *положительными*. Для рассеивающей линзы, мнимого источника и мнимого изображения величины  $F, d, f$  считают *отрицательными*.

Заметим, что предмет или источник является *мнимым* только в том случае, если на линзу падает пучок сходящихся лучей.

Таким образом, линза с  $F > 0$  является **собирающей** (положительной), а с  $F < 0$  — **рассеивающей** (отрицательной).

Оптическая сила линзы зависит от свойств окружающей среды (вспомните, как плохо мы видим под водой без плавательных очков).

В современных оптических приборах для улучшения качества изображений используются **системы линз**. Оптическая сила  $D$  системы тонких линз, сложенных вместе, равна сумме их оптических сил  $D_i$ :

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n = \sum_{i=1}^n D_i.$$



1. Что называют оптической силой линзы? В каких единицах она измеряется?
2. По какой формуле определяется поперечное увеличение линзы?
3. Как известно, световые лучи обратимы. Как это утверждение можно применить при использовании формулы тонкой линзы?
4. Какие изображения может дать собирающая линза? Рассеивающая?

5. По какой формуле определяется оптическая сила системы тонких линз?
6. Чему равно фокусное расстояние плоского зеркала?
7. Чему равно увеличение плоского зеркала?

### Пример решения задачи

На каком расстоянии  $d$  от рассеивающей линзы с оптической силой  $D = -4$  дптр надо поместить предмет, чтобы его мнимое изображение получилось в  $k = 5$  раз меньше ( $\Gamma = \frac{1}{5}$ ) самого предмета? Постройте изображение предмета.

Дано:

$$D = -4 \text{ дптр}$$

$$\Gamma = \frac{1}{5}$$

$d = ?$

Решение

Из формулы для линейного увеличения

$$\frac{h'}{h} = \frac{f}{d} = \Gamma$$

находим:

$$f = \Gamma d.$$

По формуле тонкой линзы (рис. 83) с учетом правила знаков:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

и с учетом выражения для  $f$  получаем:

$$d = \frac{1 - \frac{1}{\Gamma}}{D};$$

$$d = \frac{1 - \frac{1}{\frac{1}{5}}}{-4 \text{ дптр}} = \frac{1 - 5}{-4} \text{ м} = 1 \text{ м}.$$

Ответ:  $d = 1 \text{ м}$ .

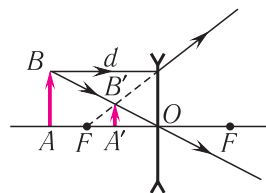


Рис. 83

### Упражнение 16

1. Постройте изображение предмета  $AB$  в тонких собирающей и рассеивающей линзах (рис. 84, 85). Какое это изображение?

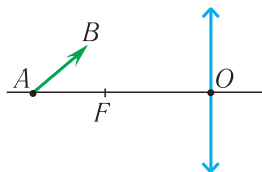


Рис. 84

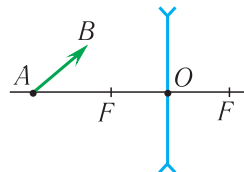


Рис. 85

2. Определите построением положение фокусов тонкой линзы, если задана главная оптическая ось и ход произвольного луча  $ABC$  (рис. 86).

3. Заполните таблицу классификации изображений, которые дает тонкая линза в различных случаях.

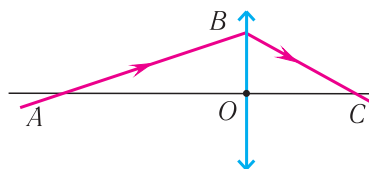


Рис. 86

$d$	$f$	$\Gamma$	Вид изображения
Собирающая линза			
$d > 2F$			
$d = 2F$			
$F < d < 2F$			
$d = F$			
$d < F$			
Рассеивающая линза			

4. Изображение предмета, находящегося на расстоянии  $d = 32,0$  см перед тонкой линзой, расположено на расстоянии  $f = 43,0$  см за линзой. Какая это линза и чему равно ее фокусное расстояние  $F$ ?

5. Фокусное расстояние тонкой собирающей линзы  $F = 15$  см. Где расположен точечный источник света, если его действительное изображение получается на экране на расстоянии  $f = 40$  см от линзы и удалено на  $H = 3,0$  см от ее главной оптической оси?

6. Тонкая линза с фокусным расстоянием  $F = 12$  см дает действительное изображение на расстоянии  $f = 20$  см от линзы. Определите расстояние  $d$ , на котором расположен предмет, и найдите увеличение  $\Gamma$  линзы.

7. Оптическая сила тонкой линзы  $D = 13\frac{1}{3}$  дптр. Где надо поместить предмет, чтобы получить мнимое изображение на расстоянии  $f = 25$  см от линзы?

8. Предмет находится на расстоянии  $l = 60$  см от экрана. Используя тонкую линзу, на экране получают сначала уменьшенное изображение предмета, а затем, перемещая линзу, — увеличенное изображение, которое в  $\Gamma = 2,0$  раза больше первого. Определите фокусное расстояние  $F$  линзы.

9. Узкий параллельный пучок света падает на свободную поверхность воды (показатель преломления которой  $n_{\text{в}} = 1,33$ ) в аквариуме под углом  $\alpha = 40^\circ$ . Пре-

ломленный луч проходит до дна аквариума, где падает на горизонтальное плоское зеркало, отражающее луч обратно до поверхности, где луч преломляется в воздух. Найдите угол  $\delta$  между падающим лучом и лучом, вышедшим из воды. Определите расстояние  $l$  между точками входа и выхода луча на свободной поверхности воды. Глубина аквариума  $h = 40$  см.

## § 18. Оптические приборы для получения действительных изображений

Посредством глаза, а не глазом  
Смотреть на мир умеет разум.

*Вильям Блейк*

Познакомимся с оптическими приборами, широко используемыми человеком.

По своему назначению оптические приборы подразделяются на две большие группы:

- 1) для получения действительных изображений предметов (проекторные, фотоаппараты);
- 2) для увеличения угла зрения (лупа, микроскоп, подзорная труба).

В данном параграфе рассмотрим приборы для получения действительных изображений предметов.

**Мультимедийный проектор** — оптический прибор, используя который на экране получают действительное (прямое или обратное) увеличенное изображение, «снятое» с экрана компьютера, телевизора или других источников видеосигнала (рис. 87, а).

Для формирования изображения в мультимедийных проекторах используются различные базовые технологии: жидкокристаллическая технология, технология цифровой обработки света или технология формирования цифровых изображений методом отражения.

При формировании цифрового изображения методом отражения источник

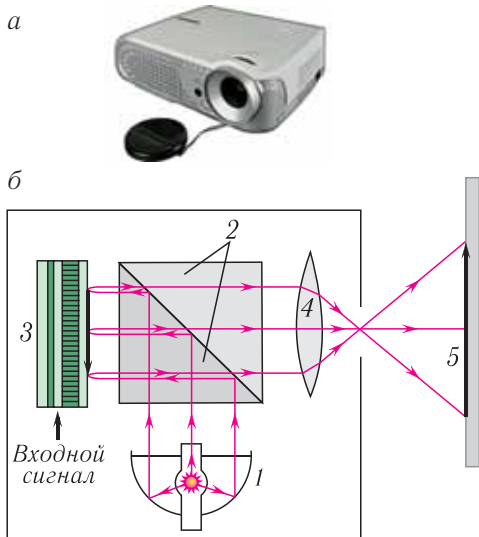


Рис. 87. Мультимедийный проектор, работающий по технологии отражения: а — общий вид; б — оптическая схема

света 1 при помощи разделяющих призм 2 освещает оптическую матрицу с изображением 3 и при помощи системы проекционных линз 4 передает изображение на экран 5 (рис. 87, б).

Популярность мультимедийных проекторов обусловлена их универсальностью, поскольку помимо компьютерного изображения они поддерживают практически все существующие стандарты видеозаписей, а также полностью совместимы с активно развивающимся телевидением высокой четкости.

Проекторы активно используются на научных конференциях, выставках, семинарах и т. д., поскольку по размерам изображения и по возможностям его настройки с ними не способны конкурировать ни жидкокристаллические телевизоры, ни плазменные.

**Фотоаппарат** — прибор, предназначенный для получения действительных уменьшенных обратных изображений предметов на фотопленке. При этом предметы могут быть расположены на различном удалении от точки съемки. Фотоаппарат состоит из закрытой светонепроницаемой камеры и системы линз, называемых **объективом** ( $O$ ) (рис. 88).

Перемещая объектив фотоаппарата, добиваясь наводки на резкость, при которой изображение предмета формируется точно на фотопленке. В противном случае изображение получается нечетким (размытым). Количество световой энергии, поступающей на пленку, определяется размерами *диафрагмы* и временем открытия затвора (*выдержкой*).

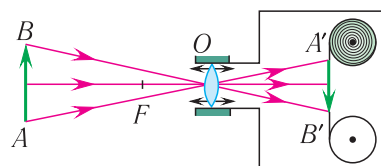


Рис. 88. Ход лучей в фотоаппарате:  $AB$  — предмет;  $A'B'$  — изображение на фотопленке;  $O$  — объектив



Фотографический метод регистрации изображения изобрели в 1839 г. Л. Дагер и Ж. Ньепс.



Рис. 89. Цифровой фотоаппарат

На смену пленочным пришли электронные (цифровые) фотокамеры (рис. 89), в которых изображение записывается не на фотопленку, а на специальный чувствительный элемент. Он покрыт сенсорами освещенности, каждый из которых имеет фильтр одного из основных цветов: синий, красный или зеленый.

На элементе формируется точка изображения — **пиксель** (от англ. *pixel (picture element)* — элемент изображения). Чем больше пикселей, тем более качественное изображение получается. Поэтому важнейшей характеристикой цифрового фотоаппарата является его разрешение, т. е. количество пикселей. У самых простых фотоаппаратов оно составляет несколько мегапикселей, а у лучших — до нескольких десятков мегапикселей.

Правообладатель Народная асвета

Количество сенсоров влияет также на величину изображения, которую можно получить с помощью данного аппарата.

При нажатии кнопки затвора на каждом пикселе чувствительного элемента аппарата фиксируется интенсивность каждого из трех цветов. Процессор аппарата, как у компьютера, собирает информацию о цвете в файл и записывает его на запоминающее устройство — карту памяти. После этого ее можно просматривать на компьютере или специальной приставке. Но самое важное, и на самом фотоаппарате можно сразу посмотреть сделанный снимок, что является огромным преимуществом цифрового фотоаппарата.

Какие еще достоинства имеет цифровой фотоаппарат?

Во-первых, возможность получения неограниченно большого количества копий без потери качества «оригинала» фотографии.

Во-вторых, возможность использования фотоаппарата при различных световых условиях и с разных расстояний (например, у некоторых моделей от 2 см) без дополнительных устройств.

В-третьих, возможность использования цифровых изображений для переноса на различные поверхности и размещения на Web-сайте, а также редактирования с помощью различных компьютерных программ.

В-четвертых, возможность сделать большое количество снимков с минимальным интервалом времени (10 и более кадров в секунду).

В-пятых, габаритные размеры и масса. Например, некоторые аппараты имеют размеры  $10 \times 6 \times 5$  см и массу 200 г.



1. Для чего предназначен мультимедийный проектор?
2. Для чего служит фотоаппарат? Назовите его основные части и объясните их назначение.
3. Можно ли сфотографировать себя в зеркале? Что при этом получим на фотопленке? Ответ обоснуйте.

## § 19. Оптические приборы для увеличения угла зрения

Основную часть информации (примерно 90 %) об окружающем мире мы получаем с помощью органов зрения.

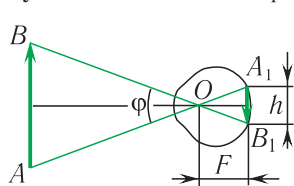


Рис. 90. Ход лучей в глазу

*Расстояние наилучшего зрения* — это расстояние от предмета до глаза, при котором глазные мышцы не устают и угол зрения максимален.

Размер изображения  $A_1B_1$  предмета  $AB$  на сетчатке (рис. 90) определяется *углом зрения*  $\varphi = \frac{h}{F}$ , вершина

которого находится в оптическом центре глаза — точке  $O$ .



Угол зрения образован лучами, направленными на крайние точки предмета, т. е. *это угол, под которым виден предмет из оптического центра глаза*. Отметим, что изображение на сетчатке всегда действительное, уменьшенное и перевернутое.

От бесконечно удаленного предмета в глаз попадает пучок параллельных лучей. В этом случае ( $d = \infty$ ) аккомодации не требуется. Если предмет приближается, то лучи становятся расходящимися. В этом случае оптическая система глаза собирает лучи на сетчатке. В отличие от фотоаппарата, наводка на резкость достигается не перемещением «объектива» хрусталика, а изменением его оптической силы.

Понятие *нормальный глаз* человека характеризуется расстоянием наилучшего зрения около 25 см и пределом зрения (дальняя точка), находящимся на бесконечности.

С возрастом возможность аккомодации быстро уменьшается в основном из-за уплотнения хрусталика, теряющего способность достаточно сжиматься. Пожилой человек не может отчетливо видеть близкие предметы, а также различать буквы в газетах и книгах. К пятидесяти годам расстояние наилучшего зрения увеличивается в среднем до 50 см.

С возрастом, вследствие болезни или при несоблюдении гигиены у глаз могут появиться дефекты. Два наиболее распространенных дефекта зрения — *близорукость* и *дальнозоркость*.

**Очки** — первый оптический прибор, примененный человеком. Появились они довольно давно — в XIII — XIV вв. Для исправления близорукости используют очки с рассеивающими линзами, а дальнозоркости — очки с собирающими линзами. Сейчас очки стали обычным предметом обихода и многим дают возможность нормально жить и работать. Другой разновидностью устройств, корректирующих зрение, являются *контактные линзы*. Помимо практичности, их особенностью является плотный контакт с роговицей, позволяющий значительно уменьшить искажения и увеличить поле зрения системы глаз-линза.

Наш глаз не дает возможности видеть очень малые объекты без специальных вспомогательных устройств, так как мы ясно видим объект только в том случае, когда воспринимаем зрительные впечатления от различных точек объекта.

Соответственно, две точки можно раздельно видеть только тогда, когда их изображения получаются на различных чувствительных элементах сетчатки — палочках или колбочках. Для этого необходимо, чтобы лучи от рассматриваемых точек шли через оптический центр глаза под углом около  $1'$ . Поэтому для нормального глаза минимальный размер изображения составляет примерно 3,6 мкм. Кроме того, минимальный угол зрения должен соответствовать дифракционному расширению пучка, вызванному его прохождением через зрачок.

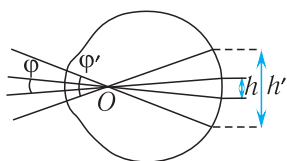


Рис. 91. Увеличение угла зрения

Чем больше угол  $\phi$  между прямыми, соединяющими оптический центр глаза  $O$  (рис. 91) с крайними точками предмета (угол зрения), тем яснее виден предмет и тем большее число различных деталей можно различить. Угол зрения можно увеличить ( $\phi' > \phi$ ), приближая предмет к глазу или глаз к предмету. При этом размер изображения на сетчатке также увеличивается ( $h' > h$ ).

Таким образом, увеличение объема зрительной информации может быть достигнуто лишь за счет увеличения угла зрения. Простейший способ увеличить угол зрения — приблизить предмет к глазу. Однако это не всегда возможно. Наименьшее расстояние до глаза, при котором мы еще видим предмет, определяется ближним пределом аккомодации. Опыт показывает, что объект не фокусируется на сетчатке, если он находится от глаза на расстоянии ближе 14 см. Вследствие этого возникает потребность в создании приборов, позволяющих увеличить угол зрения.

Оптические приборы, вооружающие глаз, подразделяются на две группы:

- 1) приборы для рассматривания *очень мелких объектов* (лупа, микроскоп), которые эти объекты как бы «увеличивают»;
- 2) приборы, предназначенные для рассматривания *удаленных объектов* (зрительные трубы, бинокли, телескопы), которые эти объекты как бы «приближают».

**Лупа** — оптический прибор (собирающая линза), позволяющий увеличить угол зрения (т. е. увеличить мелкие детали предметов) (рис. 92).

Лупа представляет собой короткофокусную линзу ( $F$  от 10 мм до 100 мм), которая располагается между глазом и предметом.

Мнимое увеличенное изображение предмета получается на *расстоянии наилучшего зрения* —  $d_0 = 25$  см для нормального глаза (рис. 93). Таким образом изображение предмета рассматривается глазом практически без напряжения.



Рис. 92. Лупа

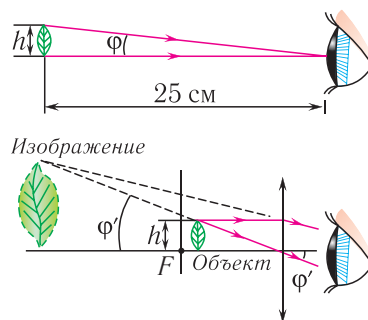


Рис. 93. Мелкий предмет, рассматриваемый: а — невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения; б — через лупу

Видимое увеличение, которое дает лупа:

$$\Gamma = \frac{d_0}{F},$$

где  $d_0$  — расстояние наилучшего зрения,  $F$  — фокусное расстояние лупы.

Вследствие того, что  $d_0 = 0,25$  м, обычно лупы имеют увеличение от 2,5 до 25 раз. Лупы с увеличением  $\Gamma > 40$  не применяются из-за сильных искажений изображения или малости обзора.



В XVII в. голландский мастер Антони ван Левенгук с помощью линз мог видеть капилляры кровеносной системы, красные кровяные тельца, изучать подробности строения простейших одноклеточных.

**Микроскоп** (от греч. *micros* — малый и *skopeo* — смотрю) — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным глазом.

Назначение микроскопа состоит в том, чтобы получать с его помощью такое изображение не различного для глаза предмета, которое, не находясь ближе 14 см от глаза, рассматривалось бы под углом зрения большим, чем предельный угол в  $1'$ .

Микроскоп (рис. 94, а) состоит из двух собирающих линзовых систем: объектива 1 с фокусным расстоянием  $F_1$ , равным нескольким миллиметрам, и окуляра 2 с фокусным расстоянием  $F_2$ , равным нескольким сантиметрам (рис. 94, б). Предмет  $AB$  помещается перед фокусом объектива. Расстояние между фокусами объектива и окуляра равно  $l$ , причем  $l \gg F_1$ ,  $l \gg F_2$ .

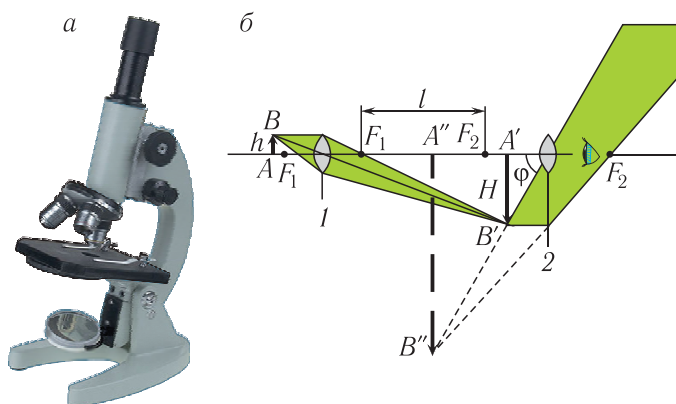


Рис. 94. Микроскоп: а — общий вид; б — оптическая схема и ход лучей

За объективом (за фокусом  $F_2$ ) получается действительное увеличенное изображение  $A'B'$  предмета, которое является предметом наблюдения для окуляра. Окончательное изображение  $A''B''$  предмета является мнимым, перевернутым и увеличенным (см. рис. 94, б). Увеличение  $\Gamma$  микроскопа определяется увеличением объектива  $\Gamma_1 = \frac{l}{F_1}$  и окуляра  $\Gamma_2 = \frac{d_0}{F_2}$ :

$$\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2 = \frac{ld_0}{F_1 F_2}.$$

Здесь  $l$  — оптическая длина тубуса микроскопа, т. е. расстояние между фокальными точками  $F_1$  и  $F_2$ ,  $d_0 \approx 25$  см — расстояние наилучшего зрения для нормального глаза.

В микроскоп объект виден детальнее, поскольку рассмотрение мнимого изображения  $A''B''$  объекта в окуляр осуществляется под большим углом зрения.

Из-за явления дифракции в микроскоп невозможно рассматривать объекты, размеры которых сравнимы с длиной волны света. Таким образом, максимальное увеличение микроскопа ограничено ( $\Gamma \leq 2000$ ) вследствие волновой природы света.



В XVII в. появились первые микроскопы. Левенгук прославился своими микроскопами, которые давали увеличение до 270 раз.

При рассматривании крупных, но очень удаленных объектов угол зрения мал и может быть меньше предельного. В этом случае для увеличения угла зрения применяются бинокли и телескопы.

**Телескопы** — астрономические оптические приборы, предназначенные для наблюдения небесных тел. О них вам будет подробно рассказано в курсе астрономии.

Простейшим телескопом является *подзорная труба*. Она состоит из двух линзовых систем — объектива 1 и окуляра 2 (рис. 95). Подзорная труба с собирающим окуляром называется *трубой Кеплера*. Для получения максималь-

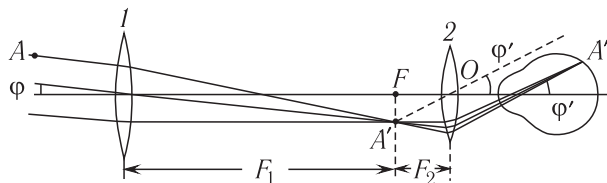


Рис. 95. Ход лучей в трубе Кеплера

ного угла зрения в трубе Кеплера совмещают задний фокус объектива и передний фокус окуляра. В таком случае при рассматривании удаленного предмета из окуляра выходят пучки параллельных лучей. Это позволяет наблюдать удаленные объекты в телескоп нормальным глазом в ненапряженном состоянии (без аккомодации).

Рассматриваемый предмет  $A$  обычно находится на очень большом расстоянии от объектива. Промежуточное изображение  $A'$  получается практически сразу за фокусом объектива. Оно расположено от окуляра на расстоянии меньше его фокусного расстояния. Окончательное изображение  $A''$  (увеличенное мнимое и перевернутое) образуется на сетчатке глаза (см. рис. 95). Увеличение  $\Gamma$ , которое дает труба Кеплера:

$$\Gamma = \frac{F_1}{F_2},$$

где  $F_1$  — фокусное расстояние объектива,  $F_2$  — фокусное расстояние окуляра. Длина телескопа  $l = F_1 + F_2$ .

Две маленькие подзорные трубы, составленные вместе для двух глаз, образуют **бинокль** (рис. 96,  $a$ ). Поскольку труба Кеплера дает перевернутое изображение, то в биноклях, построенных на ее основе, применяется оборачивающая система из двух призм с полным отражением (рис. 96,  $b$ ).

Наличие двух призм позволяет создать прямое изображение, так как одна призма поворачивает изображение в вертикальной плоскости, другая — в горизонтальной. Кроме того, благодаря призмам объективы в полевом бинокле можно раздвинуть больше, чем окуляры, которые приставляются к глазам (см. рис. 96). Соответственно, изображение в таком бинокле не только приближено, но и объемно.

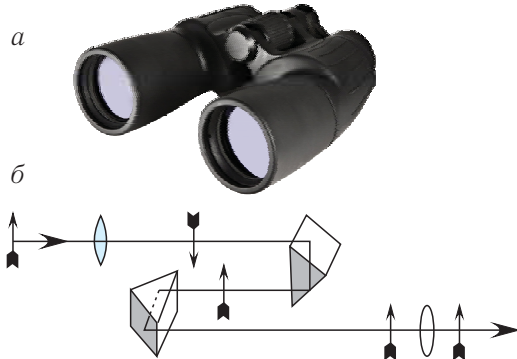


Рис. 96. Бинокль:  $a$  — общий вид;  $b$  — оборачивающая система призм



1. Что такое угол зрения? Чем определяется минимальный угол зрения?
2. Для чего предназначена лупа? Микроскоп? Подзорная труба? Бинокль?
3. Чем микроскоп отличается от подзорной трубы?

### Пример решения задачи

Один и тот же предмет фотографируют дважды с расстояний  $d_1 = 60$  см и  $d_2 = 11$  дм. Определите фокусное расстояние  $F$  объектива фотоаппарата,

если высота изображений предмета на снимках  $h_1 = 4,0$  см и  $h_2 = 2,0$  см соответственно.

Дано:

$$d_1 = 60 \text{ см} = 0,60 \text{ м}$$

$$d_2 = 11 \text{ дм} = 1,1 \text{ м}$$

$$h_1 = 4,0 \text{ см} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$h_2 = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$F = ?$

Решение

Линейное увеличение предмета высотой  $H$  в первом и втором случаях соответственно:

$$\Gamma_1 = \frac{h_1}{H} = \frac{f_1}{d_1}; \quad \Gamma_2 = \frac{h_2}{H} = \frac{f_2}{d_2}.$$

Запишем формулу тонкой линзы для этих случаев:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}.$$

Из первых двух уравнений находим:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{h_1 d_1}{h_2 d_2}.$$

Отсюда

$$f_2 = f_1 \frac{h_2 d_2}{h_1 d_1}; \quad f_2 = f_1 \frac{2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 1,1 \text{ м}}{4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 0,60 \text{ м}} = \frac{11}{12} f_1.$$

Подставим полученное значение в формулу тонкой линзы и решим систему уравнений:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{12}{11 f_1};$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}.$$

Найдем расстояние:

$$f_1 = \frac{\frac{12}{11} - 1}{\frac{1}{0,60} - \frac{1}{1,1}} \text{ м} = 0,12 \text{ м}.$$

Подставляя полученное значение  $f_1$  в формулу тонкой линзы, найдем искомое фокусное расстояние объектива:

$$F = \frac{f_1 d_1}{f_1 + d_1}; \quad F = \frac{0,12 \text{ м} \cdot 0,60 \text{ м}}{0,12 \text{ м} + 0,60 \text{ м}} = 0,10 \text{ м}.$$

Ответ:  $F = 0,10$  м.

### Упражнение 17

1. Определите оптическую силу  $D$  объектива проекционного аппарата, если на диапозитиве высота предмета  $h = 4,0$  см, а его изображение на экране, находящемся от объектива на расстоянии  $f = 6,0$  м, имеет высоту  $H = 1,6$  м.

2. Объектив фотоаппарата имеет фокусное расстояние  $F = 12,5$  см. На каком расстоянии  $d$  от объектива должен находиться предмет, чтобы на снимке его изображение получилось в  $n = 4,00$  раза меньше предмета?

3. Высота здания на фотоснимке  $H = 7,0$  см. Определите истинную высоту  $h$  здания, если известно, что фокусное расстояние объектива  $F = 20$  см, а съемка проводилась на расстоянии  $d = 8,0$  м от здания.

4. Лупа с трехкратным увеличением для нормального глаза фокусируется на изображение вблизи расстояния наилучшего зрения для нормального глаза. Определите фокусное расстояние  $F$  лупы.

5. Близорукий человек читает без очков, держа книгу на расстоянии  $d = 15$  см от глаз. Определите оптическую силу  $D$  контактных линз, необходимых ему для чтения.

6. Определите оптическую силу  $D_1$  объектива микроскопа, дающего увеличение  $\Gamma = 400$ , если длина его тубуса  $l = 15$  см, а фокусное расстояние окуляра  $F_2 = 5,0$  см.

7. Какую оптическую силу  $D$  должны иметь очки для чтения, чтобы их владелец, расстояние наилучшего зрения которого  $d_0 = 120$  см, смог читать книгу на расстоянии  $d = 25$  см? Считать, что расстояние от линз очков до глаз  $f = 2,0$  см.

8. С какой выдержкой  $t$  надо фотографировать конькобежца, модуль скорости которого  $v = 6,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , чтобы размытость изображения (смещение за время съемки) не превышала  $\Delta x = 0,10$  мм? Фокусное расстояние объектива  $F = 15$  см, расстояние от конькобежца до фотоаппарата  $d = 20$  м.

## § 20. Дисперсия света. Спектр. Спектральные приборы

*Источником оптического излучения* называется физическое тело, преобразующее любой вид энергии в энергию электромагнитных излучений оптического диапазона. Любой источник света характеризуется полной энергией, которую он излучает в единицу времени. Эта энергия распределяется неравномерно между волнами различной длины. В общем случае произвольный электромагнитный сигнал состоит из набора различных электромагнитных волн, длины (или частоты) которых можно установить.

Подобную процедуру называют *спектральным анализом* сигнала, а совокупность полученных «простейших» электромагнитных волн — *спектром*. Та-

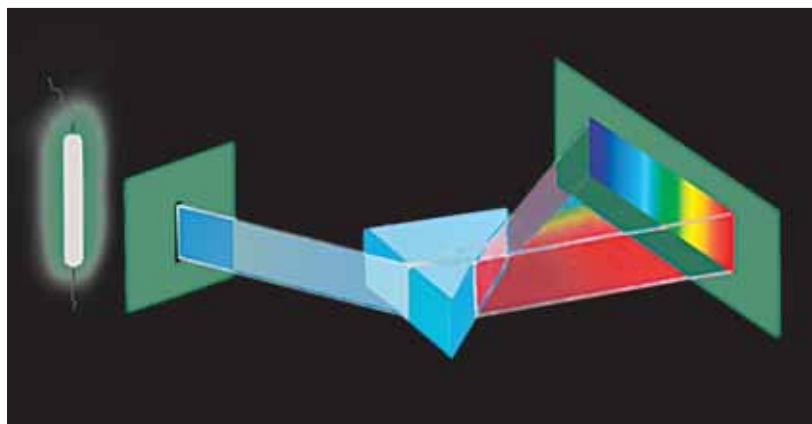


Рис. 97. Разложение белого света призмой

ким образом, **спектр** — распределение энергии, излучаемой или поглощаемой веществом, по частотам или длинам волн.

Если направить пучок белого света на призму, то мы обнаружим за призмой на экране разноцветную полоску (рис. 97). Ньютон, впервые проделавший данный эксперимент, назвал ее спектром.

Разложение пучка белого света в спектр призмой является следствием **дисперсии** (от лат. *dispersio* — рассеяние) **света** — зависимости скорости волны в среде от его частоты  $\nu(\nu)$ . Так как скорость света в веществе  $v = \frac{c}{n}$ , то абсолютный показатель преломления вещества оказывается зависящим от частоты  $n(\nu)$  или длины волны  $n(\lambda)$  распространяющегося излучения. Вследствие явления дисперсии призма различным образом преломляет световые волны разных цветов.



Цвет зависит от частоты световой волны, подобно тому, как различным высотам звука соответствуют различные частоты звуковых волн.

Дисперсия веществ может быть существенно различной. В таблице 6 приведены в качестве примера значения абсолютных показателей преломления некоторых прозрачных веществ.

Дисперсия присуща всем средам, кроме вакуума. Если абсолютный показатель преломления среды уменьшается с ростом длины волны, то такая **дисперсия** называется **нормальной**, в противоположном случае — **аномальной**.

Порядок следования цветов в спектре легко запомнить с помощью известной фразы:

**П**равообладатель **Н**ародная **а**света



красный — 770—630 нм	каждый
оранжевый — 630—590 нм	охотник
желтый — 590—570 нм	желает
зеленый — 570—495 нм	знать,
голубой, синий — 495—435 нм	где сидят
фиолетовый — 435—390 нм	фазаны

Таблица 6. Зависимость абсолютных показателей преломления веществ от длины волны

$\lambda$ , нм	Цвет	Стекло, $n$	Кварц, $n$	Алмаз, $n$	Лед, $n$
410	Фиолетовый	1,5380	1,5570	2,4580	1,3170
470	Голубой	1,5310	1,5510	2,4439	1,3136
530	Зеленый	1,5260	1,5468	2,4260	1,3110
590	Желтый	1,5225	1,5438	2,4172	1,3087
610	Оранжевый	1,5216	1,5432	2,4150	1,3080
670	Красный	1,5200	1,5420	2,4100	1,3060



Явления дисперсии и полного отражения приводят к образованию **радуги**, вследствие преломления солнечных лучей на мельчайших водяных капельках во время дождя, к нежелательному «окрашиванию» изображений в оптических системах (хроматическая аберрация) и т. д.

Измерения и наблюдения оптических спектров производятся с помощью специальных приборов. Приборы для визуального наблюдения спектров называются **спектроскопами**, приборы с фотографической регистрацией спектров — **спектрографами** (применяются в различных областях спектра с соответствующей чувствительностью фотоматериалов), приборы с фотоэлектрическими и тепловыми приемниками излучения — **спектрометрами** или **спектрофотометрами** (рис. 98).

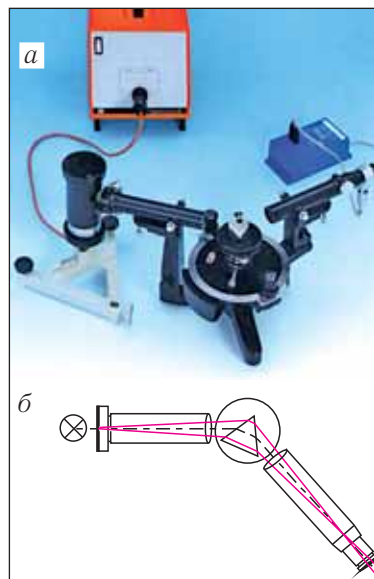


Рис. 98. Призмный спектрофотометр: а — общий вид; б — оптическая схема



Первый спектроскоп сконструировал в 1815 г. немецкий физик Иозеф Фраунгофер.

Любой спектральный прибор имеет *входной коллиматор*, *диспергирующий элемент* (призма, дифракционная решетка) и *выходной коллиматор*.

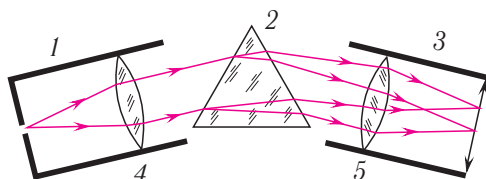


Рис. 99. Устройство спектрографа: 1 — входной коллиматор; 2 — диспергирующий элемент (призма); 3 — выходной коллиматор; 4, 5 — линзы

Входной коллиматор 1 (рис. 99) представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза 4. Входная щель, освещенная исследуемым излучением, устанавливается в фокусе собирающей линзы 4, которая образует параллельный пучок света и направляет его на диспергирующий элемент 2.

Диспергирующий элемент преобразует исходный пучок в систему параллельных монохроматических пучков, выходящих из элемента под разными углами, зависящими от длины волны излучения. Собирающая линза 5 выходного коллиматора 3 (см. рис. 99) создает на экране (фотопластинке), расположенном в фокальной плоскости линзы, совокупность монохроматических изображений входной щели. В итоге на экране получается пространственное разложение излучения в спектр.

Назначение спектральных приборов — регистрировать зависимость интенсивности спектральных линий от частоты (длины) волны излучения, т. е. фактически определять, из каких монохроматических волн состоит данное излучение.

Напомним, что в качестве диспергирующих элементов спектральных приборов используются призма или дифракционная решетка, причем в наиболее совершенных спектральных приборах используются именно дифракционные решетки.



1. Что называют спектром?
2. Что такое дисперсия света?
3. Почему стеклянная призма разлагает пучок белого света в спектр?
4. Какие приборы применяются для наблюдения и регистрации спектров?
5. Каковы назначение, принцип устройства и работы спектральных приборов?
6. Чем будут различаться спектры, полученные от одного и того же источника излучения при помощи дифракционной решетки и призмы?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 3

**Оптика** — раздел физики, в котором изучают свойства света, его физическую природу и взаимодействие с веществом.

Под **светом** понимают электромагнитные волны с частотами от  $1,5 \cdot 10^{11}$  Гц до  $3 \cdot 10^{16}$  Гц (длины волн изменяются в диапазоне, соответствующем инфракрасному, видимому и ультрафиолетовому излучению).

Электромагнитные волны распространяются в вакууме с максимально возможной в природе скоростью переноса энергии —  $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Скорость распространения света в веществе** определяется соотношением

$$v = \frac{c}{n}.$$

**Абсолютный показатель преломления вещества** равен отношению модуля скорости света в вакууме к модулю скорости света в веществе:

$$n = \frac{c}{v}.$$

**Длина волны  $\lambda_n$  в веществе** определяется соотношением:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n},$$

где  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме,  $n$  — абсолютный показатель преломления вещества.

При переходе световой волны из вакуума в вещество или из одного вещества в другое **частота света остается неизменной**.

**Интерференция** света — явление возникновения устойчивой во времени картины чередующихся максимумов и минимумов амплитуд результирующей волны при сложении двух (или нескольких) когерентных волн.

**Оптическая разность хода** волн  $\delta = n_1 l_1 - n_2 l_2 = c \left( \frac{l_1}{v_1} - \frac{l_2}{v_2} \right)$  — разность расстояний, пройденных волнами, с учетом их различных модулей скоростей  $v_1$  и  $v_2$  распространения в этих средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

**Условие максимумов интерференции:**

$$\delta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

**Условие минимумов интерференции:**

$$\delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Устойчивое во времени распределение амплитуд колебаний в пространстве при интерференции называется **интерференционной картиной**.

#### **Принцип Гюйгенса — Френеля:**

все вторичные источники, расположенные на волновом фронте, когерентны между собой. Огибающая волна, получающаяся в результате интерференции вторичных волн, совпадает с волной, испускаемой источником.

Явление огибания волнами препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от прямолинейного, называется **дифракцией**.

**Дифракционной решеткой** называют оптический прибор, предназначенный для разложения света в спектр и точного измерения длин волн. Он состоит из большого числа равноотстоящих параллельных штрихов, нанесенных на стеклянную или металлическую поверхности.

Под **лучом** понимают линию, вдоль которой переносится энергия электромагнитной волны.

**Геометрической оптикой** называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о нем как о совокупности световых лучей.

Изменение направления распространения света при прохождении через границу раздела двух сред называется **преломлением света**.

#### **Закон преломления света:**

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред и равная отношению показателя преломления второй среды относительно первой;

лучи, падающий и преломленный, лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения луча к плоскости границы раздела двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Явление полного отражения падающего луча от границы раздела сред называется **полным отражением света**. Наименьший угол, с которого начинается полное отражение, называется **предельным углом полного отражения**:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1).$$

#### **Формула тонкой линзы:**

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Правообладатель Народная асвета

**Правило знаков:**

в случае собирающей линзы, действительных источника и изображения знаки перед величинами  $F$ ,  $d$ ,  $f$  следует выбирать *положительными*; в случае рассеивающей линзы, мнимого источника и изображения знаки выбирают *отрицательными*.

**Линейным (поперечным) увеличением**  $\Gamma$  называется отношение линейного размера изображения  $h'$  к линейному размеру предмета  $h$ :

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}.$$

**Цифровой фотоаппарат** — оптический прибор, предназначенный для получения и записи оптического изображения на электронные носители (флэш-карты, диски и т. д.).

**Лупа** — оптический прибор (собирающая линза), позволяющий увеличить угол зрения.

**Микроскоп** — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным взглядом.

**Спектр** — распределение энергии, излучаемой или поглощаемой веществом, по частотам или длинам волн.

Измерения и наблюдение оптических спектров производятся с помощью *спектральных приборов*. Назначение спектральных приборов — регистрировать зависимость интенсивности спектральных линий от частоты (длины) волны излучения, т. е. определять, из каких монохроматических волн оно состоит.

## Глава 4

# Основы специальной теории относительности



Роль скорости распространения света в вакууме настолько важна в физике и технике, а современные методы ее измерения настолько надежны, что в 1983 г. было принято решение считать значение этой скорости точным. Оно равно  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Эксперименты показывают, что с такой скоростью распространяется в вакууме не только видимый свет, но и любое электромагнитное излучение — от радиоволн до гамма-излучения.

Развитие науки и техники позволило физикам уже на рубеже XIX—XX вв. провести достаточно точные измерения скорости света. Как оказалось, скорость света в вакууме не зависит ни от скорости движения приемника света, ни от скорости источника, излучающего свет.

Эти удивительные экспериментальные результаты привели физиков к пересмотру представлений о свойствах пространства и времени. Была создана **специальная теория относительности (СТО)** — раздел физики, в котором изучаются свойства пространства и времени, а также законы движения тел при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Специальная теория относительности называется также *релятивистской теорией* (от лат. *relativus* — относительный). Явления, происходящие при скоростях, сравнимых со скоростью света, характеризующие их величины (скорость, энергия, импульс и т. д.) и законы этих явлений тоже называются *релятивистскими*.

Заметим, что помимо специальной теории относительности (СТО) имеется и *общая теория относительности (ОТО)*, которая обобщает СТО на случай, когда существенны гравитационные явления.

В повседневной жизни и в современных технологиях (даже космических) мы не встречаемся с релятивистскими скоростями. Зачем же изучать теорию относительности? Для этого имеется целый ряд причин.

Во-первых, основную информацию об окружающем мире мы получаем с помощью зрения, непосредственно воспринимая световое излучение. Таким образом, «самый релятивистский» объект природы — свет играет важнейшую роль в жизни каждого человека.

Во-вторых, как показывает весь накопленный опыт, скорость света в вакууме имеет фундаментальное, выделенное значение: ни один сигнал не может распространяться, ни одна частица не может двигаться быстрее света.

В-третьих, релятивистская теория необходима для объяснения явлений в атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц. Без использования законов СТО невозможно и создание ускорителей элементарных частиц.

В-четвертых, релятивистская теория играет важную роль в изучении Вселенной. Обнаружены галактики, движущиеся с огромными скоростями. Без релятивистской теории нельзя объяснить свойства таких астрономических объектов, как «черные дыры», нейтронные звезды, пульсары.

Наконец, каждый человек должен иметь современные представления о пространстве и времени, об относительных и абсолютных явлениях, о таких удивительных релятивистских эффектах, как относительность одновременности, замедление времени и сокращение длины при движении объектов.

## § 21. Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Экспериментальные предпосылки специальной теории относительности



Система отсчета, относительно которой все тела покоятся или движутся с постоянной скоростью при отсутствии воздействия на них, называется *инерциальной* (ИСО).

Принцип относительности Галилея: во всех ИСО все механические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.

Классический закон сложения скоростей:  $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{V}$ , где  $\vec{v}_1$  — скорость движения тела относительно ИСО-1,  $\vec{v}_2$  — относительно ИСО-2,  $\vec{V}$  — скорость ИСО-2 относительно ИСО-1.

Создание специальной теории относительности исторически связано с развитием электродинамики — науки об электрических и магнитных явлениях. За два столетия, которые отделяли физику Галилея и Ньютона от физики Максвелла и Герца, в ней накопилось огромное количество новых научных фактов. В то же время представление о мироздании базировалось на **механической** картине мира, основанной на механике Галилея — Ньютона (*классической механике*).

Как известно, в классической механике такие понятия, как координата, скорость, траектория тела, являются *относительными* — они изменяются при пе-

переходе от одной ИСО к другой. В то же время, некоторые понятия и величины в классической физике считались *абсолютными*. Например, как само собой разумеющееся принималось положение об *абсолютности времени* (ход времени везде одинаков). Очевидным следствием этих представлений является классический закон сложения скоростей. Согласно этому закону при переходе к ИСО, которая движется со скоростью  $V$  навстречу телу, модуль скорости тела становится больше на величину, равную  $V$ . Это означает, что в механике Галилея — Ньютона не существует максимально возможной (*предельной*) скорости.

Такие представления согласовывались как с повседневным опытом, так и с экспериментами в механике, акустике, гидродинамике и т. д.

Однако электромагнитные процессы происходят со скоростями, сравнимыми со скоростью света, т. е. гораздо большими, чем скорости движения тел, с которыми имеет дело механика. В связи с этим возникают вопросы: будет ли справедлив принцип относительности Галилея (важнейший принцип классической механики) для электромагнитных явлений? Зависит ли скорость света в вакууме от движения источника и/или приемника излучения, как это должно быть по классической теории? Существует ли в природе предельная скорость? Для ответа на эти вопросы были необходимы новые эксперименты.

Рассматривая проблему распространения электромагнитных волн (света), полезно обратиться к хорошо изученным закономерностям поведения звуковых волн. Они могут распространяться только в упругой среде — газообразной, жидкой или твердой. Естественно принять предположение, что и для распространения света необходима некоторая среда. Ее называли *мировым эфиром*. При таком подходе решающим становится вопрос о скорости света, измеренной наблюдателем, который движется относительно эфира.

Вернемся к аналогии со звуком. Пусть скорость звука в покоящейся среде равна  $v_{зв}$ . Эксперимент показывает, что при измерении скорости звука устройством, которое движется относительно этой среды со скоростью  $V$  навстречу звуку, получается величина, равная  $v_{зв} + V$ .

А что получится для распространения света? Зависит ли скорость света от движения лаборатории, в которой проводятся измерения этой скорости? В качестве такой быстро движущейся лаборатории ( $V \approx 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ) было предложено использовать Землю. Если считать, что Земля при своем обращении вокруг Солнца движется сквозь неподвижный эфир, то в лаборатории, находящейся на Земле, следует ожидать появления так называемого «эфирного ветра» (подобно тому, как возникает встречный поток воздуха при езде на мотоцикле в безветренную



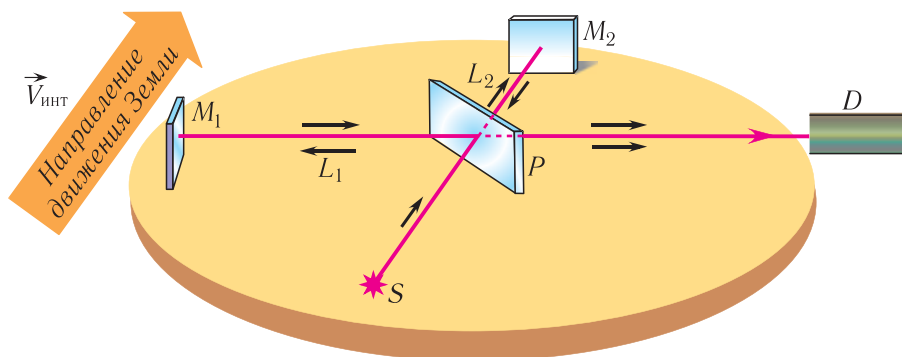


Рис. 100. Опыт Майкельсона — Морли

погоду). Как повлияет «эфирный ветер» на скорость света в системе отсчета «Земля»?

В 1887 г. американские физики А. Майкельсон и Р. Морли провели эксперимент, точность измерений в котором была достаточной для обнаружения влияния «эфирного ветра».

Разберем принципиальную схему их экспериментальной установки, получившей название *интерферометр Майкельсона* (рис. 100). Он состоял из оптического устройства, расположенного на массивной каменной платформе, плавающей в бассейне с ртутью. Такая конструкция практически исключала влияние механических колебаний платформы на оптические процессы. Свет от источника  $S$  с помощью полупрозрачной пластины  $P$  делился на два взаимно перпендикулярных луча  $L_1$  и  $L_2$  (см. рис. 100). Лучи отражались от зеркал  $M_1$  и  $M_2$ , а затем сводились вместе с помощью той же полупрозрачной пластинки  $P$  и попадали на детектор  $D$ . В результате сложения этих лучей получалась интерференционная картина (чередующиеся темные и светлые полосы, наблюдавшиеся с помощью детектора). Ожидалось, что эта картина будет существенно зависеть от ориентации интерферометра по отношению к его скорости  $V_{\text{инт}}$  относительно «неподвижного» эфира (см. рис. 100). Действительно, если один из пучков направлен вдоль скорости  $V_{\text{инт}}$ , а второй — перпендикулярно ей, то «эфирный ветер» будет неодинаковым для этих лучей. Соответственно, будет различным и время прохождения света для лучей  $L_1$  и  $L_2$  от источника  $S$  до приемника  $D$ , т. е. появится дополнительная «разность хода» интерферирующих световых волн.

При повороте платформы на  $90^\circ$  лучи «менялись местами» и соответственно должна была измениться разность хода. Как показывали расчеты, это привело бы к смещению интерференционной картины на  $0,4$  ширины интерференционной

полосы. Однако ожидаемое смещение не было обнаружено, хотя интерферометр Майкельсона позволял наблюдать сдвиг интерференционной картины даже на 0,01 полосы.

Эксперименты повторялись в разное время суток и в разные времена года (т. е. при различных направлениях скорости интерферометра относительно эфира). Во всех случаях смещение отсутствовало. Это было настолько же невероятно, как если при езде на мотоцикле вы не почувствовали бы встречного воздушного потока.

Результаты опыта Майкельсона — Морли и многих других экспериментов по измерению скорости света привели к выводу о независимости скорости света в вакууме как от движения приемника, так и от движения источника излучения. Представления о существовании мирового эфира оказались несостоятельными.

Данный факт был одной из величайших загадок физики конца XIX — начала XX в. Обнаружилось явное противоречие между экспериментом и классическими представлениями. Так, при переходе от одной ИСО к другой, согласно классическому закону сложения скоростей, к скорости света должна векторно прибавляться скорость движения этих ИСО друг относительно друга. Однако эксперимент упрямо утверждал, что скорость света в вакууме постоянна и во всех ИСО одинакова.

Это был вызов механической картине мира, которая складывалась веками.

Выдающиеся ученые того времени (А. Пуанкаре, Г. А. Лоренц и др.) выдвинули целый ряд полезных идей для объяснения этого противоречия. Однако решающий шаг был сделан в 1905 г. 25-летним физиком Альбертом Эйнштейном, работавшим тогда техническим экспертом Федерального патентного бюро в Берне (Швейцария). Им была создана новая теория пространства и времени, получившая название **специальная теория относительности**. Эта революционная теория позволила не только объяснить результат опыта Майкельсона — Морли, но и положила начало новому этапу развития физики.



1. Сформулируйте принцип относительности Галилея.
2. Какие величины в механике Ньютона считались относительными, а какие — абсолютными?
3. Сформулируйте закон сложения скоростей в классической механике.
4. Опишите эксперимент Майкельсона — Морли.
5. В чем состоит противоречие между классическим законом сложения скоростей и данными экспериментов по измерению скорости света?
6. Какую роль сыграл эксперимент Майкельсона — Морли в развитии физики?

## § 22. Постулаты специальной теории относительности. Относительность одновременности



Фундаментальное утверждение, лежащее в основе теории и принимаемое без доказательства, называется *постулатом* (аксиомой). В физике постулат, как правило, является обобщением экспериментальных фактов.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, физика столкнулась с противоречием между постоянством скорости света в вакууме и классическим законом сложения скоростей. Проиллюстрируем эту проблему на простом примере: автомобиль движется со скоростью  $V$  навстречу лучу прожектора. Согласно классическому закону сложения скоростей в системе отсчета «автомобиль» скорость света должна быть равной  $c + V$ . Однако результаты экспериментов свидетельствуют: во всех ИСО скорость света в вакууме равна  $c$ .

Для преодоления указанного противоречия пришлось глубоко проанализировать и пересмотреть классические представления о пространстве и времени, в результате чего была создана специальная теория относительности.

В основу данной теории Эйнштейн положил два *постулата*, являющихся обобщением экспериментальных фактов.

### **Первый постулат СТО (постулат относительности):**

**во всех инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.**

Данный постулат представляет собой обобщение механического принципа относительности на все физические явления. Он говорит о том, что никакими экспериментами, проведенными внутри ИСО, невозможно установить, покоится она или движется.

Представим себе вагон, движущийся равномерно и прямолинейно без толчков и покачиваний. Можно ли установить факт движения вагона с помощью экспериментов (механических, электромагнитных и любых других), проводимых внутри него? Весь накопленный в физике опыт показывает, что это невозможно в полном соответствии с первым постулатом СТО.

### **Второй постулат СТО (постулат постоянства скорости света):**

**во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника излучения.**

Как уже говорилось, этот постулат полностью соответствует результатам многократно проводившихся экспериментов, но противоречит классическому закону сложения скоростей.

Эйнштейн разрешил это противоречие, проведя глубокий анализ представлений о времени и пространстве.

В основе этого анализа лежит понятие *событие*. Под событием понимают некоторое явление, происходящее в определенной точке пространства в определенный момент времени. Понятие «событие» является идеализацией реального явления, происходящего очень быстро в очень малой области пространства. Примером события может служить вспышка света, выстрел орудия, соударение двух частиц, пересечение спортсменом линии финиша и т. д. Для характеристики времени и места события в определенной ИСО достаточно указать три его координаты и момент времени.

События, произошедшие в один и тот же момент времени, называются *одновременными*. В классической физике принималось положение об *абсолютности одновременности*: если два события произошли одновременно в некоторой ИСО, то они одновременны и в любой другой ИСО.

Эйнштейн обратил внимание на то, что *абсолютность одновременности* вовсе не очевидна. Для решения вопроса об одновременности (или неодновременности) двух событий, происходящих в разных местах некоторой ИСО, необходимо в каждом месте иметь часы, покоящиеся относительно этой ИСО и *синхронизованные* между собой. Только тогда можно решать вопрос об одновременности событий относительно данной ИСО.



Рис. 101. Синхронизация часов

Процедура синхронизации должна опираться на надежно проверенные физические законы. Эйнштейн предложил следующий способ. Пусть в точке *a* находятся часы *A*, а в точке *b* — часы *B* (рис. 101).

Световой сигнал идет из точки *a* в точку *b*, мгновенно отражается в этой точке и возвращается в точку *a*. Поскольку скорость света постоянна, то часы *A* и часы *B* следует считать идущими синхронно, если выполняется равенство:

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2, \quad (1)$$

где  $t_1$  — показания часов *A* в момент старта сигнала из точки *a*,  $t_2$  — показания часов *B* в момент прихода сигнала в точку *b*,  $t_3$  — показания часов *A* в момент возвращения сигнала в точку *a*. Используя условие (1), можно провести синхронизацию для любой пары часов, покоящихся в некоторой ИСО. Ход такой совокупности синхронизованных часов и есть *ход времени в данной ИСО*.

Теперь можно приступить к проверке абсолютности (или относительности) одновременности. Рассмотрим мысленный эксперимент с вагоном и двумя на-

блюдателями, один из которых ( $A$ ) стоит на платформе, а второй ( $B$ ) находится в вагоне (рис. 102).

Пусть в центре вагона, в точке  $O$ , расположен источник света (см. рис. 102), а правая и левая стенки вагона оборудованы фотоэлементами ( $\Pi$  и  $\Lambda$ ), позволяющими определять момент прихода светового сигнала. Понятно, что если световая вспышка произойдет в середине *неподвижного* вагона, то световой сигнал будет зарегистрирован фотоэлементами  $\Pi$  и  $\Lambda$  одновременно как по часам, находящимся в вагоне, так и по часам ИСО, связанной с платформой.

Пусть теперь вагон *движется* относительно платформы вправо равномерно и прямолинейно (см. рис. 102) со скоростью  $V$ . С точки зрения наблюдателя  $B$ , для которого вагон по-прежнему покоится, световые сигналы от вспышки в точке  $O$  достигнут фотоэлементов  $\Pi$  и  $\Lambda$  одновременно.

Иную картину видит наблюдатель  $A$ . Относительно него вагон движется. В результате этого правая стенка вагона удаляется от того места, где произошла вспышка, а левая — приближается к нему. Значит, относительно платформы свету придется пройти от места вспышки  $O$  до фотоэлемента  $\Lambda$  меньший путь, чем от  $O$  до фотоэлемента  $\Pi$ . При этом согласно второму постулату скорость света относительно платформы равна  $c$  и для сигнала, движущегося вправо, и для сигнала, движущегося влево. В итоге свет сначала достигнет фотоэлемента  $\Lambda$  и только потом — фотоэлемента  $\Pi$ . Для наблюдателя  $A$  эти события неодновременны.

Кто же из наблюдателей прав? Правы оба. **События, одновременные в одной ИСО, могут оказаться не одновременными в другой ИСО, движущейся относительно первой.**

Таким образом, *одновременность событий* — понятие относительное. Отметим однако, что одновременные события, произошедшие в одном и том же месте, одновременны в любой ИСО. Их одновременность абсолютна.

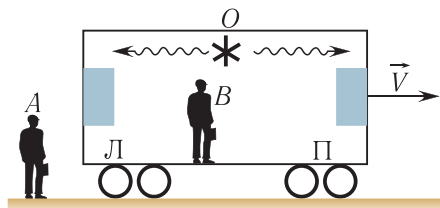


Рис. 102. Относительность одновременности



1. Какие системы отсчета называются инерциальными?
2. Как формулируется первый постулат СТО?
3. Какие эксперименты подтверждают справедливость первого постулата СТО?
4. Чем отличается принцип относительности Галилея от первого постулата СТО?
5. Как формулируется второй постулат СТО? Какие эксперименты его подтверждают?
6. Какие события следует считать одновременными?
7. Что понимается под относительностью одновременности?

## § 23. Пространство и время в специальной теории относительности



Установление того факта, что одновременность относительна, заставило по-новому взглянуть на свойства пространства и времени. Как изменяются свойства пространства и времени при скоростях, близких к скорости света? Где и как это необходимо учитывать?

Рассмотрим два эффекта СТО: эффект замедления времени и эффект сокращения длины.

**Эффект замедления времени.** Кажется очевидным, что промежуток времени между двумя событиями не зависит от того, измерен он движущимися или покоящимися часами. Пусть, например, участник автогонки измерил по часам, находящимся в его автомобиле, промежуток времени от старта до финиша. Он не сомневается, что результат будет таким же и у судейской бригады. А отличаются

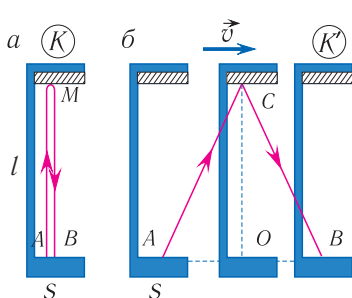


Рис. 103. Световые часы

ли эти результаты на самом деле?

Рассмотрим простой мысленный эксперимент. Закрепим лампу  $S$  и зеркало  $M$  на противоположных концах жесткого стержня длиной  $l$  (рис. 103). Лампа  $S$  дает кратковременную вспышку (событие  $A$ ). Свет отражается от зеркала  $M$  и возвращается обратно (событие  $B$ ) (см. рис. 103,  $a$ ). Пусть стержень движется вправо с постоянной скоростью  $v$ , перпендикулярной стержню (см. рис. 103,  $b$ ).

В системе отсчета  $K'$ , движущейся вместе со стержнем (в его «собственной» ИСО, см. рис. 103,  $b$ ) события  $A$  и  $B$  происходят в одном и том же месте. Промежуток времени  $\tau$  между этими событиями, измеренный часами системы  $K'$ , называют промежутком *собственного* времени. Очевидно, что  $\tau = \frac{2l}{c}$ .

Найдем теперь промежуток времени  $\Delta t$  между этими же событиями по часам системы  $K$ , относительно которой стержень движется («лабораторной» ИСО). Величину  $\Delta t$  называют промежутком *лабораторного* времени.

С точки зрения лабораторной системы  $K$  события  $A$  и  $B$  происходят в разных местах (см. рис. 103,  $b$ ). Согласно этому рисунку за время  $\Delta t$  свет проходит путь  $AC + CB$ , равный

$$s = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{AB}{2}\right)^2}. \quad (1)$$

Относительно системы  $K$  стержень движется со скоростью  $v$ , а свет — со скоростью  $c$ . Поэтому  $AB = v\Delta t$ ,  $s = c\Delta t$  и равенство (1) примет вид

$$c\Delta t = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2},$$

откуда 
$$\Delta t = \frac{2l}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Сравнивая  $\Delta t$  и  $\tau$ , получим:

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

Соотношение (2) показывает, что промежуток собственного времени  $\tau$  между двумя событиями всегда меньше, чем промежуток времени  $\Delta t$  между этими же событиями по часам лабораторной ИСО. Этот эффект называют **релятивистским замедлением времени**.

Связь (2) между собственным и лабораторным временем записывают также в виде  $\tau = \frac{\Delta t}{\gamma}$ , где коэффициент  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  называется *лоренцевым множи-*

*телем*. При всех значениях скорости  $0 < v < c$  множитель  $\gamma > 1$ .

**Релятивистское замедление времени состоит в том, что собственное время в  $\gamma$  раз меньше, чем лабораторное.**

Как определяются понятия *собственного* и *лабораторного* времени в общем случае?

Собственным временем  $\tau$  называется промежуток времени между двумя событиями, измеренный часами той ИСО, относительно которой эти события произошли в одном и том же месте. Собственное время можно всегда измерить *одними часами*.

Промежуток времени, измеренный часами ИСО, относительно которой события произошли в разных местах, мы называем лабораторным временем. Для его измерения необходимо как минимум двое часов, синхронизованных между собой.

Вернемся к примеру с автогонками. Промежуток времени от старта до финиша, измеренный по часам в автомобиле, является *собственным* временем, а промежуток времени между этими событиями, измеренный по часам судейской бригады, — *лабораторным*. Значит, судьи зафиксируют время, в  $\gamma$  раз большее, чем автогонщик. Подсчитайте, существенно ли это различие для автогонок

(скорость автомобиля и длину трассы задайте самостоятельно) и для «гонок» протонов, выброшенных Солнцем во время вспышки и движущихся со скоростью  $2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  по трассе «Солнце — Земля».

Количественные оценки релятивистского замедления времени даны в таблице 7 (с. 145).

Эффект замедления времени — это его объективное свойство. При релятивистских скоростях эффект может быть очень существенным. Отметим однако, что на воображаемом космическом корабле, движущемся с релятивистской скоростью, находящиеся в нем люди не почувствуют замедления жизненного ритма. Дело в том, что все происходящие в движущейся ИСО процессы (физические, химические, биологические) будут замедляться в одной и той же мере — все они будут идти в соответствии с ходом собственного времени этой ИСО.

Из-за эффекта релятивистского замедления времени, ход часов на орбитальных спутниках отличается от земного на несколько десятков микросекунд за сутки. Это отличие учитывается в спутниковых системах навигации. Без такого учета они не обеспечивали бы необходимой точности позиционирования объектов.

**Эффект сокращения длины.** Пусть вагон  $AB$  движется относительно платформы с постоянной скоростью  $\vec{v}$  (рис. 104). Чему равна длина движущегося вагона с точки зрения инерциальной системы отсчета, связанной с платформой?

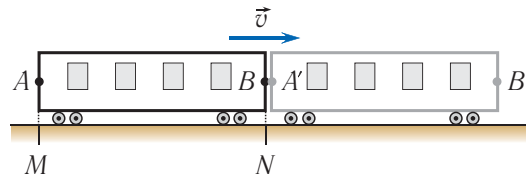


Рис. 104. Сокращение длины

Не останавливая вагон, нанесем на платформу метки  $M$  и  $N$  (см. рис. 104) так, чтобы метка  $M$  находилась под точкой  $A$  вагона, а метка  $N$  — под точкой  $B$  в один и тот же момент времени *по часам платформы*. Длину движущегося вагона в системе отсчета «платформа» *определим* как расстояние  $l$  между этими метками ( $l = MN$ ). Согласно обычным представлениям при любой скорости  $v$  длина  $l$  и *собственная* длина вагона  $l_0$  (т. е. длина вагона в той системе отсчета, в которой он покоится) равны между собой.

Релятивистская теория утверждает, что это не так. Согласно СТО величины  $l$  и  $l_0$  связаны соотношением:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma}. \quad (3)$$



С точки зрения неподвижного наблюдателя движущееся тело сокращается в направлении

своего движения в  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  раз.

Это явление называется **лоренцевым (или релятивистским) сокращением длины**. Заметим, что при этом *поперечные размеры* тела (т. е. измеренные вдоль осей, перпендикулярных направлению движения) *не изменяются*. Постоянство поперечных размеров мы использовали при выводе формулы (2).

Для оценки эффекта лоренцева сокращения можно воспользоваться таблицей 7. Из нее видно, что при расчетах с точностью 0,5 % для скоростей  $v < 0,1c$  нет необходимости применять релятивистские формулы.

Таблица 7. Сокращение длины и замедление времени

$\frac{v}{c} \cdot 100 \%$	$\frac{l_0}{l} = \frac{\Delta t}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
10,00	1,005
50,00	1,155
80,00	1,667
90,00	2,294
99,00	7,090
99,90	22,36
99,99	70,71
99,999	223,6



Выведем соотношение (3). Представим, что при прохождении точки вагона  $B$  над меткой  $N$  (см. рис. 104) происходит кратковременная вспышка красного цвета (событие 1), а затем при прохождении точки  $A$  над меткой  $N$  — синего цвета (событие 2). С точки зрения ИСО «платформа» эти события произошли в одном и том же месте — там, где нанесена метка  $N$ . Значит, время, прошедшее между красной и синей вспышкой в этой ИСО, является промежутком собственного времени  $\tau$ . Его можно измерить одними часами, находящимися на платформе возле метки  $N$  (см. рис. 104).

С точки зрения ИСО «вагон» события 1 и 2 произошли в разных местах: красная вспышка — в точке  $B$  вагона, синяя — в точке  $A$ . Время, прошедшее между этими событиями в ИСО «вагон», является промежутком лабораторного времени  $\Delta t$ . Согласно формуле (2)  $\frac{\tau}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

Относительно ИСО «платформа» точка  $A$  вагона за время  $\tau$  прошла путь  $MN = l = v\tau$ . Относительно ИСО «вагон» метка  $N$  за время  $\Delta t$  — путь  $BA = l_0 = v\Delta t$ . Таким образом,  $\frac{l}{l_0} = \frac{\tau}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , что и требовалось доказать.



1. Какая система отсчета называется собственной? Какая — лабораторной?
2. Что называется собственным временем? Лабораторным временем? Какое из них можно измерить одними часами?
3. Что называется собственной длиной?
4. В чем состоят релятивистские эффекты замедления времени и сокращения длины?

### Пример решения задачи

Определите модуль скорости  $v$ , с которой должен двигаться космический корабль, если с точки зрения наблюдателя на Земле ход времени на нем замедлился в  $k = 1,5$  раза. Скорость распространения света в вакууме  $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Дано:

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$k = 1,5$$

$v$  — ?

Решение

Из формулы замедления времени:

$$\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где  $\Delta t$  — промежуток времени, измеренный на Земле,  $\tau$  — соответствующий ему промежуток времени, измеренный на корабле. Получим:

$$\frac{\Delta t}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = k.$$

Из этого выражения находим модуль скорости движения корабля:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}}; \quad v = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{(1,5)^2}} = 2,24 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $v = 2,24 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

### Упражнение 18

1. Космический корабль пролетает мимо вас со скоростью, модуль которой  $v = 0,80c$ . По вашим измерениям его длина  $l = 90$  м. Определите собственную длину  $l_0$  космического корабля.

2. Стержень движется в продольном направлении с постоянной скоростью относительно ИСО. Определите модуль скорости  $v$  движения стержня в этой ИСО, если длина стержня в ней в  $\eta = 1,66$  раза меньше его собственной длины.

3. Определите время жизни  $\tau$  нестабильной частицы, покоящейся относительно наблюдателя, если при ее движении со скоростью, модуль которой  $v = 0,95c$ , оно равно  $\Delta t = 6,0$  мкс.

4. Ближайшая к Земле звезда  $\alpha$ -Центавра находится на расстоянии  $l = 4,00$  световых лет (1 световой год — это расстояние, проходимое светом в вакууме за один год). С какой по модулю скоростью  $v$  должен лететь стартовавший с Земли космический корабль, чтобы достичь этой звезды за  $\tau = 3,00$  года по часам путешественников? Какой покажется длительность  $\Delta t$  полета наблюдателю на Земле?

5. Определите время жизни  $\tau$  нестабильной частицы, движущейся со скоростью  $v = 0,80c$ , которая пролетела от места своего рождения до точки распада расстояние  $l = 560$  м.

6. Определите периметр  $P$  фигуры в системе отсчета наблюдателя, если он движется со скоростью, модуль которой  $v = 0,75c$ , в направлении, параллельном одной из сторон квадрата, собственная длина стороны которого  $a = 20$  см.

7. Определите площадь  $S$  квадрата, собственная длина стороны которого  $a = 1,0$  м, движущегося со скоростью, модуль которой  $v = 0,80c$ , в направлении, параллельном одной из сторон.

8. Вы решили отправиться в космический полет к звезде, удаленной от Земли на расстояние  $l_0 = 65$  световых лет. С какой по модулю скоростью  $v$  необходимо лететь, чтобы это расстояние с точки зрения земного наблюдателя сократилось до  $l = 20$  световых лет?

## § 24. Преобразования Галилея. Преобразования Лоренца. Релятивистский закон сложения скоростей

Пусть в начальный момент времени оси координат двух инерциальных систем отсчета  $K$  и  $K'$  совпадают, а система  $K'$  движется относительно  $K$  со скоростью  $V$ , направленной вдоль оси  $Ox$  (рис. 105). Пусть с точки зрения системы  $K$  некоторое событие произошло в момент времени  $t$  в точке с координатами  $x, y, z$ . Чему равны координаты  $x', y', z'$  и момент времени  $t'$  этого события в системе  $K'$ ?

В рамках классических представлений о пространстве и времени ответ очевиден:

$$x' = x - Vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t, \quad (1)$$

где  $V$  — модуль скорости движения системы  $K'$  относительно системы  $K$ .

Соотношения (1) называются **преобразованиями Галилея**. Они отражают абсолютность времени в классической механике ( $t' = t$ ) и соответствуют классиче-

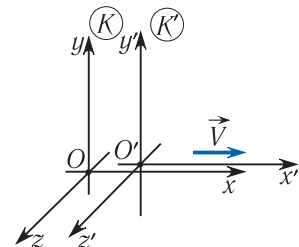


Рис. 105. Движение ИСО  $K'$  относительно ИСО  $K$

ским представлениям о неизменности размеров тел при переходе от одной ИСО к другой.

Ясно, что преобразования Галилея противоречат СТО, в которой и время, и длина могут измениться при переходе от одной ИСО к другой. При учете эффектов релятивистского замедления времени и сокращения длины вместо преобразований Галилея (1) получатся соотношения:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Они были найдены нидерландским физиком Хендриком Лоренцом и называются **преобразованиями Лоренца**. Отметим, что *при малых скоростях* ( $V \ll c$ ) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, справедливые в классической механике. К этому выводу легко прийти, сравнив формулы (1) и (2).

С помощью преобразований Лоренца можно получить *релятивистский закон сложения скоростей*. Приведем без вывода формулу, выражающую этот закон для простого частного случая. Пусть некоторый объект (тело, частица, световой импульс и т. д.) движется относительно системы  $K$  со скоростью  $\vec{v}$  навстречу системе  $K'$  (так что векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{V}$  имеют противоположные направления). Тогда, согласно СТО, модуль скорости этого объекта относительно системы  $K'$  будет равен:

$$v' = \frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}}. \quad (3)$$

По формуле (3) легко найти, что световой импульс, для которого  $v = c$ , будет иметь относительно  $K'$  скорость

$$v' = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}} = c \frac{c + V}{c + V} = c$$

при любом возможном значении  $V$  ( $0 \leq V < c$ ). Легко проверить также, что, даже если и скорость  $V$  системы  $K'$ , и скорость  $v$  движущегося навстречу ей тела близки к скорости света  $c$ , по формуле (3) получится:  $v' < c$ . Значит, релятивистский закон сложения скоростей находится в полном согласии с утверждением, что **скорость света  $c$  в вакууме является предельной скоростью движения материальных объектов и распространения сигналов.**

Правообладатель Народная асвета

Заметим, что при  $V \ll c$ ,  $v \ll c$  релятивистская формула (3) переходит в соотношение  $v' = v + V$ , вытекающее из закона сложения скоростей Галилея.



1. В чем отличие преобразований Лоренца от преобразований Галилея?
2. При каких условиях преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея?
3. Запишите релятивистский закон сложения скоростей. Как на его основе сделать вывод о существовании предельной скорости?
4. Как из преобразований Лоренца вывести эффект относительности одновременности? Эффект замедления времени? Эффект сокращения длины?

## § 25. Элементы релятивистской динамики. Взаимосвязь массы и энергии



Изменение представлений о свойствах пространства и времени привело к обнаружению тесной взаимосвязи между массой и энергией и к изменению законов динамики. Чем законы релятивистской динамики отличаются от законов динамики Ньютона?

Необходимость изменения динамики очевидна хотя бы из того, что, согласно законам Ньютона, любое тело можно в принципе разогнать до любой скорости. Приложим к покоящемуся телу массой  $m$  постоянную силу  $F$ . Используя второй закон Ньютона, найдем, что к моменту времени  $t$  тело развивает скорость  $v = \frac{F}{m}t$ . Следовательно, в рамках классической механики при  $t > \frac{mc}{F}$  скорость тела  $v$  превзошла бы скорость света  $c$ , что противоречит результатам экспериментов и основным положениям СТО.

Какие же соотношения динамики изменились при переходе к СТО, а какие — остались неизменными?

Сохранили свой вид законы изменения импульса и энергии тела:

$$\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t; \quad \Delta E = A, \quad (1)$$

где  $A$  — работа, совершенная силой  $\vec{F}$ . Изменились соотношения, выражающие зависимость импульса и энергии тела от его скорости:

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

Решим задачу о движении тела под действием постоянной силы по законам динамики СТО. Если при  $t = 0$  тело покоилось, то, согласно первому из соотношений (1), в момент времени  $t$  модуль импульса частицы будет равен  $p = Ft$  (как и

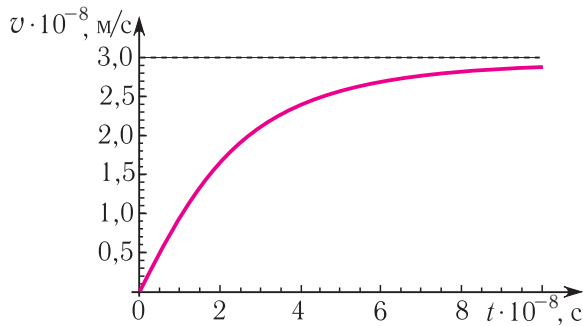


Рис. 106. Зависимость скорости релятивистской частицы от времени ( $m = 1,0$  кг,  $F = 1,0$  Н)

Выразив  $v$  из формулы (3), находим:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \left(\frac{mc}{Ft}\right)^2}}.$$

График зависимости  $v$  от  $t$  (рис. 106) показывает, что скорость тела никогда не достигнет предельного значения  $c$ .

С помощью формулы (3) легко найти промежуток времени  $\Delta t$ , необходимый для увеличения скорости частицы от  $v_1$  до  $v_2$ :

$$\Delta t = \frac{m}{F} \left( \frac{v_2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} - \frac{v_1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} \right).$$

Численные расчеты по данной формуле при  $m = 1$  кг,  $F = 1$  Н,  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  показывают: разгон тела от  $v_1 = 0$  до  $v_2 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , как и от  $100\,000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  до  $100\,001 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , произойдет практически за одну секунду, как и по законам Ньютона. Разгон от  $100\,000\,000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  до  $100\,000\,001 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  займет 1,2 с. Однако чтобы добавить еще  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  к скорости  $v_1 = 299\,792\,451 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , тело пришлось бы разгонять более чем три тысячи лет!

О чем говорит этот пример? О том, что **инертность тела неограниченно возрастает по мере приближения скорости тела к скорости света  $c$ .**

При этом масса  $m$  в СТО для каждого тела остается постоянной величиной, характеризующей его инертность. Как и в нерелятивистской механике, числовое значение массы показывает, насколько данное тело инертнее, чем тело, принятое за эталон массы.

Правообладатель Народная асвета

в механике Ньютона). Но если в ньютоновой механике из  $p = Ft$  следует  $v = \frac{F}{m}t$  и скорость  $v$  с течением времени неограниченно растет, то в релятивистском случае с учетом (2) получается:

$$Ft = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3)$$

Согласно соотношениям (2) при скорости  $v = 0$  энергия тела равна величине

$$E_0 = mc^2, \quad (4)$$

называемой *энергией покоя*. Таким образом, согласно СТО, *масса тела является мерой его энергии в состоянии покоя*. Это свойство массы было неизвестно в классической механике. В каждом теле таится огромный запас энергии. Например, тело массой  $m = 1,0$  г обладает энергией покоя

$$E_0 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Она эквивалентна энергии, выделяющейся при сгорании 2000 т нефти. Так, благодаря прогрессу физики в 1905 г. человечество узнало о практически неисчерпаемых запасах энергии, содержащихся в любом веществе.

Из равенства (4) следует, что изменение энергии покоя тела на  $\Delta E_0$  вызывает изменение его массы на  $\Delta m$ , где

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}. \quad (5)$$

Утверждение о том, что *энергия покоя пропорциональна массе, а изменение энергии покоя вызывает изменение массы*, называют **законом взаимосвязи массы и энергии**. Математическим выражением этого закона служат формулы (4) и (5).

Формула (5) применима ко всем явлениям, в которых изменяется внутренняя энергия вещества. При процессах, происходящих на атомно-молекулярном уровне, изменения массы крайне малы. Так, при полном превращении льда в воду относительное изменение массы  $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$ , при нагревании на  $\Delta t = 200$  °С железного бруска  $\frac{\Delta m}{m} \sim 1,0 \cdot 10^{-12}$ . При химических реакциях относительное изменение массы несколько выше. Например, при сгорании метана в кислороде  $\frac{\Delta m}{m} = 0,9 \cdot 10^{-10}$ . Для ядерных реакций ситуация существенно иная. Для них характерны величины  $\frac{\Delta m}{m} = 10^{-3}$ , в десятки миллионов раз бóльшие, чем для химических реакций.

В формуле (2) энергия  $E$  движущегося тела включает его энергию покоя  $E_0$ . Кинетическая энергия  $E_k$  в СТО определяется как разность  $E - E_0$ :

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2. \quad (6)$$

Если соответствие между релятивистским импульсом и классическим импульсом при  $v \ll c$  очевидно, то для кинетической энергии оно требует доказательства. Введем обозначение

$$\theta = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

и проделаем простые преобразования:

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2 \frac{1 - \theta}{\theta} = mc^2 \frac{1 - \theta^2}{\theta(1 + \theta)} = \frac{mv^2}{2} \cdot \frac{2}{\theta + \theta^2}.$$

Множитель  $\frac{2}{\theta + \theta^2}$  при малых скоростях практически равен единице. Следовательно, при  $v \ll c$  кинетическая энергия (6), как и должно быть, переходит в нерелятивистское выражение  $\frac{mv^2}{2}$ .

Исключая скорость  $v$  из формул (2), можно получить соотношение:

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет с большой точностью определить массу частицы по результатам измерений ее энергии и импульса. Такой метод широко используется в физике элементарных частиц.

В начале параграфа было показано, что согласно СТО частица не может достичь скорости света. Данный запрет не распространяется на частицы, масса которых  $m = 0$ . Такие *безмассовые* частицы находятся всегда в состоянии движения со скоростью  $v = c$ . Энергия безмассовой частицы в соответствии с релятивистским соотношением (7) пропорциональна ее импульсу:  $E = cp$ .

Согласно **принципу соответствия** любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание физических явлений, должна включать в себя классическую (ньютоновскую) теорию как предельный случай.

Специальная теория относительности полностью удовлетворяет принципу соответствия. При скоростях  $v \ll c$  ее законы переходят в законы классической механики.



1. Приведите выражения для импульса и кинетической энергии тела в классической и в релятивистской механике.
2. При каких скоростях инертность тела можно считать практически постоянной, а при каких — нельзя?



3. Каким соотношением связаны между собой масса тела и энергия покоя? Сформулируйте закон взаимосвязи массы и энергии.
4. Чему равна масса частицы, если она движется со скоростью  $v = c$ ?
5. Сформулируйте принцип соответствия.

### Пример решения задачи

Солнце каждую секунду излучает в пространство  $\Delta E = 3,75 \cdot 10^{26}$  Дж энергии. На сколько уменьшается каждую секунду масса  $\Delta m$  Солнца вследствие излучения? На сколько лет  $t_M$  «хватит» Солнца при таком расходе массы, если масса Солнца  $M = 1,99 \cdot 10^{30}$  кг?

Дано:

$$\Delta E = 3,75 \cdot 10^{26} \text{ Дж}$$

$$M = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг}$$

$$\Delta m \text{ — ? } t_M \text{ — ?}$$

Решение

Из закона взаимосвязи массы и энергии находим:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}; \quad \Delta m = \frac{3,75 \cdot 10^{26} \text{ Дж}}{(3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2} = 4,17 \cdot 10^9 \text{ кг (за 1 с);}$$

$$t_M = \frac{M}{\Delta m} \Delta t = \frac{1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{4,17 \cdot 10^9 \text{ кг}} \cdot 1 \text{ с} = 4,77 \cdot 10^{20} \text{ с} = 1,51 \cdot 10^{13} \text{ лет.}$$

Ответ:  $\Delta m = 4,17 \cdot 10^9$  кг;  $t_M = 4,77 \cdot 10^{20}$  с =  $1,51 \cdot 10^{13}$  лет.

### Упражнение 19

1. Какая энергия  $E$  выделится при полном превращении в излучение вещества массой  $m = 1,0$  мг?

2. Определите массу  $m$  покоящейся частицы, если ее полная энергия  $E = 8,2 \cdot 10^{-14}$  Дж.

3. Какой массе  $\Delta m$  вещества соответствует релятивистская энергия, необходимая для того, чтобы лампа мощностью  $P = 100$  Вт могла гореть в течение промежутка времени  $\Delta t = 1,0$  года?

4. Определите массу  $\Delta m$ , теряемую Солнцем за год, если на участок поверхности Земли площадью  $S = 1,0$  см<sup>2</sup> каждую секунду попадает  $E = 8,4$  Дж энергии излучения. Расстояние от Земли до Солнца  $R = 1,5 \cdot 10^8$  км.

5. Определите модуль скорости  $v$  движения частицы, при которой ее кинетическая энергия  $E_k = \frac{3mc^2}{4}$ .

6. Космический корабль массой  $m = 20$  т разгоняется до скорости, модуль которой  $v = 0,25c$ . Определите его кинетическую энергию  $E_k$ . На сколько процентов вы ошибетесь, если воспользуетесь для вычисления кинетической энергии классической формулой?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 4

### Постулаты специальной теории относительности

**Постулат относительности:** во всех инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.

**Постулат постоянства скорости света:** во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника излучения.

### Предельная скорость

Скорость света в вакууме является предельной скоростью движения материальных объектов и распространения сигналов.

### Релятивистское замедление времени

Промежуток собственного времени  $\tau$  между двумя событиями, измеренный движущимися часами  $A$ , меньше, чем промежуток времени  $\Delta t$  между этими же событиями, прошедший в инерциальной системе отсчета, относительно которой часы  $A$  двигались:

$$\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

### Релятивистское сокращение длины

Линейный размер движущегося тела сокращается в направлении его движения:  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , где  $l$  — длина тела в инерциальной системе отсчета, относительно которой оно движется, а  $l_0$  — длина тела в инерциальной системе отсчета, в которой оно покоится. Поперечные размеры тела при движении не изменяются.

### Энергия и импульс тела

Энергия, импульс тела и его инертность неограниченно растут при приближении скорости тела к предельной скорости  $c$ .

### Взаимосвязь энергии и массы

Энергия покоя  $E_0$  тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2.$$

Изменения массы и энергии покоя взаимосвязаны:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}.$$

## Глава 5

# Фотоны. Действия света

Каждый век, приобретая новые идеи,  
приобретает и новые глаза.

*Г. Гейне*

В конце XIX в. многие ученые считали, что развитие физики завершилось. Законы механики и теория всемирного тяготения были известны более 200 лет. К этому времени была развита и стала общепризнанной теория электромагнитного поля, основы которой были заложены Дж. Максвеллом.

Однако к началу XX в. возникли проблемы, касающиеся физической природы излучения и вещества, а также их взаимодействия. В рамках классической физики возникали непреодолимые противоречия при объяснении экспериментальных данных для процессов поглощения и испускания света атомами, закономерностей испускания электромагнитного излучения нагретыми телами, фотоэффекта и т. п.

Анализ этих противоречий привел физиков в начале XX в. к научной революции, которая коренным образом изменила взгляды ученых на объекты микромира — атом, его ядро и элементарные частицы. В течение последующих 30 лет были заложены основы современной **квантовой физики**, пришедшей на смену классической физике при рассмотрении явлений на атомном и внутриатомном (субатомном) уровнях. В следующих двух главах (5-й и 6-й) рассматриваются основные вопросы квантовой физики.

### § 26. Фотоэффект. Экспериментальные законы внешнего фотоэффекта. Квантовая гипотеза Планка



Сила тока  $I$  — скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего за промежуток времени  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника, к этому промежутку: 
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Наше зрительное восприятие физических явлений в окружающем мире определяется взаимодействием света с веществом. Воздействие света на вещество состоит в поглощении им световой энергии, приносимой излучением, т. е. первичным процессом является поглощение света. Такое взаимодействие, например в сетчатке глаза, приводит к зрительным ощущениям.

При падении света на поверхность непрозрачного предмета часть излучения проникает в него и поглощается, другая часть отражается от поверхности, и мы видим предмет в отраженном свете. Более темные поверхности поглощают свет

Правообладатель Народная асвета

сильнее, чем более светлые. Доля отраженного от поверхности света зависит от длины волны.

Для прозрачной среды, например стекла, при падении на него световой волны главным результатом взаимодействия является ее отражение и преломление, а поглощением электромагнитной энергии в видимом диапазоне можно пренебречь. Именно поэтому среда и воспринимается зрительно как прозрачная.

Мы видим не только тела, которые отражают или рассеивают свет, но и тела, которые светятся сами, например Солнце, другие звезды, пламя. Электромагнитное излучение испускают все тела, причем его интенсивность зависит от температуры их поверхности. В видимом диапазоне спектра излучение достаточной интенсивности, позволяющее видеть предмет, возникает, если температура поверхности предмета намного больше комнатной.

Взаимодействие электромагнитных волн с веществом приводит и к другим физическим явлениям, изучение которых помогло выяснить природу света.

В 1887 г. Генрих Герц обнаружил, что пробой воздушного промежутка между электродами искрового разрядника происходит при меньшем напряжении, если освещать отрицательно заряженный электрод ультрафиолетовым излучением. Дальнейшие эксперименты показали, что отрицательно заряженная цинковая пластинка при облучении ультрафиолетовым излучением (рис. 107, а) разряжается. Оба эти явления можно объяснить, предполагая, что под действием падающего излучения из металла вылетают отрицательно заряженные частицы — электроны (рис. 107, б). Это явление получило название *фотоэлектрического эффекта*.

**Фотоэлектрический эффект (фотоэлектрический эффект)** называется явление взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения передается электронам вещества, что приводит к разрыву связей электронов и ядер в атомах.

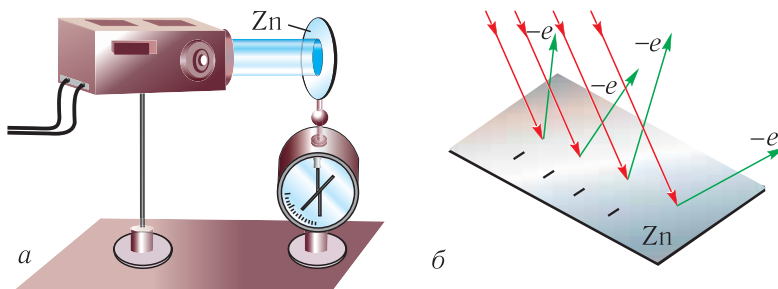


Рис. 107. Фотоэлектрический эффект: а — действие ультрафиолетового излучения на пластинку; б — вылет электронов с поверхности цинка под действием ультрафиолетового излучения

Если фотоэффект сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внешним фотоэффектом**, а вылетающие электроны — **фотоэлектронами**. Если фотоэффект не сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внутренним фотоэффектом**. При внутреннем фотоэффекте часть электронов, находящихся в веществе в связанном состоянии, переходят в свободное состояние, увеличивая концентрацию носителей тока.

Испускание веществом каких-либо частиц называется **эмиссией**. Поэтому внешний фотоэффект называют также **фотоэлектронной эмиссией (фотоэмиссией)**.



«Фотоξ» (фотос) по-гречески означает «свет».

Систематическое изучение фотоэффекта было проведено в 1888—1889 гг. русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым.

Установка для изучения внешнего фотоэффекта представлена на рисунке 108, *а*. В экспериментах Столетова в электрическую цепь был включен конденсатор, одна из обкладок которого была изготовлена из медной сетки, а вторая — представляла собой цинковую пластинку. Медная сетка была заряжена положительно, а цинковая пластинка — отрицательно. Наблюдения показали, что под действием падающего ультрафиолетового излучения в цепи возникает электрический ток. Этот ток называется **фототоком**.

Изменяя напряжение  $U$  между пластинами  $A$  и  $B$  с помощью реостата (рис. 108, *б*), Столетов исследовал зависимость силы фототока  $I_{\text{ф}}$  от напряжения  $U$  (вольт-амперную характеристику). Как видно из представленной на рисунке 108, *в* зависимости, даже при отсутствии разности потенциалов между пластинами в цепи проходит фототок. Так как скорости электронов, испускаемых катодом,

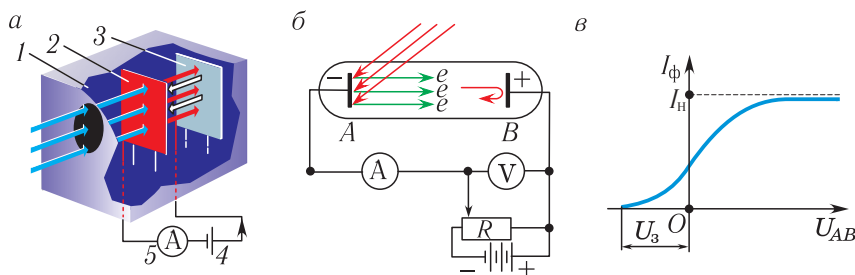


Рис. 108. Изучение внешнего фотоэффекта: *а* — вид установки: 1 — герметичный корпус; 2 — медная сетка; 3 — цинковая пластинка; 4 — источник тока; 5 — амперметр; *б* — электрическая схема снятия вольт-амперной характеристики  $I(U)$ ; *в* — вольт-амперная характеристика установки

различны как по модулю, так и по направлению, то не все они при малых значениях напряжения могут достигнуть анода. При увеличении напряжения сила фототока растет до некоторого максимального значения  $I_n$ , которое называется **фототоком насыщения**. Оно определяется при таком значении напряжения, при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к росту силы фототока. Изменение полярности напряжения приводит к исчезновению фототока при напряжении  $U_z$ , которое называется **задерживающим напряжением**.

Для большинства веществ фотоэффект возникает только под действием ультрафиолетового излучения. Однако некоторые металлы, например литий, натрий и калий, испускают электроны и при их облучении видимым светом.

Экспериментально установлены следующие **законы внешнего фотоэффекта**.

**1. Сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна интенсивности  $I$  падающего излучения (первый закон фотоэффекта).**

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта показана на рисунке 108, *в* и 109, *а*, а зависимость силы фототока насыщения  $I_n$  от интенсивности падающего излучения  $I$  — на рисунке 109, *б*.

Из графика зависимости  $I_n$  от  $I$  (график выходит из начала координат), приведенного на рисунке 109, *б*, видно, что сила фототока насыщения равна нулю ( $I = 0$ ) только при отсутствии излучения. Иными словами, фотоэффект наблюдается даже при малых значениях интенсивности падающего излучения.

**2. Максимальная кинетическая энергия  $E_k^{\max}$  фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения и линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  падающего излучения (второй закон фотоэффекта).**

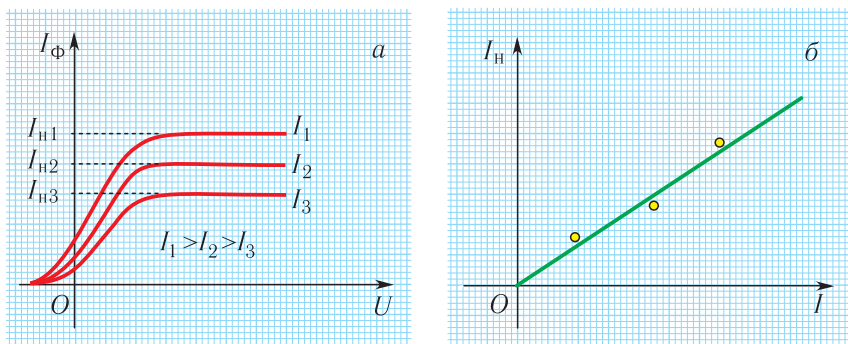


Рис. 109. Вольт-амперная характеристика фотоэффекта при различных интенсивностях падающего излучения (*а*); зависимость силы фототока насыщения от интенсивности падающего излучения (*б*)

Подчеркнем, что кинетическая энергия фотоэлектронов, вылетающих из фотокатода, изменяется в некотором диапазоне от нуля до  $E_{\kappa}^{\max}$ , так как фотоэлектроны часть своей энергии, полученной от падающего излучения, передают частицам вещества до вылета с его поверхности.

На рисунке 110 представлена зависимость  $E_{\kappa}^{\max}$  от частоты падающего излучения.

**3. Для каждого вещества существует граничная частота  $\nu_{\min}$ , такая, что излучение меньшей частоты не может вырывать электроны из его поверхности (третий закон фотоэффекта).**

Эта минимальная частота  $\nu_{\min}$  называется **красной границей** фотоэффекта. Такое название связано с тем, что минимальной частотой излучения в видимом диапазоне обладает излучение, соответствующее красному цвету.

Красная граница фотоэффекта для различных веществ совсем не обязательно соответствует красному цвету. Например, для рубидия она соответствует желтому цвету, для кальция — синему, а для некоторых веществ может вообще находиться в инфракрасной или ультрафиолетовой областях спектра.

На рисунке 111 приведены экспериментальные зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов  $E_{\kappa}^{\max}$  от частоты падающего излучения для цезия, рубидия, магния и серебра. Как видно из рисунка 111, экспериментальные прямые параллельны друг другу, причем точки пересечения графиков с осью абсцисс (частот) определяют красные границы фотоэффекта для каждого из них.

При частотах, больших  $\nu_{\min}$ , излучение даже очень малой интенсивности вызывает фотоэффект. Кроме того, между

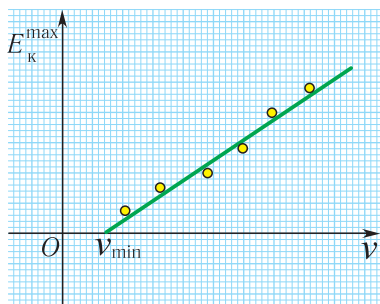


Рис. 110. График зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего излучения

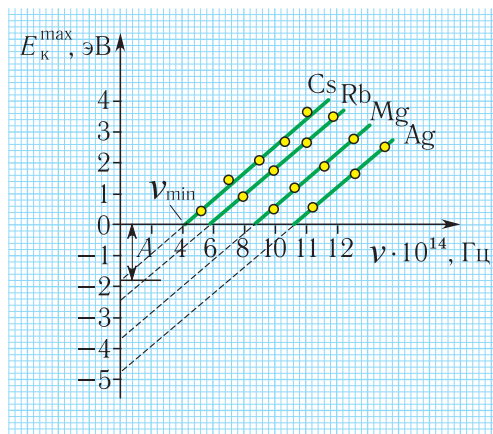


Рис. 111. Графики зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего излучения для Cs, Rb, Mg и Ag

моментом включения источника излучения и вылетом электронов фактически нет задержки во времени: электроны вылетают из вещества через промежуток времени порядка  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  с после начала облучения.

Следует заметить, что к моменту открытия фотоэффекта в 1887 г. еще ничего не было известно об электронах, открытых Дж. Томсоном только в 1897 г.



В 1898 г. Филиппом Ленардом и Джозефом Джоном Томсоном было определено отношение заряда  $q$  частицы, вылетающей с поверхности металла при фотоэффекте, к ее массе  $m$  (так называемый удельный заряд —  $\frac{q}{m}$ ) по ее отклонению в электрическом и магнитном полях. Эти измерения дали то же значение, что и отношение заряда электрона к его массе  $\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ . Таким образом, было доказано, что выбиваемые светом заряженные частицы — электроны.

За работы по определению удельного заряда электрона  $\frac{e}{m}$ , приведшие к открытию первой элементарной частицы — электрона, Дж. Томсон в 1906 г. был удостоен Нобелевской премии по физике.

Установленные экспериментально законы фотоэффекта невозможно объяснить на основе представлений о том, что свет — это электромагнитная волна. На основе этих представлений можно объяснить только первый из приведенных экспериментальных законов фотоэффекта: чем больше энергия падающего света, тем больше электронов вылетает из вещества. Объяснить 2-й и 3-й законы фотоэффекта в рамках классической теории излучения невозможно.

Так, например, непонятно, почему максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения. Невозможно также объяснить существование красной границы фотоэффекта. Действительно, даже при малой частоте падающего излучения, но при длительном воздействии электромагнитной волны на электрон ему можно сообщить энергию, необходимую для выхода из вещества. Следовательно, красная граница фотоэффекта не должна существовать. Все эти противоречия были сняты квантовой теорией.

Квантовые представления были впервые введены немецким физиком Максом Планком при разработке теории теплового излучения. Планк сделал фундаментальное предположение, что энергия любой колебательной системы, совершающей гармонические колебания с частотой  $\nu$  (осциллятора), может принимать лишь определенные дискретные значения, отличающиеся на целое число элементарных порций — **квантов энергии**:

Правообладатель Народная асвета



$$E_n = nE = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $n$  — целое положительное число,  $h$  — коэффициент пропорциональности, который называют **постоянной Планка**. Это фундаментальная постоянная. Ее значение:

$$h = (6,62606957 \pm 0,00000029) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Приближенное значение постоянной Планка, применяемое при решении задач:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$



Слово **квант** происходит от латинского слова «quantum» — «сколько» или «как много». Это слово, вообще, обозначает часть, долю или неделимую порцию. Планк поэтически назвал новую фундаментальную постоянную  $h$  «таинственным посланцем из реального мира».

Следовательно, отдельный осциллятор может обладать не любой энергией, а лишь энергией, кратной  $\Delta E = h\nu$ . Таким образом впервые появилась идея о квантовании энергии.

14 декабря 1900 г. Планк доложил свои результаты на заседании Немецкого физического общества. Этот день и считают днем рождения квантовых представлений. Появился квант энергии как дискретная порция энергии. Планк относил дискретность энергии к свойствам вещества, а излучение рассматривалось как электромагнитные волны.

После выдвижения гипотезы Планком (1900 г.) началось интенсивное развитие квантовых представлений в физике, которые к 1925—1928 гг. превратились в стройную и логичную квантовую теорию, открывшую «новую эру» в развитии физики.



1. В чем состоит сущность явления внешнего фотозффекта? Внутреннего фотозффекта?
2. Когда и кем было открыто явление внешнего фотозффекта?
3. Нарисуйте схему экспериментальной установки Столетова и объясните суть проделанных им экспериментов.
4. Объясните особенности вольт-амперной характеристики фотозффекта.
5. Сформулируйте экспериментальные законы фотозффекта. Какие из них невозможно объяснить с точки зрения волновой теории света?
6. Используя закономерности явления резонанса, объясните, почему согласно волновой теории света увеличение (уменьшение) частоты падающего излучения должно приводить к увеличению (уменьшению) силы фототока.
7. В чем заключается гипотеза Планка?
8. Запишите приближенное значение постоянной Планка.

## § 27. Фотон. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта



Электронвольт — энергия, которую приобретет частица с зарядом, равным элементарному, при перемещении между двумя точками с ускоряющей разностью потенциалов 1 В ( $1,0 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Развивая идеи М. Планка, А. Эйнштейн в 1905 г. для объяснения экспериментальных законов внешнего фотоэффекта выдвинул гипотезу о дискретности самого электромагнитного излучения — свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов). Он рассмотрел элементарные процессы поглощения и испускания этих квантов.

По гипотезе Эйнштейна, монохроматическое электромагнитное излучение частотой  $\nu$  обладает не только волновыми свойствами, но и свойствами, характерными для потока частиц. Каждая такая частица движется со скоростью света  $c$  и несет квант энергии  $E = h\nu$ . Назвать эти частицы **фотонами** предложил в 1928 г. американский физик Артур Комптон.

Энергия фотона может быть выражена через длину волны  $\lambda$ :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1)$$

Как следует из формул (2) § 25,  $\vec{p} = \nu \frac{\vec{r}}{c^2} \frac{E}{c}$ . Тогда модуль импульса фотона ( $v = c$ ) определяется выражением:

$$p = c \frac{E}{c^2} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Следовательно, для фотона:

$$E = pc.$$

Но согласно СТО (см. § 25) энергия и импульс любой частицы связаны соотношением:

$$E^2 - p^2c^2 = (mc^2)^2.$$

При подстановке в эту формулу энергии фотона  $E = pc$  находим, что масса фотона равна нулю ( $m = 0$ ).

Оказывается, что фотон — это удивительная частица, которая обладает энергией  $E = h\nu$ , импульсом  $p$ , но вследствие того, что скорость его движения всегда равна скорости распространения света, его масса равна нулю ( $m = 0$ ). Такие частицы называют *безмассовыми*.

Фотон является элементарной частицей, только в отличие от других элементарных частиц он не имеет массы, а потому «обречен» всегда двигаться со скоростью распространения света.

Правообладатель Народная асвета

Таким образом, фотон обладает следующими свойствами:

существует только в движении;

является безмассовой частицей ( $m = 0$ );

электрически нейтрален ( $q = 0$ );

модуль его скорости движения равен модулю скорости распространения света в вакууме ( $v = c$ ) во всех ИСО;

его энергия пропорциональна частоте соответствующего электромагнитного излучения ( $E = h\nu$ );

модуль импульса фотона равен отношению его энергии к модулю скорости движения ( $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ ).

Рассмотрим объяснение экспериментальных законов фотоэффекта, предложенное Эйнштейном на основе квантовых представлений. При освещении электрода электромагнитным излучением (см. рис. 109) происходит взаимодействие фотонов с электронами вещества. Если энергия фотона  $E = h\nu$  достаточно велика, то какой-либо из электронов после поглощения фотона может получить энергию, достаточную для того, чтобы покинуть облучаемое тело. Электроны, покинувшие образец, имеют некоторую скорость, поэтому даже при отсутствии напряжения между электродами сила фототока не равна нулю. Именно поэтому вольт-амперная характеристика фотоэффекта при напряжении, равном нулю, не проходит через нуль (см. рис. 109, а).

Для того чтобы покинуть вещество, электрон должен совершить работу против сил связи электрона с атомами вещества. Она называется **работой выхода** и обозначается  $A_{\text{вых}}$  ( $A_{\text{вых}} > 0$ ).

Для металлов эта работа связана с преодолением сил взаимодействия электронов с положительно заряженными ионами кристаллической решетки, которые удерживают электрон в веществе. Работа выхода для металлов обычно составляет несколько электронвольт (табл. 8).

Оставшаяся часть энергии поглощенного кванта составляет кинетическую энергию освобожденного электрона. Наибольшей кинетической энергией  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$

Таблица 8. Фотоэлектрические характеристики некоторых веществ

Вещество	$A_{\text{вых}}$ , эВ	$\nu_{\text{min}} \cdot 10^{-14}$ , Гц	$\lambda_{\text{к}}$ , нм
Цезий	1,9	4,6	650
Калий	2,2	5,3	560
Натрий	2,3	5,6	540
Кальций	2,7	6,5	460
Цинк	3,7	8,9	340
Серебро	4,3	10	260
Вольфрам	4,5	11	280
Никель	5,0	12	250
Платина	5,3	13	230

будут обладать те электроны, которые поглотят кванты света вблизи поверхности металла и вылетят из него, не успев потерять энергию при столкновениях с другими частицами в металле.

На основе закона сохранения энергии можно записать следующее уравнение для фотоэлектрона:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (3)$$

Это соотношение называют **уравнением Эйнштейна** для внешнего фотоэффекта.

Отметим, что  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = E_{\text{к}}^{\text{max}}$  — это максимальная кинетическая энергия электрона ( $v_{\text{max}} \ll c$ ), которой он может обладать, вылетев из вещества. Из-за различных потерь энергия электрона может быть меньше расчетного значения.



Если энергия фотонов очень велика (для рентгеновского или  $\gamma$ -излучения), то скорости фотоэлектронов сравнимы со скоростью света ( $v_{\text{max}} \approx c$ ). В этом случае для кинетической энергии фотоэлектрона необходимо использовать релятивистское выражение:

$$E_{\text{к}}^{\text{max}} = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\text{max}}^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Используя уравнение Эйнштейна, можно объяснить экспериментальные законы фотоэффекта.

**Объяснение первого закона фотоэффекта.** Сила фототока насыщения пропорциональна общему числу фотоэлектронов, покидающих поверхность металла за единицу времени. Число таких фотоэлектронов пропорционально числу фотонов, падающих на поверхность за это же время. Именно пропорционально, а не равно, так как часть квантов света поглощается кристаллической решеткой, и их энергия переходит во внутреннюю энергию металла. Увеличение интенсивности падающего света приводит к росту числа фотоэлектронов, покидающих поверхность металла.

**Объяснение второго закона фотоэффекта.** Фотоэлектрон вырывается из катода за счет действия одного кванта падающего излучения. Поэтому кинетическая энергия фотоэлектрона зависит не от полной энергии волны, а от энергии одного кванта, т. е. частоты  $\nu$ . При увеличении частоты  $\nu$  падающего света максимальная кинетическая энергия  $E_{\text{к}}^{\text{max}}$  фотоэлектронов возрастает линейно, как следует из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта (3), согласно соотношению:

$$E_{\text{к}}^{\text{max}} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (4)$$

Известно, что фототоком можно управлять, подавая на металлические пластины различные напряжения. Если на систему подать небольшое напряжение обратной полярности, «затрудняющее» вылет электронов, то сила тока уменьшится, так как теперь фотоэлектронам, кроме работы выхода, придется совершать дополнительную работу против сил электрического поля.

При некотором отрицательном значении напряжения  $U_3$  электроны затормаживаются и, не достигнув поверхности анода, возвращаются на катод. Сила тока в цепи при этом будет равна нулю (рис. 112). Величину  $U_3$ , при которой сила тока в цепи равна нулю, называют *задерживающим напряжением*. Следовательно, вся кинетическая энергия электронов затрачивается на работу против сил электрического поля. При этом максимальная кинетическая энергия электронов выражается через задерживающее напряжение следующим образом:

$$E_{\kappa}^{\max} = eU_3. \quad (5)$$

**Объяснение третьего закона фотоэффекта.** Если частота  $\nu$  падающего излучения меньше граничной частоты  $\nu_{\min}$  ( $\nu < \nu_{\min}$ ), при которой  $h\nu_{\min} = A_{\text{вых}}$ , то испускания электронов не происходит. Таким образом, фотоэффект отсутствует, если частота излучения оказывается меньше некоторой характерной для данного вещества величины  $\nu_{\min}$ .

Следовательно, **красную границу фотоэффекта** можно найти из условия:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (6)$$

Она зависит только от работы выхода электронов, т. е. определяется строением металла и состоянием его поверхности.

Длина волны  $\lambda_{\kappa}$  излучения, соответствующая красной границе фотоэффекта, может быть определена из соотношения:

$$\lambda_{\kappa} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}. \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (3) выражения (5) и (6), найдем зависимость задерживающего напряжения от частоты падающего света:

$$U_3(\nu) = \frac{h}{e}(\nu - \nu_{\min}). \quad (8)$$

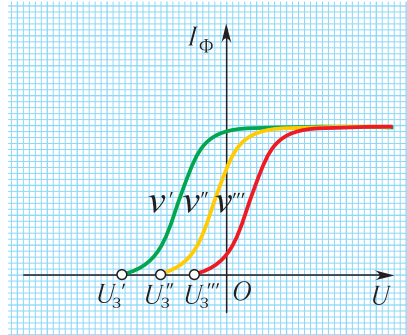


Рис. 112. Вольт-амперные характеристики внешнего фотоэффекта при различных частотах падающего излучения ( $\nu' > \nu'' > \nu'''$ )

Находя тангенс угла наклона  $\operatorname{tg} \alpha$  прямых линий на рисунке 111, можно из соотношения (8) с учетом (5) вычислить постоянную Планка:

$$h = e \frac{U_3(v)}{v - v_{\min}},$$

а по точкам пересечения продолжения графиков с осями  $E_{\kappa}^{\max}$  и  $v$  — найти работу выхода  $A_{\text{вых}}$  и красную границу  $v_{\min}$ .



В 1921 г. при присуждении Альберту Эйнштейну Нобелевской премии в решении Нобелевского комитета указывалось, что «премией особенно отмечается объяснение законов фотоэлектрического эффекта».



1. В чем сущность гипотезы Эйнштейна?
2. Что называется фотоном?
3. Перечислите основные свойства фотона.
4. По какой формуле можно определить энергию фотона? Модуль импульса фотона?
5. Как направлен импульс фотона?
6. Покажите, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта является следствием закона сохранения и превращения энергии.
7. Перечислите условия, необходимые для возникновения фотоэффекта.
8. Что такое задерживающее напряжение?
9. Что называется красной границей фотоэффекта? От чего она зависит?
10. Как квантовая теория объясняет существование граничной частоты фотоэффекта?
11. Запишите формулу для красной границы фотоэффекта.
12. Объясните законы фотоэффекта, исходя из квантовой теории света.

### Пример решения задачи

Монохроматический свет длиной волны  $\lambda = 450$  нм падает на поверхность натрия. Определите: а) энергию  $E$  фотона этого света; б) модуль импульса  $p$  фотона падающего света; в) красную границу  $v_{\min}$  фотоэффекта для натрия; г) максимальную кинетическую энергию  $E_{\kappa}^{\max}$  фотоэлектронов.

Дано:

$$\lambda = 450 \text{ нм} = 4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$E \text{ — ? } p \text{ — ? } v_{\min} \text{ — ?}$$

$$E_{\kappa}^{\max} \text{ — ?}$$

Решение

а) Энергия фотона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} =$$

$$= 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,8 \text{ эВ.}$$

б) Модуль импульса фотона:

$$p = \frac{h}{\lambda}; \quad p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{4,50 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

в) Красная граница связана с работой выхода соотношением:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}; \quad \nu_{\min} = \frac{3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

г) Из уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта находим, что максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона:

$$E_{\kappa}^{\max} = h\nu - A_{\text{вых}}; \quad E_{\kappa}^{\max} = 2,8 \text{ эВ} - 2,3 \text{ эВ} = 0,5 \text{ эВ}.$$

Ответ: а)  $E = 2,8 \text{ эВ}$ ; б)  $p = 1,50 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ; в)  $\nu_{\min} = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ; г)  $E_{\kappa}^{\max} = 0,5 \text{ эВ}$ .

### Упражнение 20

1. Определите энергию  $E$  фотона для излучения частотой  $\nu = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .
2. Определите модуль импульса  $p$  фотона, соответствующего излучению длиной волны  $\lambda = 600 \text{ нм}$ .
3. Вычислите энергию  $E_1$  фотона видимого света длиной волны  $\lambda_1 = 0,60 \text{ мкм}$  и сравните ее с энергиями фотонов ультрафиолетового излучения длиной волны  $\lambda_2 = 0,252 \text{ мкм}$ , рентгеновского излучения  $\lambda_3 = 0,10 \text{ нм}$  и  $\gamma$ -излучения  $\lambda_4 = 0,10 \text{ пм}$ .
4. Определите длину волны  $\lambda$  излучения, фотон которого имеет такую же энергию, как электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов  $\Delta\phi = 4,1 \text{ В}$ .
5. Определите модуль максимальной скорости  $v_{\max}$  фотоэлектронов, вылетевших с поверхности цинка при освещении его ультрафиолетовым излучением длиной волны  $\lambda = 300 \text{ нм}$ .
6. Определите красную границу  $\nu_{\min}$  фотоэффекта для некоторого металла, если работа выхода электрона из него  $A_{\text{вых}} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .
7. Определите длину волны  $\lambda$  ультрафиолетового излучения, падающего на поверхность цинка, при которой модуль максимальной скорости вылетающих фотоэлектронов составляет  $v_{\max} = 800 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ .
8. Определите максимальную кинетическую энергию  $E_{\kappa}^{\max}$  и модуль максимальной скорости  $v_{\max}$  фотоэлектрона, вылетевшего из натрия при облучении его ультрафиолетовым излучением длиной волны  $\lambda = 200 \text{ нм}$ .
9. На металлическую пластину падает монохроматический свет длиной волны  $\lambda = 0,413 \text{ мкм}$ . Определите работу выхода  $A_{\text{вых}}$ , если задерживающее напряжение  $U_3 = 1,0 \text{ В}$ .

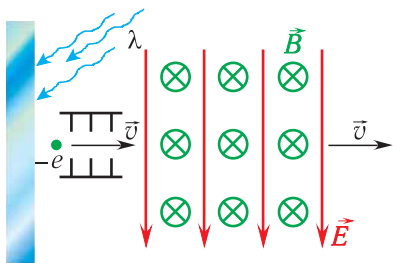


Рис. 113

10. Определите длину волны  $\lambda$  электромагнитного излучения, которым облучают вольфрамовую пластинку, если известно, что фотоэлектроны с максимальной кинетической энергией  $E_{\text{к}}^{\text{max}}$  проходят без отклонения область однородных взаимно перпендикулярных электрического и магнитного полей (рис. 113). Модуль напряженности электрического поля  $E = 10 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , модуль индукции магнитного поля  $B = 10 \text{ мТл}$ .

## § 28. Давление света. Корпускулярно-волновой дуализм

Словечко громкое всегда  
Из затрудненья вас выводит!  
И. Гете «Фауст»



Давлением называется скалярная физическая величина, численно равная отношению модуля силы, действующей по нормали к площадке, к ее площади  $p = \frac{F}{S}$ . В СИ единицей давления является 1 паскаль (Па):  $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}$ .

Из законов механики следует, что тело при ударе о некоторую поверхность оказывает на нее механическое давление, обусловленное изменением импульса тела. Причем давление тела на поверхность оказывается в случае как упругого, так и не упругого удара. А будет ли возникать подобный эффект при отражении и поглощении света некоторой поверхностью? Иными словами, оказывает ли свет давление на поверхность, с которой взаимодействует? После завершения построения Дж. Максвеллом волновой теории света ответы на эти вопросы стали очевидными. Свет как электромагнитная волна обладает энергией и импульсом и поэтому оказывает давление на поверхность, на которую он падает.

Объяснить давление света можно следующим образом. Электрическое поле напряженностью  $E$  электромагнитной волны, падающей на поверхность проводника, вызывает движение электронов вещества под действием электрической силы в направлении, противоположном  $E$ . Магнитное поле волны индукцией  $B$  действует на движущиеся частицы с силой Лоренца  $F_{\text{л}}$ , которая в данном случае будет направлена внутрь вещества (рис. 114) и совпадает с направлением распространения света. Суммарная сила, действующая на все электроны со стороны электромагнитной волны, и есть сила давления света.

Правообладатель Народная асвета



В 1873 г. Максвелл вычислил световое давление, используя разработанную им теорию электромагнитного поля. Он показал, что если свет, падающий перпендикулярно на зеркальную поверхность площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ , приносит за промежуток времени  $\Delta t = 1 \text{ с}$  энергию  $W$ , то он оказывает на данную поверхность давление:

$$p_3 = 2 \frac{W}{c}, \quad (1)$$

где  $c$  — модуль скорости распространения света.

Поскольку для солнечного излучения

$W = 1370 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , то модуль силы давления, с которой солнечное излучение действует при нормальном падении на зеркальную поверхность площадью  $S = 1 \text{ м}^2$  ( $F_d = pS = 2 \frac{W}{c} S$ ), равен  $F_d = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 9,1 \text{ мкН}$ .

При нормальном падении света на черную (поглощающую) поверхность модуль соответствующей силы давления  $F_d = pS = \frac{W}{c} S$ . Следовательно, сила, с которой солнечное излучение действует на черную поверхность площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ , в два раза меньше, чем на зеркальную, и составляет  $F_d = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 4,6 \text{ мкН}$ .

Давление света можно объяснить и с квантовой точки зрения. Рассмотрим свет как поток фотонов энергией  $h\nu$ , падающих нормально на зеркальную поверхность (рис. 115, а) и приносящих за промежуток времени  $\Delta t = 1 \text{ с}$  на площадь  $S = 1 \text{ м}^2$  энергию, равную  $W$ .

Число  $n$  этих фотонов определяется из условия  $n h \nu = W$ :

$$n = \frac{W}{h\nu}.$$

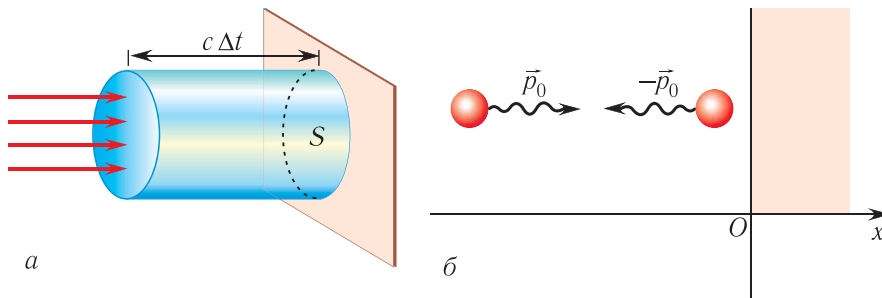


Рис. 115. Объяснение давления света с квантовой точки зрения

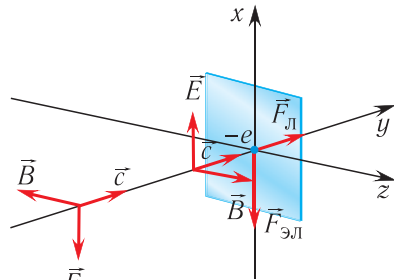


Рис. 114. Действие электромагнитной волны на электроны вещества

При отражении от зеркала фотон испытывает «упругий» удар, при котором происходит изменение направления импульса фотона на противоположное (рис. 115, б). Модуль этого изменения:

$$|\Delta \mathbf{p}_{\phi}| = |\mathbf{p}_0 - (-\mathbf{p}_0)| = 2|\mathbf{p}_0| = \frac{2h\nu}{c}.$$

Соответственно, модуль изменения импульса потока фотонов, падающих на зеркало площадью  $S$  за промежуток времени  $\Delta t$ :

$$|\Delta \mathbf{p}_{\text{пот}}| = nS\Delta t |\Delta \mathbf{p}_{\phi}| = \frac{W}{h\nu} S\Delta t \frac{2h\nu}{c} = \frac{2W}{c} S\Delta t.$$

Изменение импульса потока фотонов вызвано силой  $\mathbf{F}$ , действующей на фотоны со стороны зеркала. Модуль этой силы и модуль силы, действующей со стороны потока фотонов (т. е. света) на зеркало, находится из закона изменения импульса:

$$|\mathbf{F}| = \frac{|\Delta \mathbf{p}_{\text{пот}}|}{\Delta t} = \frac{2W}{c} S.$$

Следовательно, давление света на зеркало:

$$p = \frac{|\mathbf{F}|}{S} = 2 \frac{W}{c},$$

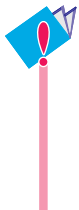
что совпадает с результатом, полученным Максвеллом.

При падении света на полностью поглощающую (черную) поверхность изменение импульса фотона будет в 2 раза меньше, так как

$$|\Delta \mathbf{p}'_{\phi}| = |\mathbf{0} - \mathbf{p}_0| = |\mathbf{p}_0| = \frac{h\nu}{c}.$$

Соответственно, и давление света в этом случае будет в 2 раза меньше:

$$p' = \frac{W}{c}.$$



Пусть из полного числа  $n$  фотонов, падающих на единичную поверхность за  $\Delta t = 1$  с, отражается  $Rn$  фотонов ( $R$  называется коэффициентом отражения), а  $(1 - R)n$  фотонов поглощается. Тогда сообщаемый ими единице поверхности импульс, численно равный давлению, находится по формуле:

$$p = (1 - R)n \frac{h\nu}{c} + Rn \left( 2 \frac{h\nu}{c} \right) = n \frac{h\nu}{c} (1 + R) = \frac{W}{c} (1 + R).$$

Русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1899 г. впервые измерил световое давление. Он подвесил на тонкой нити коромысло с парой крылышек на концах (рис. 116), поверхность у одного из которых была зачерненной, обеспечивая почти

полное поглощение ( $R = 0$ ), а у другого — зеркальной ( $R = 1$ ). Подвес с крылышками образовал чувствительные крутильные весы, которые помещались в сосуд, воздух из которого был откачан.

В опытах свет поочередно направлялся на каждое из крылышек коромысла. При этом он практически полностью отражался от зеркальной поверхности и практически полностью поглощался зачерненной поверхностью. Вследствие этого, давление света на зеркальное крылышко было примерно вдвое больше, чем на зачерненное. Соответственно, больше был и момент сил, поворачивающий коромысло при падении света на зеркальную поверхность (см. рис. 116). Измеряя угол поворота коромысла под действием света в обоих случаях, можно было судить о силе, действовавшей на крылышки, а следовательно, определить световое давление.

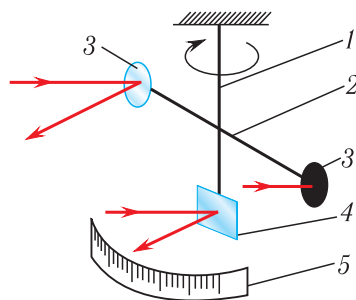


Рис. 116. Схема опыта Лебедева:  
1 — подвес; 2 — коромысло;  
3 — крылышки; 4 — зеркало;  
5 — шкала



О сложности и тщательности подготовки и проведения измерений говорит тот факт, что при освещении крылышек светом в обычных условиях возникают силы, которые по величине превосходят силу давления света в тысячи раз. Основными являются силы, возникающие вследствие действия конвекционных потоков газа, и радиометрического действия.

Радиометрическое действие возникает вследствие разности температур освещенной и неосвещенной сторон крылышка в разреженном газе. Молекулы газа, остающиеся в баллоне, отражаются от более нагретой стороны с большей скоростью, и вследствие отдачи крылышки стремятся повернуться в том же направлении, что и под действием светового давления. Радиометрическое действие уменьшается, если применять очень тонкие металлические крылышки для уменьшения разности температур и увеличить разрежение газа в баллоне.

Измерения Лебедева дали величину светового давления, согласующуюся с теорией Максвелла с погрешностью до 20 %. В 1923 г. немецкий физик Вальтер Герлах, используя более совершенные методы получения вакуума, повторил опыты Лебедева. Ему удалось получить результаты, согласующиеся с теоретическими значениями с погрешностью до 2 %.

Факт существования светового давления имеет большое значение, так как доказывает наличие у света не только энергии, но и импульса. Это свидетельствует о материальности электромагнитного излучения, представляющего собой еще одну форму существования материи — в виде электромагнитного поля.



Несмотря на сравнительно малое значение в обычных условиях, световое давление играет существенную роль в природе: препятствует гравитационному сжатию звезд, ориентирует хвосты комет в сторону от Солнца (рис. 117), сокращает срок службы искусственных спутников Земли вследствие постепенного уменьшения радиуса их орбиты. Еще в 1604 г. немецкий астроном Иоганн Кеплер объяснил изогнутую форму хвоста кометы действием сил светового давления со стороны Солнца.

В настоящее время активно обсуждаются и реализуются проекты космических кораблей — «парусников», которые приводятся в движение «солнечным ветром».

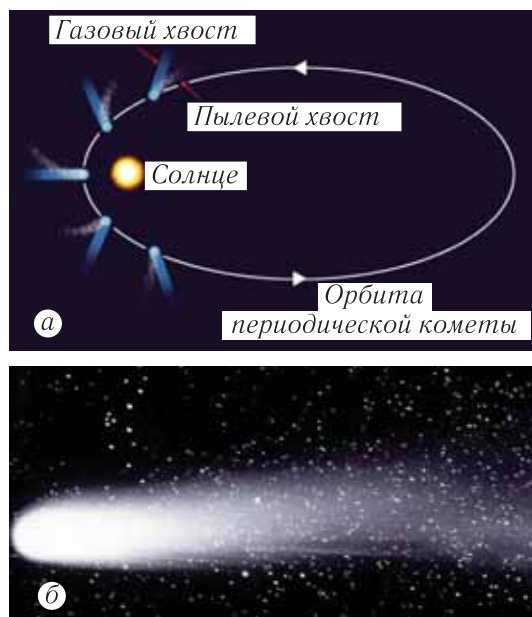


Рис. 117. Движение кометы вокруг Солнца (а); комета Галлея (б)

Еще со времен Исаака Ньютона и Христиана Гюйгенса (XVII в.) представления о природе света были противоречивы. Одни ученые, во главе с Ньютоном, считали свет потоком частиц — корпускул, другие, вслед за Гюйгенсом, полагали, что свет представляет собой не что иное, как волны.



«Корпускула» от латинского слова *corpusculum* — маленькая частица.

До начала XIX в. обе точки зрения отстаивались с переменным успехом. Так, исходя из гипотезы о корпускулах, можно было объяснить законы прямолинейного распространения и отражения света, а такие явления, как интерференция и дифракция, объяснялись только его волновыми свойствами.

Однако в XX в. было установлено, что в целом ряде явлений, таких как, например, фотоэффект, свет ведет себя как совокупность частиц с определенной энергией и импульсом. Одновременное наличие у объекта волновых и корпускулярных свойств получило название **корпускулярно-волнового дуализма**.

Правообладатель Народная асвета

В одних процессах в большей мере проявляются волновые свойства света, в других — корпускулярные. Долгое время природа этого дуализма была совершенно непонятна, и он казался искусственным объединением противоречивых свойств материи.

Только после создания квантовой механики выяснилось, что «раздвоение личности» света закономерно и представляет собой проявление специфических свойств, присущих микромиру в целом.

Французский физик Луи де Бройль в 1923 г. высказал смелое предположение, что корпускулярно-волновой дуализм должен иметь место для всех микрообъектов.



В своей теоретической статье «Кванты света, дифракция и интерференция» (1923 г.) де Бройль уверенно предсказал, что «Дифракционные явления обнаружатся и в потоке электронов, проходящих сквозь достаточно малое отверстие».

В квантовой физике с каждой материальной частицей связывают волну, распространяющуюся в направлении движения частицы, которую называют волной де Бройля, а длину этой волны называют дебройлевской длиной волны. Частота  $\nu$  связана с энергией  $E$  частицы соотношением  $E = h\nu$ . Де Бройль нашел, что модуль импульса  $p$  частицы должен выражаться через ее длину волны  $\lambda_B$  так же, как у света:

$$p = \frac{h}{\lambda_B}. \quad (1)$$

Это соотношение «узаконивает» корпускулярно-волновой дуализм, поскольку всякому объекту, имеющему импульс  $p$ , независимо от его природы ставят в соответствие волновой процесс с длиной волны

$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \quad (2)$$

Оно также позволяет определить, в каких явлениях волновые свойства существенны, а в каких — нет. Для макроскопических объектов их модуль импульса как правило очень велик. Соответственно, в этом случае длина волны мала — много меньше размеров самого тела, и волновые свойства становятся незаметными.

Гипотеза де Бройля о наличии волновых свойств у электрона и других микро-частиц была проверена экспериментально.

Поскольку дифракция света наблюдается на решетках, период которых сравним с длиной волны  $\lambda$ , то для наблюдения дифракции электронов следует выбирать решетки с соответствующим периодом. Например, каждому из электронов в пучке, прошедшем между обкладками конденсатора, заряженного до напряжения



Рис. 118. Картина дифракции электронов на слюде

$U = 150$  В, соответствует энергия  $W = 150$  эВ, и его дебройлевская длина волны  $\lambda_B = 1 \cdot 10^{-10}$  м. Поэтому для обнаружения волновых свойств электронов необходимо в качестве дифракционной решетки использовать кристаллы, представляющие собой упорядоченные структуры, расстояния между атомами которых  $d \sim 10^{-10}$  м.

В 1927 г. американские физики Клинтон Дэвиссон и Люстер Джермер впервые наблюдали дифракцию электронов на кристалле никеля.

На рисунке 118 представлена фотография дифракционной картины электронов на слюде.

Современные эксперименты позволяют наблюдать процесс образования дифракционной картины при последовательном увеличении числа электронов, проходящих через щель, а компьютерное моделирование этого процесса представлено на рисунке 119.



Рис. 119. Результаты компьютерного моделирования явления дифракции  $N$  электронов на двух щелях: а —  $N = 27$ ; б —  $N = 70$ ; в —  $N = 735$



Рис. 120. Электронный микроскоп

Способность к интерференции и дифракции была обнаружена не только у электронов, но и у других частиц — протонов, нейтронов и альфа-частиц.

Волновые свойства частиц нашли свое применение в электронной оптике, занимающейся исследованием, построением и использованием электронных пучков для получения изображений.

Так, использование волновых свойств пучка электронов позволило создать новое поколение микроскопов — *электронные микроскопы* (рис. 120), значительно превосходящие по степени увеличения оптические микроскопы вследствие того, что дебройлевская длина волны электронов гораздо меньше длины волны видимого света.



Уже первый электронный просвечивающий микроскоп (Э. Руска, 1933 г.) позволял изучать детали в десять раз меньшие, чем те, которые способны разрешать самые «мощные» оптические микроскопы. Дальнейшие исследования позволили сотрудникам лаборатории фирмы ИВМ в Цюрихе (Швейцария) Г. Биннингу и Г. Рореру в 1981 г. создать электронный сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий рассмотреть даже «отдельный» атом.

В мае 2013 г. международная группа ученых (Германия, Греция, Нидерланды, США, Франция) с помощью фотоионизационного микроскопа сумела «сфотографировать» отдельный атом водорода. Ученым удалось получить прямое изображение самого легкого и самого маленького из всех атомов (рис. 121).

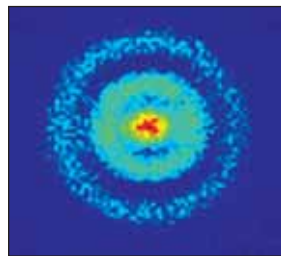


Рис. 121. «Фотография», а точнее «волнография», атома водорода

Датский физик Нильс Бор сформулировал **принцип дополнительности**, который утверждал, что **для описания свойств материи (как поля, так и вещества) необходим учет как волновых, так и корпускулярных свойств.**

Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм присущ не только электромагнитному излучению, но и элементарным частицам. На них также распространяется и принцип дополнительности, в соответствии с которым используются как волновые, так и корпускулярные представления в зависимости от конкретной ситуации.



В 1929 г. Луи де Бройль за открытие волновой природы электрона был удостоен Нобелевской премии.

В 1986 г. Герду Биннингу и Гейнриху Рореру совместно с Эрнстом Руска была присуждена Нобелевская премия по физике за создание электронного микроскопа.



1. Как электромагнитная теория объясняет давление света?
2. Опишите суть опыта Лебедева по измерению светового давления.
3. Как объяснить световое давление на основе квантовых представлений о свете?
4. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм света?
5. Перечислите явления, в которых проявляются волновые свойства света; корпускулярные (квантовые) свойства света.
6. Чему равен модуль силы  $F$  светового давления, приходящегося на зачерненную поверхность площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ ? Солнечная постоянная (количество световой энергии, переносимой через площадку единичной площади за единицу времени) равна  $I = 1,37 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ .
7. Оцените площадь космического паруса, при котором его сила тяги составит 1 Н.

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 5

Раздел физики, описывающий физические явления на атомном и внутриатомном (субатомном) уровнях, называется **квантовой физикой**.

Энергия колебательной системы (осциллятора), совершающей гармонические колебания с частотой  $\nu$ , может, согласно гипотезе Планка, принимать лишь определенные дискретные значения, отличающиеся на целое число элементарных порций — **квантов энергии**.

Эйнштейн развил гипотезу Планка, представив, что свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов).

Наименьшая порция (квант) энергии, которую несет излучение частотой  $\nu$ , определяется по формуле:

$$E = h\nu,$$

где постоянная  $h$  — фундаментальная постоянная — **постоянная Планка**. Ее приближенное значение:

$$h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Модуль импульса фотона определяется соотношением:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Явление испускания электронов веществом под действием падающего на него света получило название **внешнего фотоэффекта**. Испускание веществом каких-либо частиц называется **эмиссией**. Поэтому внешний фотоэффект называют также **фотоэлектронной эмиссией (фотоэмиссией)**, а вылетающие электроны — **фотоэлектронами**.

Экспериментально установлены следующие **законы внешнего фотоэффекта**.

1. Сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна интенсивности  $I$  падающего излучения.

2. Максимальная кинетическая энергия  $E_k^{\max}$  фотоэлектронов не зависит от интенсивности  $I$  падающего излучения и линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  падающего излучения.

3. Для каждого вещества существует граничная частота  $\nu_{\min}$ , такая, что излучение меньшей частоты не может вырывать электроны из его поверхности.

**Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:**

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

Правообладатель Народная асвета



**Красная граница** фотоэффекта — наименьшая частота излучения, при которой наблюдается фотоэффект  $\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$ , зависит только от работы выхода электронов для данного вещества ( $A_{\text{вых}} > 0$ ), т. е. определяется химической природой вещества и состоянием его поверхности.

Под **корпускулярно-волновым дуализмом** понимают тот факт, что всем объектам в природе присущи как волновые, так и корпускулярные свойства. В одних условиях в большей мере проявляются волновые, в других — корпускулярные свойства объектов.

**Принцип дополнительности** утверждает, что для описания свойств материи (как поля, так и вещества) необходим учет как волновых, так и корпускулярных свойств.

# Глава 6

## Физика атома

### § 29. Явления, подтверждающие сложное строение атома. опыты Резерфорда. Ядерная модель атома

Еще, быть может, каждый атом —  
Вселенная, где сто планет;  
Там все, что здесь, в объеме сжатом,  
Но также то, чего здесь нет.

В. Брюсов



Атом гелия содержит положительно заряженное ядро и два электрона, которые обращаются вокруг него. Ядро атома гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ) является  $\alpha$ -частицей.

Древнегреческий ученый Демокрит в V в. до н. э. пришел к идее о существовании мельчайших и неделимых частиц, которые он назвал **атомами**. Спустя более 2,5 тыс. лет было доказано, что атом имеет сложную структуру. Последнее десятилетие XIX в. ознаменовалось крупнейшими открытиями в физике — *естественной радиоактивности* французским физиком Антуаном Анри Беккерелем (1896 г.) и *электрона* английским физиком Джозефом Джоном Томсоном и немецким физиком Эмилем Вихертом (1897 г.). Радиоактивное излучение содержало положительно и отрицательно заряженные частицы, поэтому естественно было предположить, что эти частицы входят в состав атомов. А с открытием электрона стало ясно, что именно электроны входят в состав атома.



Назвать наименьший отрицательный заряд «электроном» предложил в 1891 г. Джордж Джонстон Стони, а в 1897 г. Джордж Френсис Фишджеральд предложил использовать этот термин для названия самой частицы.

В начале XX в. в научном мире широкое распространение получила модель атома английского физика Джозефа Джона Томсона. Согласно этой модели положительный заряд равномерно распределен по всему объему атома в виде некой однородной массы, которую Томсон называл «сферой однородной положительной электризации». Так как атом электрически нейтрален, то электроны плавают в этой положительно заряженной среде и полностью компенсируют ее положительный электрический заряд (рис. 122).

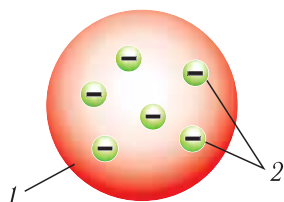


Рис. 122. Модель атома Томсона: 1 — положительно заряженный шар; 2 — электроны

Для проверки справедливости такой модели атома английский физик Эрнест Резерфорд с сотрудниками в 1911 г. выполнил эксперименты, результаты которых оказались в противоречии с моделью атома Томсона.

Пучок  $\alpha$ -частиц направлялся на тонкую золотую фольгу толщиной около 400 нм (рис. 123). Световые вспышки от частиц, прошедших через фольгу, регистрировались на сцинтилляционном экране с помощью микроскопа.

Исходя из модели атома Томсона, вследствие равномерного распределения заряда по всему объему атома ожидалось, что при столкновении  $\alpha$ -частиц с атомами они легко пройдут через фольгу и будут незначительно отклоняться от прямолинейной траектории (рассеиваться). При этом картина их рассеивания должна была быть примерно такой, как на рисунке 124.

Однако полученные результаты совершенно не соответствовали этим предсказаниям. В экспериментах значительная часть  $\alpha$ -частиц действительно отклонялась на малые углы  $\theta$  от нуля до  $4^\circ$ — $6^\circ$  от направления своего начального движения. Но были и такие частицы, которые рассеивались на углы больше  $90^\circ$  (рис. 125) или даже возвращались назад.

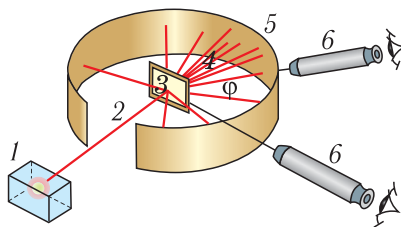


Рис. 123. Схема экспериментальной установки Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц: 1 — источник  $\alpha$ -частиц; 2 —  $\alpha$ -частицы; 3 — золотая фольга; 4 — рассеянные  $\alpha$ -частицы; 5 — сцинтилляционный экран; 6 — микроскоп

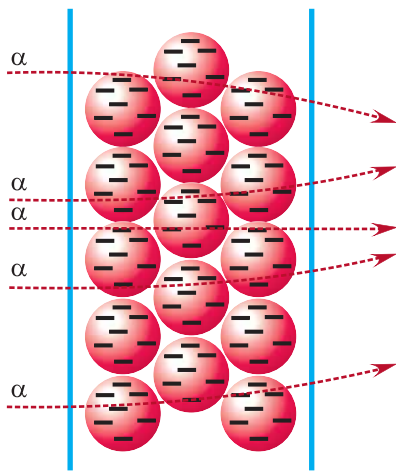


Рис. 124. Предполагаемое рассеяние  $\alpha$ -частиц атомами золота согласно модели атома Томсона

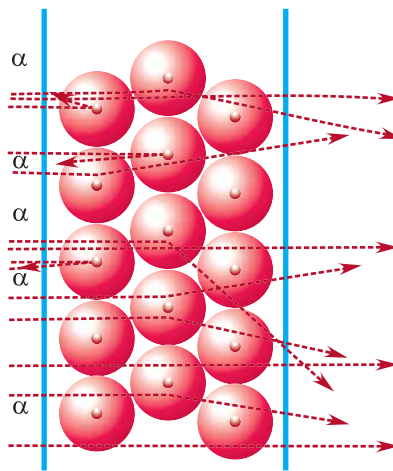


Рис. 125. Наблюдаемое рассеяние  $\alpha$ -частиц атомами золота в опытах Резерфорда

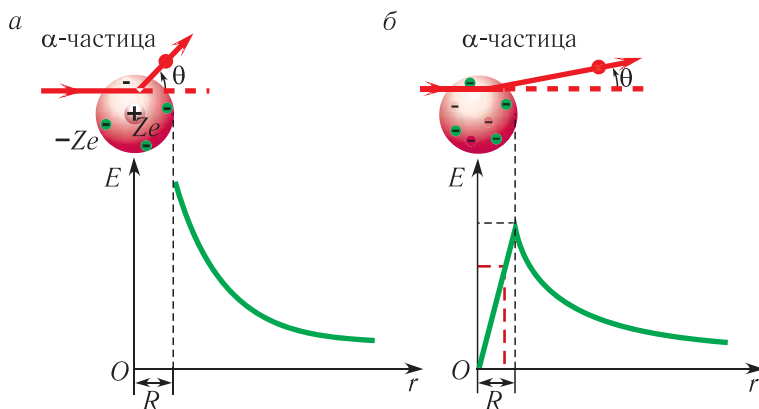


Рис. 126. Модели атома и зависимости модуля напряженности электрического поля от расстояния: *а* — ядерная модель; *б* — модель атома Томсона



Как писал сам Резерфорд: «Это было почти столь же неправдоподобным, как если бы вы произвели выстрел по кусочку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас».

Толщина фольги в экспериментах Резерфорда соответствовала примерно 1600 слоям атомов.

Примерно одна из 20 000  $\alpha$ -частиц испытывала отклонение на угол больше  $90^\circ$ , одна из 40 000 — на угол больше  $120^\circ$ , а одна из 70 000 — на угол больше  $150^\circ$ .

Из результатов экспериментов следовало то, что внутри атома имеется очень сильное электрическое поле, которое создается положительным зарядом, сконцентрированным в очень малом объеме. Название «ядро» для этого заряда было предложено Резерфордом. Размер ядра мал, но в нем сосредоточена практически вся масса атома. При сближении  $\alpha$ -частицы и ядра в соответствии с законом Кулона между ними возникают большие силы отталкивания, которые существенно изменяют траекторию  $\alpha$ -частиц (рис. 126, *а*).

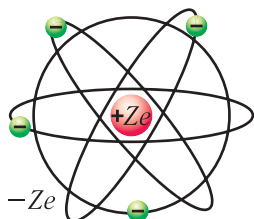


Рис. 127. Модель атома Резерфорда

В модели атома Томсона электрическое поле соответствует электрическому полю равномерно заряженного по объему шара (рис. 126, *б*), и при приближении к центру атома модуль его напряженности стремится к нулю. В этом случае не было бы  $\alpha$ -частиц, рассеянных на большие углы.

На основании анализа результатов проведенных экспериментов Резерфорд в 1911 г. предложил **ядерную модель** атома (рис. 127):

Правообладатель Народная асвета

1) в центре атома расположено ядро размером  $d \leq 10^{-15}$  м, его заряд  $q = +Ze$ , где  $Z$  — порядковый номер элемента в периодической системе элементов Менделеева;

2) почти вся масса атома (99,96 %) сосредоточена в положительно заряженном ядре;

3) ядро окружают электроны, образуя электронную оболочку атома; число электронов равно  $Z$ ; суммарный заряд электронов  $q = Z(-e)$ , поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Внутри атома электроны не могут покоиться, так как под действием сил Кулона они упали бы на ядро. Поэтому они вращаются вокруг ядра по определенным орбитам.

Такую модель атома называют также *планетарной*, поскольку она напоминает нашу Солнечную систему, в которой планеты вращаются вокруг массивного центра — Солнца.



Модель атома Резерфорда с изображением электронных орбит стала популярной эмблемой XX в. Так, на рисунке 128 показана эмблема физического факультета Белорусского государственного университета.

На основании ядерной модели атома были объяснены экспериментальные данные, полученные при изучении рассеивания  $\alpha$ -частиц. Но она противоречила законам классической механики и электродинамики, так как не позволяла объяснить факт стабильности существования атома.

Действительно, во-первых, в соответствии с законами классической электродинамики Максвелла при ускоренном движении электронов по орбитам они должны непрерывно излучать электромагнитные волны, частота которых должна быть равна частоте вращения электронов вокруг ядра.

Во-вторых, при излучении электроны должны были терять энергию и «упасть» на ядро за промежуток времени порядка  $10^{-13}$  с (рис. 129). Соответственно, в таком случае атомы должны были быть неустойчивыми и иметь очень короткое время жизни.

В-третьих, частота обращения электрона вокруг ядра (по мере приближения к ядру) должна была изменяться



Рис. 128. Эмблема физического факультета БГУ

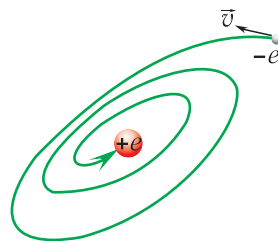


Рис. 129. Траектория «падения» электрона на ядро атома водорода

непрерывно, что привело бы к непрерывному характеру спектра излучения атома (частота излучения равна частоте колебаний источника). Однако в проведенных экспериментах наблюдался линейчатый спектр.

Таким образом, полное объяснение строения атома на основании механики Ньютона и электродинамики Максвелла было невозможно.



1. Объясните сущность модели атома Томсона.
2. Объясните схему экспериментов Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц.
3. Почему фольга в экспериментах Резерфорда должна быть как можно тоньше?
4. Объясните причину рассеяния  $\alpha$ -частиц атомами вещества.
5. Сформулируйте основные положения ядерной модели атома.
6. Изобразите схематически ядерную модель атома.
7. Какая сила удерживает электроны на орбитах в ядерной модели атома?
8. Почему ядерную модель атома называют также планетарной? Какие элементы модели являются аналогами планет?
9. Какие затруднения возникают при объяснении процессов излучения энергии атомами на основе классической механики и электродинамики при использовании ядерной модели атома?

## § 30. Квантовые постулаты Бора

Сплетением концентрических кругов  
И эксцентрических расчертят сферу,  
И, циклов, эпициклов наверхтев,  
Орбиты уместят внутри орбит.

*Дж. Мильтон*

Для преодоления противоречий, возникающих при описании строения атома на основе законов классической механики и электродинамики, с экспериментальными данными датский физик Нильс Бор в 1913 г. в работе «О строении атомов и молекул» предложил квантовую модель атома, основанную на двух постулатах. В современном виде они формулируются следующим образом.

**I постулат Бора (постулат стационарных состояний):**

**атом может находиться в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.**

Стационарные состояния можно пронумеровать, присвоив им порядковые номера  $n = 1, 2, 3, \dots$ , причем каждому состоянию соответствует определенное дискретное значение энергии  $E_n$ .

Согласно модели Бора стационарным состояниям атома соответствуют определенные (разрешенные) орбиты, по которым электроны движутся вокруг ядра.

Правообладатель Народная асвета

Бор для простоты полагал, что эти орбиты представляют собой окружности, хотя в общем случае орбиты могут иметь форму эллипса, причем ядро располагается в одном из его фокусов (рис. 130).



Планеты Солнечной системы также движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце. Это обстоятельство делает аналогию между ядерной моделью атома и Солнечной системой еще более тесной.

Первый постулат противоречит как законам классической механики (энергия движущихся электронов может быть любой), так и законам классической электродинамики (ускоренно движущиеся электроны всегда излучают электромагнитные волны).

## II постулат Бора (правило частот):

атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант электромагнитного излучения, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}, \quad (1)$$

где  $\nu_{kn}$  — частота поглощенного или испущенного кванта излучения,  $E_k$ ,  $E_n$  — энергия атома в  $k$ -м и  $n$ -м стационарном состоянии,  $h$  — постоянная Планка.

Если  $E_k > E_n$ , то при переходе происходит излучение энергии, если  $E_k < E_n$  — ее поглощение.

Состояние атома, которому соответствует наименьшая энергия, называется **основным**, а состояния, которым соответствуют большие значения энергии, — **возбужденными**. В основном энергетическом состоянии атом может находиться неограниченно долго, а в остальных стационарных состояниях порядка  $10^{-8}$  с. Это так называемое *время жизни атома* в возбужденном состоянии.

Как следует из II постулата Бора, частота излучения атома не связана с частотой вращения электрона по орбите, она определяется разностью значений энергии атома  $E_k$  и  $E_n$  в начальном и конечном состояниях. Переход атома из одного стационарного состояния в другое сопровождается электромагнитным излучением длиной волны

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu_{kn}} = \frac{hc}{E_k - E_n}. \quad (2)$$

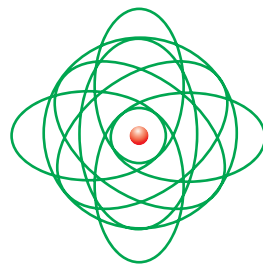


Рис. 130. Электронные орбиты в атоме по теории Бора — Зоммерфельда

Таким образом, постулаты Бора позволили объяснить линейчатую структуру атомных спектров — она обусловлена дискретностью значений энергии атома в стационарных состояниях.

Бор предложил также количественное *условие квантования* для нахождения радиусов орбит электронов, движущихся по круговым орбитам. Стационарные (разрешенные) орбиты электронов в атоме находятся из условия

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

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — номер орбиты,  $m_e$  — масса электрона,  $v_n$  — модуль скорости электрона на  $n$ -й орбите,  $r_n$  — радиус  $n$ -й орбиты,  $h$  — постоянная Планка.

Таким образом, постулаты Бора основывались на трех экспериментальных предпосылках — результатах исследования атомных спектров, квантовой теории излучения, развитой Планком и Эйнштейном, и ядерной (планетарной) модели атома Резерфорда.

Исходя из постулатов Бора и условия квантования орбит (3), можно объяснить структуру энергетических уровней простейшего атома — атома водорода, состоящего из ядра (протона) и одного электрона, вращающегося вокруг него.

На основании второго закона Ньютона и закона Кулона, а также условия квантования орбит (3) Бор смог определить радиусы орбит электронов, а также энергии стационарных состояний. Радиус первой (ближайшей к атомному ядру) орбиты электрона ( $n = 1$ ) определяет размер атома водорода в основном состоянии. Он равен  $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10}$  м.

Из второго закона Ньютона следует, что при движении электрона по круговой орбите радиусом  $r$  вокруг ядра с линейной скоростью, модуль которой  $v$ , сила Кулона  $F_k$  сообщает электрону центростремительное ускорение

$$k \frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}, \quad (4)$$

где  $m_e$  — масса электрона,  $e$  — модуль заряда электрона.

Отсюда

$$v^2 = k \frac{e^2}{m_e r}. \quad (5)$$

Из условия квантования орбит (3) находим модуль скорости на орбите с номером  $n$ :

$$v_n = n \frac{h}{2\pi m_e r_n}. \quad (6)$$



Подставляем выражение (6) в соотношение (5) и находим радиус стационарной орбиты электрона с номером  $n$ :

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 k m_e e^2}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), радиус орбиты возрастает пропорционально  $n^2$ .

Модуль скорости электрона на орбите находим, подставляя выражение (7) в формулу (6):

$$v_n = k \frac{2\pi e^2}{nh}. \quad (8)$$

Так как радиус  $r$  орбиты может принимать только дискретные (квантованные) значения  $r_n$  (3), то и энергия атома в различных стационарных состояниях может также принимать только дискретные значения  $E_n$ . Энергия атома водорода определяется только номером орбиты  $n$ .

Энергия электрона в атоме водорода равна сумме его кинетической энергии  $E_k$  при движении по круговой орбите и потенциальной энергии  $E_n$  в электростатическом поле ядра. Поскольку взаимодействуют частицы, имеющие заряды противоположных знаков (заряд ядра  $q_1 = +e$ , заряд электрона  $q_2 = -e$ ), то между ними действует сила кулоновского притяжения и потенциальная энергия их взаимодействия отрицательна:

$$E_n = -k \frac{e^2}{r}. \quad (9)$$

Энергия электрона в атоме совпадает с полной энергией атома — системы, состоящей из атомного ядра и электрона:

$$E = E_k + E_n = \frac{m_e v^2}{2} - k \frac{e^2}{r}. \quad (10)$$

Подставив в формулу (10) выражение для модуля скорости (8) и радиуса  $r_n$   $n$ -й орбиты (7) для значений энергетических уровней атома  $E_n$ , получаем:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (11)$$

Как видно из формулы (11), энергия атома водорода определяется только номером орбиты  $n$ , поскольку все остальные величины в этой формуле — фундаментальные константы. Знак «минус» показывает, что система является связанной.

Согласно формуле (11) энергия атома водорода в *основном состоянии* ( $n = 1$ ) получается равной  $E_1 = -13,6$  эВ, а его энергия в *ионизированном состоянии* (когда электрон находится бесконечно далеко от ядра, т. е.  $n = \infty$ ) —

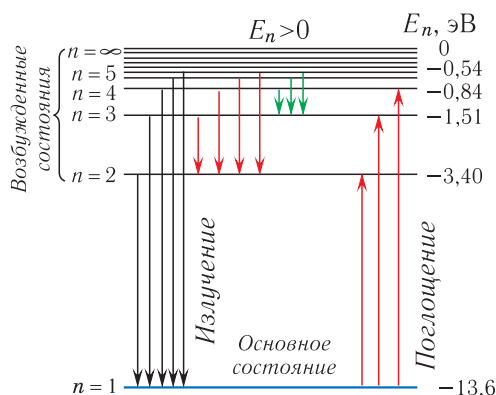


Рис. 131. Энергетическая диаграмма стационарных состояний атома водорода

атома используется **энергетическая диаграмма** (рис. 131). Графически возможные значения энергии атома изображают в виде схемы уровней энергии (**энергетических уровней**) — горизонтальных прямых, проведенных на расстояниях, в определенном масштабе, соответствующем разностям разрешенных значений энергии. Переходы атома из одного состояния в другое изображаются на диаграмме вертикальными линиями между соответствующими уровнями. Направление перехода обозначается стрелками.

Энергетическую диаграмму можно считать своеобразной «лестницей» с «нижней площадкой» (основным состоянием) и поднимающимися вверх «ступенями» (возбужденными состояниями). Формула для энергетических уровней энергии  $E_n$  атома показывает важную закономерность: чем выше поднимается над основным (первым) уровнем энергетическая «лестница», тем менее «крутыми» становятся ее ступени (на рисунке 132 это хорошо видно при  $n > 4$ ).

Следовательно, чем электрон дальше от ядра, тем на меньшую величину отличаются соседние уровни энергии, т. е. густота энергетических уровней растет. Квантовые скачки при этом уменьшаются, вследствие чего переходы между стационарными состояниями атома все больше и больше становятся «похожими» на непрерывное изменение энергии. Таким образом, по мере удаления от ядра (с ростом  $n$ ) энергетическая

$E_1 = 0$ . Во втором состоянии ( $n = 2$ ) энергия  $E_2 = \frac{E_1}{4} = -3,40$  эВ, в третьем ( $n = 3$ ) —  $E_3 = \frac{E_1}{9} = -1,51$  эВ и т. д. Энергию атома водорода можно рассчитать по формуле:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (эВ)}. \quad (12)$$

Так как энергия атома может принимать только дискретный набор значений, то говорят, что она **квантованна**.

Для наглядного представления стационарных энергетических состояний

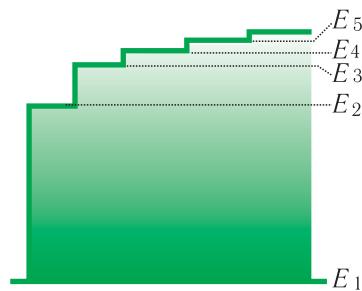


Рис. 132. Энергетическая «лестница» состояний атома водорода

«лестница» постепенно превращается в пологий «плавный подъем» (см. рис. 132), т. е. энергия становится почти непрерывной величиной, как в классической теории. Для удаления электрона из атома водорода, находящегося в основном состоянии, атому необходимо сообщить энергию  $E_{\text{св}} = E_{\infty} - E_1 = 13,6$  эВ. Энергия  $E_{\text{св}}$  называется **энергией связи электрона в атоме**, а процесс удаления электрона из атома — **ионизацией**. Разность энергий  $E_{\infty} - E_1 = 13,6$  эВ равна энергии ионизации атома водорода. Выше уровня  $n = \infty$  (при  $E > 0$ ) электрон является свободным и может иметь любую энергию.



В соответствии с представлениями квантовой механики свободное движение электрона, оторванного от атома, подобно распространению бегущей волны в неограниченном пространстве. Для нее возможны любые значения длин волн. Следовательно, энергия свободного электрона не квантуется, и спектр его энергий излучения непрерывный. Вследствие этого линия, обозначенная на энергетической диаграмме  $n = \infty$ , соответствует коротковолновой границе линейчатой структуры излучения (поглощения) атома. К ней примыкает непрерывный спектр излучения электрона.

Ионизация сложных атомов может быть однократной (атом теряет один электрон), двукратной (два электрона) и т. д.

Поскольку при возбуждении атома радиус орбиты электрона возрастает, то испускание излучения атомом происходит при переходах электронов в атоме с внешних орбит на внутренние (рис. 133).

Модель атома Бора позволяет описать не только атом водорода, но и ионизированные атомы (ионы) других элементов, вокруг ядер которых, как и в атоме водорода, движется только один электрон. Такие ионы называются *водородоподобными*. Примерами таких ионов являются однократно ионизированный атом гелия ( $\text{He}^+$ ), двукратно ионизированный атом лития ( $\text{Li}^{++}$ ) и т. д.

Необходимо отметить, что энергия атома может изменяться не только при испускании или поглощении энергии, но и при столкновении атомов. При неупругом столкновении изменяется внутренняя энергия сталкивающихся атомов и электроны в них переходят на другие уровни энергии.

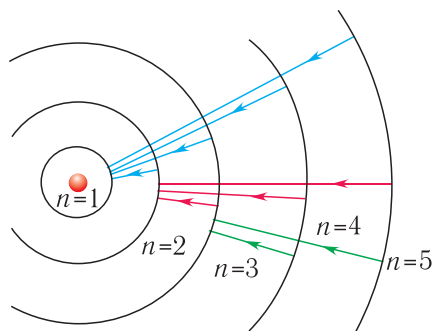


Рис. 133. Переходы электронов в атоме при испускании излучения



В 1922 г. Нильсу Бору была присуждена Нобелевская премия «за заслуги в исследовании строения атомов и излучения».

Исследования Бора фактически положили начало новому этапу развития спектроскопии, которая из эмпирической науки превратилась в эффективный метод изучения атомной структуры. Спустя полвека по этому поводу Бор скажет: «Я увидел путь рождения спектров!»

С помощью модели атома Бора удалось:

во-первых, вычислить энергию ионизации атома водорода, хорошо согласующуюся с экспериментом: как теория, так и эксперимент дали значение  $E_{\text{и}} = 13,6 \text{ эВ}$ ;

во-вторых, значительно продвинуться в объяснении закономерностей периодической системы химических элементов Менделеева. Согласно модели атома Бора электроны движутся по определенным орбитам, образующим различные группы — электронные оболочки. Структура электронных оболочек определяет химические свойства элементов, которые периодически повторяются по мере заполнения оболочек электронами. Это позволило «предсказывать» свойства неизвестных элементов. Так, например, был открыт элемент с порядковым номером  $Z = 72$  — гафний, по своим свойствам аналогичный цирконию ( $Z = 40$ ).

Модель атома Бора объяснила основные закономерности спектра атома водорода, хотя частично сохранила классический характер, поскольку в ней предполагалось, что электроны движутся по орбитам вокруг ядра. На основе данной модели не удалось построить теорию более сложных атомов, например объяснить спектр излучения следующего за водородом атома гелия, который содержит всего два электрона. Соответственно, не могло быть и речи об объяснении на основании данной модели строения молекул, так как в них картина движения и взаимодействия электронов и атомных ядер намного сложнее, чем в атомах.

Теория атома Бора явилась важнейшим этапом на пути создания последовательной теории микроскопических явлений — квантовой механики.



1. Что предложил Бор для объяснения стабильности атома?
2. Сформулируйте первый постулат Бора — постулат стационарных состояний.
3. Сформулируйте и запишите правило частот — второй постулат Бора.
4. Запишите условие квантования круговых орбит электронов.
5. Чем отличается атом, находящийся в основном состоянии, от атома, находящегося в возбужденном состоянии?
6. Куда «исчезает» энергия при переходе электрона из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией?
7. неподвижен ли электрон в основном состоянии атома водорода в модели Бора?

### Упражнение 21

1. Сколько различных квантов света  $N$  может испустить возбужденный атом водорода, если он находится на четвертом энергетическом уровне?

2. В атоме водорода электрон перешел с четвертого энергетического уровня ( $n = 4$ ) на второй ( $k = 2$ ). Как при этом изменилась энергия атома?

3. На какие уровни энергии может переходить электрон в атоме водорода из основного состояния при воздействии видимого излучения? Ультрафиолетового? Инфракрасного?

4. Найдите относительное уменьшение массы  $\frac{\Delta m}{m}$  атома водорода при переходе электрона с энергетического уровня  $n = 2$  в основное состояние на энергетический уровень  $k = 1$ .

5. Протон, летевший со скоростью, модуль которой  $v_0 = 7,5 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , сталкивается с покоящимся невозбужденным атомом водорода. После столкновения протон летит со скоростью, модуль которой  $v_1 = 1,5 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  в том же направлении, а атом переходит в возбужденное состояние. Определите длину волны  $\lambda$  излучения, которое может испустить атом, переходя в основное состояние. (Различием масс протона и атома водорода пренебречь.)

6. Рассчитайте радиус третьей и трехсотой орбит электрона в атоме водорода в рамках модели Бора.

7. Электрон в модели атома водорода по Бору движется по круговой орбите радиусом  $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$  м. Какую энергию  $E$  должен поглотить атом, чтобы радиус орбиты электрона увеличился в  $k = 4$  раза?

8. Если бы атом водорода в возбужденном состоянии имел радиус  $r_n = 1,0$  мм, то какое квантовое число  $n$  и энергия  $E$  соответствовали бы этой орбите?

## § 31. Квантово-механическая модель атома

Теория Бора предложила физикам пользоваться по понедельникам, средам и пятницам классическими законами, а по вторникам, четвергам и субботам — квантовыми.

*Вильям Брэгг-старший*



Атомная орбиталь — область окооядерного пространства, в котором наиболее вероятно нахождение данного электрона (рис. 134). В зависимости от энергии электронов орбитали имеют различные формы и размеры. Каждый электрон характеризуется собственным механическим моментом движения,

который называется *спином* (от англ. spin — вращать), проекция которого принимает два значения. На одной орбитали может находиться не более двух электронов, имеющих противоположные (антипараллельные) спины.

В классической механике движение частицы описывается заданием ее координат и импульса (скорости) в каждой точке траектории. Чтобы рассчитать параметры движения любой сложной системы, достаточно задать координаты и импульсы (скорости) всех частиц, входящих в систему, в начальный момент времени и условия, при которых происходит движение (действующие силы, поля). После этого, используя уравнения движения (второй закон Ньютона), можно найти координаты и импульсы (скорости) в любой момент времени, т. е. определить, где будет находиться частица в тот или иной момент времени.

При переходе в область микромира оказывается, что такой способ не применим. Для описания явлений микромира была разработана *квантовая механика*.

**Квантовая механика** — раздел физики, в котором изучаются свойства и поведение микрочастиц, а также связь величин, характеризующих частицы, с физическими величинами, непосредственно измеряемыми в экспериментах.

Результаты экспериментов показывали, что микрообъекты обладают одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. Так, например, электрон является частицей, имеющей определенную массу и заряд, но при его движении вокруг ядра необходимо учитывать его волновые свойства, так как у него отсутствует определенная траектория движения и точное расположение в пространстве. Для объяснения двойственного поведения микрообъектов требовался кардинальный пересмотр установившихся представлений.

В квантовой механике движение частицы описывается волновой функцией  $\psi(x, y, z, t)$  — функцией координат и времени. Зная волновую функцию частицы, используя измерительные приборы, можно получить сведения о поведении этой частицы и о результатах любого ее взаимодействия. При этом волновая функция характеризует вероятность любого результата измерения. Квадрат ее модуля  $|\psi(x, y, z, t)|^2$  определяет вероятность пребывания частицы в окрестностях точки с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ . В квантовой механике, даже если задать все начальные условия в какой-то момент времени и полностью решить

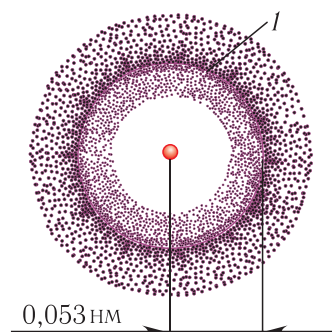


Рис. 134. Схема электронного облака атома водорода

систему уравнений для волновых функций, можно установить только вероятность тех или иных процессов. Например, вероятность обнаружить электрон в данном месте может оказаться в 10 раз больше вероятности его нахождения в другом месте. Однако предсказать его положение со стопроцентной достоверностью, как это было в классической механике, уже нельзя.

Электроны в атоме приближенно рассматриваются как «размазанные» в пространстве и образующие вокруг ядра электронное облако (см. рис. 134). Электронное облако, которое соответствует основному состоянию, концентрируется в области, находящейся достаточно близко к ядру. Для возбужденных состояний оно распределяется на все большие расстояния от ядра. Слабее всего связаны с ядром электроны самой внешней оболочки, которые определяют размеры атома в целом.

В зависимости от того, что и как измеряется в определенном состоянии частицы, на первый план выступают то ее корпускулярные свойства, то ее волновые свойства. Применение волновой функции позволяет описать как корпускулярные, так и волновые свойства микрочастиц.

Важнейшим физическим положением квантовой механики является знаменитый **принцип неопределенности Гейзенберга**, согласно которому:

*ни при каком увеличении точности измерений невозможно добиться того, чтобы произведение неопределенностей измерения координаты и импульса частицы стало меньше постоянной Планка.*



Этот принцип математически выражается в виде следующего неравенства, связывающего неопределенность  $\Delta x$  координаты  $x$  с неопределенностью  $\Delta p_x$  проекции импульса  $p_x$ :

$$\Delta p_x \Delta x \geq h,$$

которое обычно называют **соотношением неопределенностей Гейзенберга**. По мнению Бора, координаты и импульсы подобны двум проекциям предмета, который может быть сфотографирован либо спереди, либо сбоку, но не сразу со всех сторон. Они не отвергают, а дополняют друг друга.

Таким образом, в квантовой механике для системы, находящейся в некотором известном состоянии, можно предсказать результаты измерений либо ее положения, либо ее импульса по отдельности. Вероятностная интерпретация предсказывает, что измерения одинаковым детектором для одинаковых частиц в одинаковых состояниях одной и той же величины будут давать разные результаты. В частности, вероятность координаты определяется как  $|\psi|^2$ .

Один из важнейших выводов квантовой механики состоит в том, что существует наинизший уровень энергии, которому соответствует основное состояние системы. В этом состоянии система обладает минимальной кинетической энергией, причем  $\langle E_{\text{к min}} \rangle \neq 0$ .

Ядерная модель атома не означает, что существуют орбиты электронов и что электрон необходимо уподобить твердому шарiku, движущемуся вокруг ядра. Отказ от такого механического представления об электроне и его движении позволил В. Гейзенбергу и Э. Шредингеру построить квантовую теорию атома, в которой постулаты Бора оказываются следствиями более общих принципов.

В квантовой механике для задания каждого состояния электрона в атоме необходимы четыре различных квантовых числа  $n, l, m_l, m_s$ . В таблице 9 представлены допустимые значения всех четырех квантовых чисел электрона.

Таблица 9. Квантовые числа

Квантовые числа	Символ	Значения	Полное число значений
Главное	$n$	1, 2, 3, ...	$\infty$
Орбитальное	$l$	0, 1, ..., $n - 1$	$n$ (при заданном $n$ )
Магнитное	$m_l$	$-l, -l + 1, \dots, l - 1, l$	$2l + 1$ (при заданном $l$ )
Спиновое	$m_s$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	2

Рассмотрим основы квантово-механического описания наиболее простого атома — атома водорода. Квантовое число  $n$  из модели атома Бора сохраняется под названием **главного квантового числа**. Оно принимает целочисленные значения от 1 до  $\infty$ . От него зависит полная энергия состояния атома водорода:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (эВ)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Число  $l$  называется **орбитальным квантовым числом**, которое (при заданном  $n$ ) принимает целочисленные значения

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n - 1).$$

Число  $m_l$  называется **магнитным квантовым числом** и принимает (при заданном  $l$ ) целочисленные значения от  $-l$  до  $+l$ :

$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l.$$

Для описания состояний электрона в атоме вводится еще одно квантовое число — **спиновое**  $m_s$ , которое принимает два значения:

$$m_s = \pm \frac{1}{2}.$$



Это связано с тем, что при заданных  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  электрон может находиться в двух различных состояниях, характеризующихся проекцией спина.

Швейцарский физик-теоретик Вольфганг Паули предложил простое правило (**принцип запрета Паули**) — в одном и том же квантовом состоянии может находиться не более одного электрона.



В 1925 г. Паули написал: «В атоме не может существовать двух или больше электронов, для которых значения всех квантовых чисел одинаковы. Если в атоме находится электрон, для которого все эти числа имеют определенное значение, то это состояние «занято».

Согласно этому принципу два электрона не могут иметь одинакового набора квантовых чисел, и на его основе объясняется наличие групп из 2, 8, 18 и 32 элементов периодической таблицы Менделеева.

Эти группы элементов являются следствием принципа запрета Паули, а также квантово-механического правила, согласно которому значение квантового числа  $l$  не превосходит  $n - 1$  ( $0 \leq l \leq n - 1$ ), а квантовое число  $m$  пробегает ряд целочисленных значений от  $-l$  до  $+l$  ( $-l \leq m \leq +l$ ).

Атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в различных состояниях (рис. 135). Энергия атома водорода зависит только от главного квантового числа  $n$ , но уровню энергии с заданным  $n$  соответствуют несколько

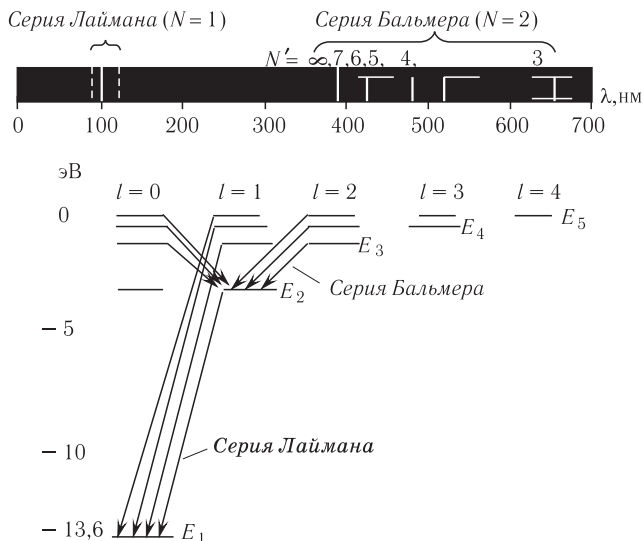


Рис. 135. Спектр атома водорода и энергетическая диаграмма

Правообладатель Народная асвета

состояний, отличающихся значениями  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$ . Состояния с заданными значениями  $n$ ,  $l$  принято обозначать как  $1s$ ,  $2s$ ,  $2p$ ,  $3s$ , ..., где цифры указывают значения  $n$ , а буквы  $s$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $f$ , ... — соответствующие значения  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Уровень, которому соответствует лишь одно квантовое состояние, называется *невыврожденным*.

Полное число всех возможных состояний электрона с различными  $l$  и  $m$  при фиксированном значении главного квантового числа  $n$ , получится  $n^2$ . С учетом двух возможных значений спина общее число электронов в оболочке оказывается равным  $2n^2$ . Это и есть максимальное число электронов в оболочке с номером  $n$ .

Спектр излучения (поглощения) атома водорода можно полностью описать как результат переходов электронов в атоме из одних состояний, описываемых квантовыми числами  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$ , в другие, описываемые иным набором. Однако, как доказано теоретически и подтверждено экспериментально, разрешены не все переходы, а только удовлетворяющие *правилам отбора*.

**Правила отбора** касаются изменений орбитального  $l$  и магнитного  $m_l$  квантовых чисел при переходах с излучением (т. е. испусканием или поглощением). Их изменение удовлетворяет условиям:

$$\Delta l = \pm 1; \Delta m_l = 0, \pm 1.$$

В то же время правила отбора не накладывают никаких ограничений на изменения главного квантового числа  $n$ .

Совокупность в многоэлектронном атоме электронов, имеющих одно и то же главное квантовое число, называют *электронной оболочкой* или *слоем*.

Основные законы квантовой механики были открыты в 1900—1928 гг. В это же время произошло ее становление как новой науки — полноправного раздела теоретической физики. Были выдвинуты новые фундаментальные идеи — кванта энергии и света, стационарных состояний атомных систем и переходов между ними, принципа соответствия и корпускулярно-волнового дуализма для излучения и микрочастиц.

После успешного описания атома водорода квантовая механика стала применяться для решения разнообразных проблем современной физики микроскопических явлений — в теориях атомов и молекул, ядер, элементарных частиц, столкновений и излучения. Как было установлено в прошлом веке, квантовые свойства частиц проявляются в таких физических явлениях, как сверхпроводимость, ферромагнетизм, сверхтекучесть.



В 1932 г. Вернеру Гейзенбергу была присуждена Нобелевская премия по физике за разработку основ квантовой механики.

В 1933 г. «за открытие новых форм атомной теории» Эрвин Шредингер был удостоен Нобелевской премии по физике.

Правообладатель Народная асвета

В 1945 г. В. Паули была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие принципа запрета.

В 1954 г. М. Борн был удостоен Нобелевской премии за фундаментальные исследования в квантовой механике, в особенности за статистическую интерпретацию волновой функции.



1. Что изучается в квантовой механике?
2. Объясните принципиальное отличие квантово-механического описания состояния системы от ее классического описания.
3. Почему в квантовой механике понятие траектории частицы не имеет смысла?
4. Сформулируйте принцип запрета Паули. Что могло бы произойти, если бы этот принцип не выполнялся?
5. Сколько квантовых чисел необходимо для определения состояния электрона в атоме?

## § 32. Излучение и поглощение света атомом. Спектры испускания и поглощения

Вследствие того что энергия атома квантована, она характеризуется определенным набором энергетических уровней  $E_n$ . Испускание излучения происходит при переходе электронов атома с высших энергетических уровней  $E_k$  на один из низших энергетических уровней  $E_n$  ( $E_k > E_n$ ). Атом излучает фотон (квант электромагнитной энергии) с энергией  $h\nu_{kn} = E_k - E_n$ . Частота излучения при этом:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (1)$$

Атом самопроизвольно переходит в основное состояние не только сразу, но и поэтапно — через промежуточные состояния, излучая при этом соответствующие кванты света. Набор их частот образует **линейчатый спектр излучения** атома.

Поглощение света — процесс, обратный испусканию. Атом, поглощая фотон  $h\nu_{kn} = E_k - E_n$ , переходит из низшего состояния  $k$  в более высокое состояние  $n$  ( $E_k < E_n$ ). При этом частота поглощенного фотона будет равна:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (2)$$

Данные переходы дают **линейчатый спектр поглощения** атома.

Частоты переходов испусканием и поглощением, происходящие между одними и теми же энергетическими уровнями, совпадают.

Таким образом, спектры атомов позволяют определять изменения энергии атома при испускании или поглощении им излучения.

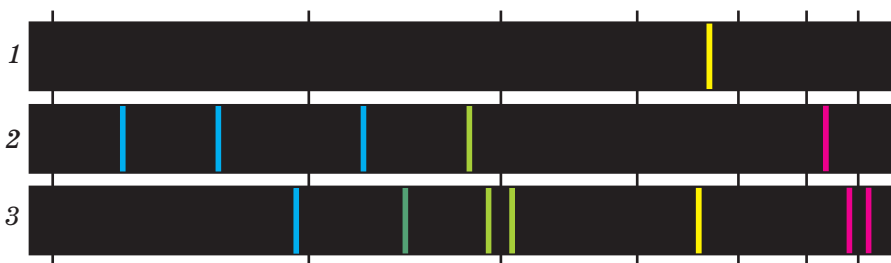


Рис. 136. Линейчатые спектры излучения: 1 — натрия; 2 — водорода; 3 — гелия

Спектры, полученные от самосветящихся тел, называются **спектрами испускания**. Они бывают трех типов: *линейчатые*, *полосатые* и *сплошные*.

**Линейчатые спектры** имеют все вещества в газообразном атомарном состоянии. Обычно (например, при нормальных условиях) атомы газа находятся в основном состоянии и не излучают света. Если нагревать такой газ, то электроны в некоторых атомах переходят на более высокие энергетические уровни. Такие (возбужденные) атомы при переходе электронов на более низкие энергетические уровни и испускают фотоны. В результате атомарные спектры состоят из отдельных узких линий различного цвета, разделенных темными промежутками (рис. 136).

Изучение линейчатых спектров показало, что каждый химический элемент обладает своим строго индивидуальным спектром. Такие спектры отличаются друг от друга цветом отдельных светящихся линий, их положением и числом.

**Полосатые спектры** имеют газы, состоящие из молекул. Для объяснения молекулярных спектров необходимо принимать во внимание большую сложность структуры молекул. В молекулах, кроме движения электронов, происходят колебательное движение ядер около положения равновесия и вращательное движение молекулы как целого. Согласно квантовой механике энергия всех видов движения может принимать только определенные дискретные значения (квантуется). Полная энергия молекулы определяется тремя видами ее внутренних движений. Электронному, колебательному и вращательному движениям молекулы соответствуют три типа уровней энергии: электронные, колебательные и вращательные. При соединении атомов в молекулы каждый атомный уровень превращается в ряд близких уровней, соответствующих колебательным и вращательным движениям. Так как расстояние между этими уровнями очень мало, особенно в случае вращательных уровней (характерное расстояние между уровнями  $\sim 10^{-3}$  эВ), то в результате переходов между этими уровнями возникает множество очень близких спектральных линий. Это обуславливает появление системы полос



Рис. 137. Полосатые спектры испускания: 1 — угольной дуги; 2 — молекул йода

в спектрах таких молекул (рис. 137). Спектры молекул можно использовать для идентификации молекул и их структуры.

**Непрерывные (сплошные) спектры** имеют нагретые тела, находящиеся в твердом и жидком состоянии, а также газы при высоком давлении и плазма. Вследствие интенсивного взаимодействия между молекулами индивидуальные черты, присущие отдельным частицам, в таких спектрах неразличимы. В них представлены все длины волн, нет темных промежутков и на экране видна сплошная разноцветная полоса (рис. 138).



Рис. 138. Непрерывный (сплошной) спектр излучения Солнца

Прозрачные вещества поглощают часть падающего на них излучения, и в спектре, полученном после прохождения белого света через такие вещества, появляются темные линии, или полосы поглощения. Такой спектр называется **спектром поглощения** (рис. 139).

Так, вещество в газообразном состоянии поглощает наиболее сильно свет тех длин волн, которые оно испускает в нагретом состоянии.

Это означает, что темные линии в спектре поглощения будут находиться как раз в тех местах, где находятся светящиеся линии в спектре испускания

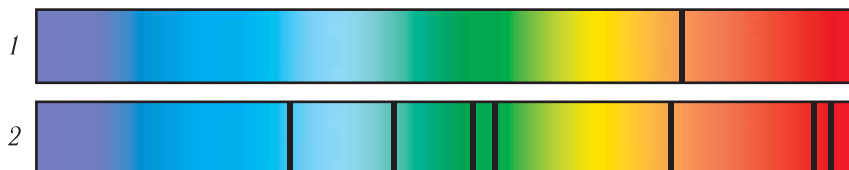


Рис. 139. Спектры поглощения: 1 — натрия; 2 — гелия

данного химического элемента. Эти строго установленные закономерности в линейчатых спектрах дают возможность обнаружить те или иные элементы в данном веществе.



Спектр поглощения атома водорода при нормальных условиях содержит только одну серию линий (серию Лаймана), частоты которых находятся в ультрафиолетовой области. Это объясняется тем, что при относительно небольших температуре и давлении атомы водорода не возбуждены и поглощение будет происходить только с первого энергетического уровня.

Для определения качественного и количественного состава вещества применяется метод, основанный на получении и исследовании его спектров. Этот метод называется **спектральным анализом**. Это самый быстрый и простой способ определения состава различных химических соединений.

Основатели спектрального анализа немецкие физики Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф, исследуя спектры паров соединений щелочных металлов лития, натрия и калия, обнаружили новые элементы — рубидий и цезий, названные так по цвету наиболее ярких линий в их спектрах. У рубидия — красная линия, у цезия — синяя.

Спектральный анализ базируется на двух основных положениях:

- 1) каждый химический элемент или химическое соединение характеризуется определенным спектром;
- 2) интенсивность линий и полос в спектре зависит от концентрации того или иного элемента в веществе.

К достоинствам спектрального анализа можно отнести:

- высокую чувствительность (обнаруживает элементы с относительной концентрацией  $10^{-7}$ — $10^{-8}$ , т. е. один атом вещества на сто миллионов других атомов);
- малое время измерения;
- малые количества исследуемого вещества (достаточно  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  г и даже до  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  г) вплоть до возможности детектирования отдельных молекул;
- дистанционность измерений (можно проводить исследования, например, состава атмосферы далеких планет).

По спектрам определяют, из каких химических элементов состоит вещество и их количество.



Белорусский физик академик Михаил Александрович Ельяшевич разработал основы теории колебаний многоатомных молекул и их колебательных спектров. Он внес значительный вклад в теорию спектров редкоземельных элементов и низкотемпературной плазмы.



1. Что называют спектром?
2. Какие виды спектров вы знаете?
3. Какие виды спектров излучения вы знаете?
4. Что называют спектром поглощения?
5. Что называют спектральным анализом?
6. На чем основан спектральный анализ?

### § 33. Спонтанное и индуцированное излучение



Излучение, происходящее с неизменной частотой, называется монохроматическим.

Энергия атома квантована, т. е. имеет дискретный ряд значений энергии  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Электроны в атоме могут находиться в одном из состояний, определяемых этими уровнями энергии. Вследствие этого при переходах электронов с одного уровня на другой атом излучает или поглощает кванты энергии электромагнитного поля. Существуют два вида переходов: *спонтанные* и *вынужденные*.

Если электрон в атоме, находящийся в возбужденном состоянии на верхнем энергетическом уровне  $E_m$ , переходит на более низкий уровень  $E_n$  самопроизвольно, без каких-либо внешних воздействий, то происходит так называемый **спонтанный** переход (рис. 140, *a*). При таком переходе излучается фотон, частота которого определяется соотношением:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}. \quad (1)$$

Переход такого рода является случайным (вероятностным) процессом, происходящим в принципиально непредсказуемый момент времени. Этим переходам соответствует спонтанное излучение. Такие процессы происходят в нагретых телах и светящихся газах. При нагревании или электрическом разряде часть атомов переходит в возбужденное состояние. Затем они излучают свет, переходя в основное состояние.

Случайность спонтанных переходов электронов в атомах и молекулах различных веществ означает то, что они происходят неодновременно и независимо друг от друга, поэтому фазы излучаемых при переходах электромагнитных волн не согласованы. Случайным является не только момент испускания фотонов, но и на-

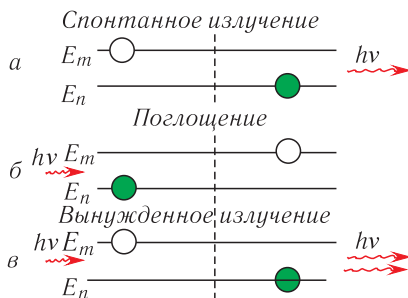


Рис. 140. Электронные переходы в атоме

правление их распространения и их поляризация (направление  $\vec{E}$  электрического поля и  $\vec{B}$  магнитного поля в электромагнитной волне). Вследствие этого спонтанное излучение вещества *ненаправленно, некогерентно и неполяризовано*. Примером такого излучения является свет ламп накаливания.

Переход атома из одного состояния в другое может происходить также *безызлучательным* путем. В этом случае избыток энергии выделяется в какой-либо иной форме. Например, он может перейти в кинетическую энергию окружающих молекул.

В атоме, находящемся в возбужденном состоянии, электрон может перейти с верхнего уровня  $E_m$  на нижний  $E_n$  не только спонтанно, но и под действием электромагнитного излучения, частота которого  $\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$  совпадает с частотой (1) (рис. 140, в). Переходы, происходящие под действием внешнего электромагнитного излучения, называются **индуцированными** или **вынужденными**. При таком переходе излучается квант энергии  $h\nu_{mn}$ , который добавляется к исходящему от внешнего источника излучению. Отличительной особенностью индуцированного излучения является тождественность излученного фотона и фотона, индуцировавшего данный переход. Оба фотона при этом имеют одинаковые частоту, фазу, направление распространения, т. е., образно говоря, «клонировать» друг друга. Именно поэтому индуцированное излучение приобретает свойства *монохроматичности, когерентности, направленности*.



Понятие индуцированного излучения было введено А. Эйнштейном в 1916 г.

Кроме рассмотренного индуцированного перехода «сверху вниз», могут происходить и вынужденные переходы «снизу вверх» (рис. 140, б). Если электрон в атоме находится на нижнем уровне  $E_n$ , то он может перейти на верхний уровень  $E_m$  под действием внешнего электромагнитного излучения частотой (1). Атом при этом поглощает фотон, энергия которого  $h\nu_{mn} = E_m - E_n$ .

Дискретность энергетического спектра характерна не только для атомов, но и для любой системы взаимодействующих микрочастиц — молекул, ионов, твердых тел.



Важнейшей характеристикой любого квантового перехода является вероятность перехода, которая определяет, как часто происходит данный квантовый переход. Вынужденные переходы отличаются от спонтанных зависимостью от внешних условий. Их вероятность прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения, в то время как вероятность спонтанного перехода постоянна для данной пары энергетических уровней.



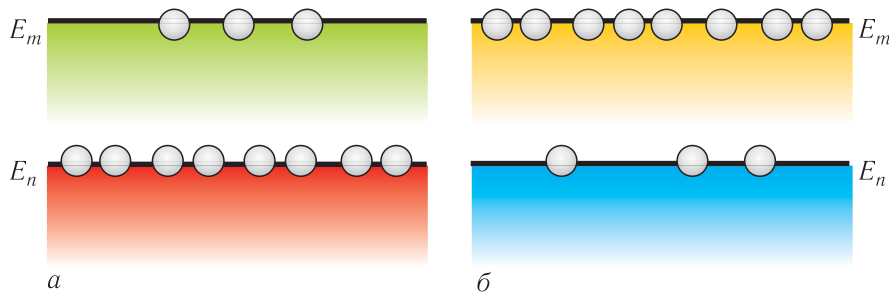


Рис. 141. Заселенности энергетических уровней: *а* — при тепловом равновесии; *б* — инверсная заселенность

Число атомов, электроны которых находятся на данном энергетическом уровне в единице объема вещества, называют населенностью этого уровня. В естественных условиях (в условиях теплового равновесия) в веществе число атомов  $N_m$  в возбужденном состоянии с большей энергией  $E_m$  меньше, чем число атомов  $N_n$  в состоянии с меньшей энергией  $E_n$ , т. е. при  $E_m > E_n$  населенность уровня  $E_m$  меньше, чем населенность уровня с энергией  $E_n$  ( $N_m < N_n$ ) (рис. 141, *а*).

Для усиления излучения необходимо искусственно изменить населенности уровней в веществе. Рассмотрим два энергетических уровня атома  $E_m$  и  $E_n$ . Если при падении на такое вещество электромагнитного излучения частотой  $\nu_{mn}$  (1) достигнуто неравновесное состояние вещества, для которого на верхнем энергетическом уровне находится большее количество электронов в атоме, чем на нижнем ( $N_m > N_n$ ), то излучаться будет большее число квантов, чем поглощаться. В этом случае будет происходить усиление падающего излучения, и вещество будет действовать как усилитель.

Состояние вещества, при котором для некоторой пары уровней населенность верхнего уровня больше, чем нижнего, получило название состояния с **инверсной населенностью** (рис. 141, *б*). Процесс создания инверсной населенности получил название **накачки**. Вещество, в котором осуществлена инверсия населенностей, называется **активным** (или *активной средой*).

Для того чтобы усилитель превратить в генератор, необходимо ввести подходящую «обратную связь». Смысл обратной связи заключается в том, что часть усиленного излучения остается в активном веществе и подвергается повторному когерентному усилению.

Явление индуцированного излучения позволяет управлять излучением атомов, усиливать и генерировать когерентное излучение.

Основная трудность в практическом осуществлении данной идеи — создание инверсной населенности. Советскими физиками Николаем Геннадьевичем Басовым

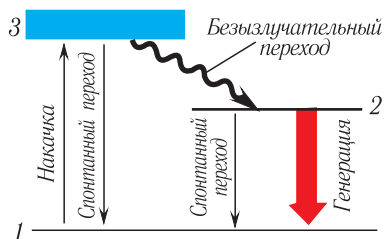


Рис. 142. Трехуровневая схема генерации

и Александром Михайловичем Прохоровым в середине пятидесятих годов XX в. был предложен универсальный метод создания инверсной населенности посредством воздействия на молекулы внешнего электромагнитного излучения на резонансной частоте. Впоследствии он получил название *метода трех уровней*.

Вещество, в котором имеются метастабильные уровни, можно эффективно использовать для усиления света. Рассмотрим, как была решена эта проблема на примере трехуровневой системы. Общее число уровней в веществе всегда велико, но в нем существуют три «рабочих» энергетических уровня, которые позволяют создать инверсию населенностей. У некоторых атомов имеются долгоживущие промежуточные возбужденные состояния (их называют метастабильными), время жизни в которых может достигать до нескольких секунд, в то время как в обычных возбужденных состояниях время жизни  $\sim 10^{-8}$  с.

В этом случае, если накачка производится на частоте перехода между нижним и верхним уровнями, то можно перевести часть атомов из основного 1 в возбужденное состояние 3 (рис. 142). За короткое время (время жизни порядка  $10^{-8}$  с) большая часть этих атомов самопроизвольно перейдет в метастабильное долгоживущее возбужденное состояние 2 без излучения. Избыточная энергия передается веществу, вследствие чего оно нагревается.

Населенность промежуточного (метастабильного) уровня, увеличиваясь за счет спонтанных переходов с верхнего уровня на промежуточный, может превысить населенность нижнего уровня. Пропустив излучение с частотой  $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$  через эту систему находящихся в метастабильном состоянии атомов, получаем дополнительно к исходным фотонам еще и индуцировано испущенные фотоны (см. рис. 142). Вследствие этого результирующий поток фотонов будет превышать исходный. Таким образом, на частоте перехода с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 будет происходить усиление и генерация излучения.



1. Что такое спонтанное и индуцированное излучения?
2. Какие характеристики имеет спонтанное излучение?
3. Какие характеристики имеет индуцированное излучение?
4. Объясните процесс возбуждения индуцированного излучения.
5. Что такое активная среда?
6. Какой процесс называется накачкой?
7. Объясните принцип работы трехуровневой системы генерации излучения.

Правообладатель Народная асвета

## § 34. Лазеры

При взаимодействии с активным веществом (средой) внешнее излучение усиливается, поскольку к исходным фотонам добавятся индуцированные фотоны с тождественными характеристиками. Тождественность фотонов приводит к тому, что при их взаимодействии с новым возбужденным атомом получается вместо 2 уже 4 фотона, затем 8, 16 и т. д. Это позволяет использовать вынужденное излучение для усиления электромагнитных волн и создания генераторов монохроматического когерентного излучения — *лазеров*.

Слово **лазер** является сокращенной записью английской фразы — **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (laser)**, которая переводится так: усиление света путем вынужденного испускания излучения.

Таким образом, принцип работы лазеров заключается в использовании вынужденных излучательных переходов в системах с инверсией населенности для генерации когерентных световых волн.

Принципиальная схема рубинового лазера представлена на рисунке 143. Обратная связь в лазере достигается размещением активного вещества *1* в *оптическом резонаторе*. Он состоит из двух параллельных плоских зеркал, одно из которых — полностью отражающее *2*, другое — полупрозрачное *3*, служащее для выхода излучения *5* из резонатора.

Накачка *4* создает инверсию населенностей уровней. На начальной стадии генерации фотоны, спонтанно испущенные атомами активной среды, распространяются в различных направлениях. Но только фотоны, которые распространяются перпендикулярно зеркалам, многократно проходят через активную среду в результате отражений от зеркал резонатора.

Излученная атомами энергия накапливается в резонаторе и, воздействуя на активную среду, вызывает новые индуцированные переходы. Происходит лавинообразное «размножение» фотонов в веществе. Далее пучок монохроматического лазерного излучения выходит наружу через полупрозрачное зеркало.

Мощность индуцированного излучения должна превысить мощность неизбежных потерь на поглощение, рассеивание излучения, нагревание зеркал резонатора и т. п. Поэтому для эффективной генерации интенсивность падающего на вещество излучения накачки должна превысить некоторое пороговое значение.

Таким образом, для работы лазера необходимо наличие *активной среды, резонатора и превышения порога генерации в системе*.

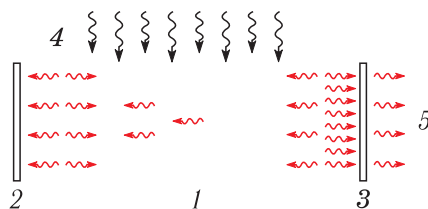


Рис. 143. Принципиальная схема лазера на рубине

Основными характеристиками лазерного излучения являются *когерентность, малая расходимость (узкая направленность), монохроматичность, возможность получать сверхкороткие импульсы, большая мощность.*



В рубиновом лазере используется оптическая накачка светом мощной импульсной лампы-вспышки (лампой накачки), в полупроводниковых лазерах неравновесное состояние достигается при пропускании электрического тока через  $p-n$ -переход, а в газовых лазерах атомы рабочего вещества возбуждаются электрическим разрядом.

По виду активной среды и способу накачки лазеры можно разделить на *газовые, твердотельные, полупроводниковые, жидкостные, химические, газодинамические.*

Лазеры находят широкое применение в голографии, передаче оптической информации, обработке материалов (сварка, резка, сверление и т. п.), медицине, локации, рекламе.

При работе с лазерами необходимо быть внимательными и осторожными. Наибольшую опасность лазерное излучение представляет для глаз и кожи. При попадании в глаз луч лазера фокусируется в пятно очень малых размеров, что может за доли секунды привести к ожогам сетчатки глаза, частичной или полной необратимой потере зрения. Прямое, а в некоторых случаях и рассеянное излучение лазеров большой мощности способно вызывать ожоги кожи. Оно представляет также пожарную опасность.

Знак опасности, предупреждающий о лазерном излучении, приведен на рисунке 144.



Рис. 144. Знак опасности лазерного излучения



В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и Ч. Таунсу «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию лазера».

Белорусский физик академик Николай Александрович Борисевич в 1978 г. открыл явление «стабилизации» электронно-возбужденных многоатомных молекул. Он впервые получил генерацию излучения многоатомных молекул в газовой фазе; разработал газовые и одночастотные гелиево-неоновые лазеры со значительной выходной мощностью.

Правообладатель Народная асвета

В 1957 г. белорусский физик академик Борис Иванович Степанов вывел универсальное соотношение между спектрами поглощения и испускания сложных молекул и полупроводников, которое получило название *соотношение Степанова*. Он (совместно с А. Н. Рубиновым и В. А. Мостовниковым) открыл новый класс генерирующих соединений — органические красители.



1. Объясните принцип действия лазера.
2. В чем заключается роль метастабильных состояний в генерации лазерного излучения?
3. Для чего в лазере необходим оптический резонатор?
4. Чем отличается лазерное излучение от излучений, создаваемых другими источниками света?
5. Где применяются лазеры?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 6

К числу первых моделей атомов относятся модель атома Томсона и ядерная (планетарная) модель атома Резерфорда.

Постулаты Бора.

### I постулат Бора (постулат стационарных состояний):

атом может находиться в особых стационарных **квантовых** состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.

### II постулат Бора (правило частот):

атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе испускается или поглощается квант электромагнитной энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h},$$

где  $\nu_{kn}$  — частота поглощенного или испущенного кванта излучения,  $E_k$ ,  $E_n$  — энергия атома в  $k$ -м и  $n$ -м стационарном состоянии,  $h$  — постоянная Планка.

**Условие квантования орбит** в атоме:

$$mvr_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

**Квантовая механика** — раздел физики, в котором изучаются свойства и поведение микрочастиц, а также связь величин, характеризующих частицы, с физическими величинами, непосредственно измеряемыми в экспериментах.

В квантовой механике для задания состояния электрона в атоме необходимы четыре различных квантовых числа: *главное квантовое  $n$* , *орбитальное квантовое  $l$* , *магнитное квантовое  $m_l$* , *спиновое квантовое  $m_s$* .

**Принцип запрета Паули:** в одном и том же квантовом состоянии может находиться не более одного электрона.

**Принцип соответствия:** любая новая теория, претендующая на более глубокое описание физических явлений (соответственно и на более широкую область применимости) должна включать в себя «предшествующие» теории как предельные случаи.

Состояние вещества, при котором для некоторой пары уровней населенность верхнего больше, чем нижнего, получило название состояния с **инверсной населенностью**.

Среда с инверсной населенностью уровней энергии — **активная среда**.

Процесс перевода атомов из основного состояния в возбужденное называют **накачкой**.

Основной физический процесс, определяющий действие лазера, — это **индуцированное испускание излучения**.

**Основные характеристики лазерного излучения:** когерентность, малая расходимость (узкая направленность), монохроматичность, реализация сверхкоротких импульсов, большая мощность излучения.

## Глава 7

# Ядерная физика и элементарные частицы

Быть может, эти электроны —  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знания, войны, троны.  
И память сорока веков!

В. Брюсов

### § 35. Протонно-нейтронная модель строения ядра атома. Энергия связи ядра атома

В экспериментах Э. Резерфорда по изучению рассеивания  $\alpha$ -частиц веществом было установлено, что в центральной части атома находится *положительно заряженное ядро*, имеющее размер порядка  $10^{-15}$  м, в котором сосредоточено 99,96% массы атома (рис. 145).

Для завершения построения модели атома необходимо было ответить на вопрос: обладает ли атомное ядро структурой, и если обладает, то какой?

Наличие в ядре положительно заряженных частиц — *протонов* — было экспериментально доказано Э. Резерфордом в 1919 г., а в 1925 г. П. Блэккет впервые получил фотографии следа протона в камере Вильсона. Протон, обозначаемый латинской буквой  $p$ , представляет собой ядро атома водорода. Он обладает массой  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг и элементарным зарядом  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

В 1930 г. немецкие ученые Вальтер Боте и Ганс Беккер, изучая реакции, происходящие при облучении бериллия  $\alpha$ -частицами, обнаружили новое излучение, обладающее очень большой проникающей способностью, первоначально названное бериллиевыми лучами. В 1932 г. английский физик Джеймс Чедвик провел эксперименты по изучению свойств этого излучения и установил, что бериллиевые лучи состоят из электрически нейтральных частиц с массой, сравнимой с массой протона. Эти частицы он назвал *нейтронами* (от англ. neutral — нейтральный).

**Нейтрон** — еще одна частица наряду с электроном, протоном и фотоном. Эта частица обозначается латинской буквой  $n$ . Нейтрон имеет массу  $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$  кг, почти совпадающую с массой протона, электрически нейтрален и поэтому не участвует в электростатических взаимодействиях с атомными ядрами и электронами. Вследствие этого нейтрон движется в веществе прямолинейно до тех пор,

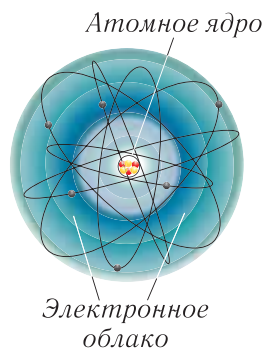


Рис. 145. Строение атома

пока не столкнется с каким-либо атомным ядром. При столкновениях с тяжелыми атомами нейтрон почти не теряет энергию, как упругий мячик, отскакивающий от стены. При столкновении же с легкими атомами (водород, бериллий, углерод) нейтрон передает им часть своей энергии и начинает двигаться медленнее. Вещества, содержащие легкие атомы, называют *замедлителями нейтронов*. Наиболее эффективными замедлителями нейтронов являются вещества, содержащие водород (например, вода), вследствие того, что масса атома водорода близка к массе нейтрона. Со временем кинетическая энергия нейтрона становится такой же, как кинетическая энергия теплового движения частиц окружающей среды. Такие относительно медленно движущиеся нейтроны называются **тепловыми**.

Нейтроны устойчивы только в составе стабильных ядер. В свободном состоянии, т. е. находящийся вне ядра, нейтрон является нестабильной частицей. Его время жизни  $\tau \approx 886$  с.



Дж. Чедвик за открытие нейтрона получил Нобелевскую премию по физике в 1935 г.

После открытия нейтронов в 1932 г. советский физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко и немецкий физик Вернер Гейзенберг предложили **протонно-нейтронную модель** строения ядра. Согласно этой модели ядро состоит из частиц двух типов — протонов и нейтронов (рис. 146).

В соответствии с современными физическими представлениями протон и нейтрон являются двумя разными зарядовыми состояниями одной и той же частицы — **нуклона** (от лат. nucleus — ядро). В состоянии без электрического заряда ( $q=0$ ) нуклон является нейтроном, а в состоянии с положительным электрическим зарядом ( $q=e$ ) — протоном.

Число протонов в ядре называется **зарядовым числом** и обозначается буквой  $Z$ . Зарядовое число совпадает с *порядковым номером* химического элемента в периодической системе элементов Менделеева. Общее число нуклонов называется **массовым числом** и обозначается буквой  $A$ . Протон и нейтрон имеют массовое число  $A=1$ , а электрон —  $A=0$ . Число нейтронов в ядре равно  $N=A-Z$ .

Для характеристики ядра достаточно знать зарядовое  $Z$  и массовое  $A$  числа. Для обозначения атомного ядра применяется такой же символ, как для соответ-

ствующего химического элемента. Внизу символа ставится зарядовое число ядра  $Z$ , а сверху — массовое число  $A$ . Например, запись  $^{12}_6\text{C}$  обозначает ядро углерода, содержащего 12 нуклонов, 6 из которых протоны, а 6 других — нейтроны.

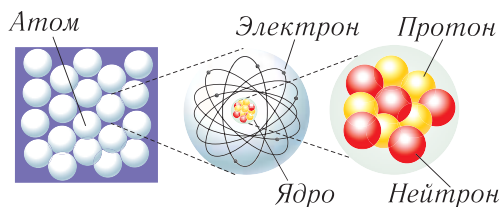


Рис. 146. Строение ядра



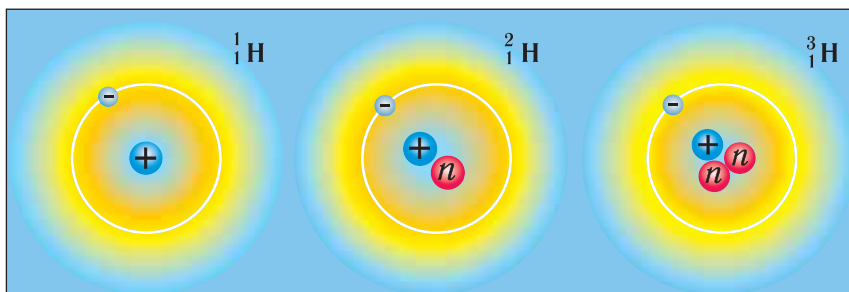


Рис. 147. Изотопы водорода

Атом с определенными значениями зарядового числа  $Z$  и массового числа  $A$  называется **нуклидом**.

В ядрах одного химического элемента всегда содержится одно и то же количество протонов, а число нейтронов может быть различным. Например, в ядрах углерода число протонов всегда 6, а число нейтронов может быть 5, 6, 7, 8, 9 или 10.

Атомы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются **изотопами** (от греч. *ἴδιος* (изос) — одинаковый и *τόπος* (топос) — место) данного химического элемента. Например, хорошо известны изотопы водорода — дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  и тритий  ${}^3_1\text{H}$ , которые содержат, соответственно, один и два нейтрона в ядре (рис. 147).

Массы некоторых нуклидов приведены в таблице 10.

Таблица 10. Массы нуклидов некоторых химических элементов

Элемент	Изотоп	Масса ядра, а. е. м.	Элемент	Изотоп	Масса ядра, а. е. м.
Водород	${}^1_1\text{H}$	1,00783	Углерод	${}^{11}_6\text{C}$	11,01143
Водород	${}^2_1\text{H}$	2,01410	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
Водород	${}^3_1\text{H}$	3,01605	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
Гелий	${}^4_2\text{He}$	4,00260	Кислород	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491
Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,01513	Фтор	${}^{19}_9\text{F}$	18,99840
Литий	${}^7_3\text{Li}$	7,01601	Алюминий	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98146

Окончание табл.

Элемент	Изотоп	Масса ядра, а. е. м.	Элемент	Изотоп	Масса ядра, а. е. м.
Бериллий	${}^8_4\text{Be}$	8,00531	Кремний	${}^{28}_{14}\text{Si}$	27,98154
Бериллий	${}^9_4\text{Be}$	9,01218	Уран	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,04393
Бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,01294	Уран	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,05079
Бор	${}^{11}_5\text{B}$	11,00931	Плутоний	${}^{239}_{94}\text{Pu}$	239,05216

Химические свойства элементов определяются не атомной массой, а зарядовым числом ядра, т. е. числом электронов в электрически нейтральном атоме элемента и их распределением по энергетическим уровням. Действительно, атомные массы изотопов различаются, а их химические свойства одинаковы. Например, нуклиды водорода  ${}^3_1\text{H}$  и гелия  ${}^3_2\text{He}$  имеют близкие по величине атомные массы, но принципиально разные химические свойства.



В биологии изотопы применяются для изучения фотосинтеза, для исследования использования растениями фосфора, азота, калия и микроэлементов, а также процессов обмена веществ и биосинтеза; в медицине — при диагностике заболеваний, для радиоиммунного анализа и томографии; в экологии — для исследования переноса, накопления и распада различных загрязнителей в воздухе, воде и почве.

В рамках протонно-нейтронной модели ядра возникает вопрос о его устойчивости. Действительно, между протонами, находящимися в ядре, действуют силы электростатического отталкивания огромной величины. Если считать расстояние между протонами  $r \sim 10^{-15}$  м, то модуль силы отталкивания  $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \approx 230$  Н, что является очень большой силой для частицы массой порядка  $10^{-27}$  кг.

Чем же объясняется устойчивость ядра, если внутри его действуют такие огромные силы кулоновского отталкивания между протонами?

Причина устойчивости ядра кроется в существовании, кроме сил электростатического отталкивания между протонами (нуклонами), *ядерных сил притяжения* между нуклонами. Ядерные силы отличаются по своей природе как от сил электромагнитных, так и сил гравитационных. Они обусловлены неизвестным ранее видом взаимодействия между нуклонами, который называют **сильным взаимодействием**.

Для характеристики сильных взаимодействий вводится квантовое число — *барионный заряд*, обозначаемый латинской буквой  $B$ . Барионный заряд — одна из внутренних характеристик элементарных частиц. Необходимость введения барионного заряда обусловлена тем, что до сих пор не обнаружено ни одного явления, в котором не выполняется *закон сохранения барионного заряда*. Этот заряд отличен от нуля для барионов и равен нулю для всех остальных частиц. Барионный заряд представляет собой безразмерное целое число. У всех барионов  $B = \pm 1$ . Барионный заряд системы частиц равен алгебраической сумме зарядов составляющих его частиц. В частности, барионный заряд атомных ядер равен их массовому числу. Нуклоны относят к классу барионов, и их барионный заряд  $B = 1$ . У частиц, не являющихся барионами (например, электрон, фотон),  $B = 0$ .

**Ядерные силы** обладают рядом отличительных свойств:

- 1) являются силами притяжения;
- 2) на расстояниях порядка размера ядра примерно в 100 раз превосходят по величине кулоновские силы отталкивания в ядре;
- 3) проявляются только на расстояниях между частицами порядка размера ядра  $10^{-15}$  м, т. е. являются короткодействующими силами; на расстояниях, больших  $(2-7) \cdot 10^{-15}$  м, они не проявляются;
- 4) не зависят от электрического заряда взаимодействующих нуклонов (ядерные силы между двумя протонами, нейтронами или протоном и нейтроном одинаковы); это свойство называется *зарядовой независимостью*;
- 5) обладают свойством насыщения; это означает, что находящиеся внутри ядра нуклоны могут взаимодействовать только со своими ближайшими соседями;
- 6) не являются центральными, т. е. они не направлены по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Многочисленные эксперименты показали, что ядра имеют примерно сферическую форму, а объем ядра пропорционален массовому числу  $A$ . Согласно экспериментальным данным, радиус ядра возрастает в зависимости от массового числа в соответствии с формулой:

$$r \approx (1,3 \cdot 10^{-15}) \cdot A^{\frac{1}{3}} \text{ м.}$$

Так как размеры протона и нейтрона примерно одинаковы (будем считать их жесткими шариками массой  $m_1 = 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг), то объем ядра будет пропорционален массовому числу  $A$  ядра. Поскольку объем шара  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ , то плотность ядерного вещества оценим как

$$\rho = \frac{m_{\text{я}}}{V_{\text{я}}} = \frac{m_1 A}{\frac{4}{3}\pi r^3 A} = \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м})^3} = 1,8 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Следовательно, все ядра имеют плотность порядка  $10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а один кубический сантиметр ядерного вещества имеет массу 180 млн т.



Если бы можно было изготовить спичечную головку из ядерного вещества объемом несколько кубических миллиметров, то она имела бы массу около миллиона тонн. Это соответствует массе воды в кубическом резервуаре со стороной 100 м.

Для удобства вычислений массы в ядерной физике выражают в **атомных единицах массы** (а. е. м.), а энергии — в **электронвольтах** (эВ). Используя формулу Эйнштейна для энергии покоя  $E = mc^2$ , можно выразить массу и в единицах энергии — электронвольтах:  $m = \frac{E}{c^2}$ . Например, в атомных единицах массы масса электрона  $m_e = 0,00054858$  а. е. м., масса протона  $m_p = 1,007276$  а. е. м., масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  а. е. м., а в энергетических единицах —  $m_e = 0,511$  МэВ,  $m_p = 938,3$  МэВ,  $m_n = 939,6$  МэВ ( $1 \text{ МэВ} = 1 \cdot 10^6 \text{ В}$ ).

Связь между различными единицами массы определяется следующими соотношениями:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{c^2};$$

$$1,0 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Энергия связи электрона с ядром атома водорода в основном состоянии равна 13,6 эВ. Это означает, что для ионизации атома водорода требуется совершить работу, равную 13,6 эВ.

А какая энергия необходима для разрушения ядра?

Для удаления нуклона (протона или нейтрона) из ядра необходимо совершить работу против ядерных сил притяжения между нуклонами. Вследствие этого энергия системы «удаленный нуклон — оставшееся ядро» возрастет на величину, равную работе внешних сил.

В соответствии с формулой Эйнштейна в виде  $E = \Delta mc^2$  найдем минимальную энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны, которая называется **энергией связи ядра**:

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2. \quad (1)$$

Если массу выражать в атомных единицах массы, а энергию связи в электронвольтах, то выражение (1) можно записать в виде:

$$E_{\text{св}} = 931,5(Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}) \text{ (МэВ)}.$$

Обратите внимание на тот факт, что обычно в таблицах приводятся *массы атомов*, а не массы ядер. Поскольку при таком подходе учитываются и массы электронов, то для вычисления энергии связи ядра в этом случае пользуются формулой:

$$E_{\text{св}} = (Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m)c^2, \quad (2)$$

где  $m_{\text{H}} = m_p + m_e$  — масса атома водорода, а  $m = m_{\text{я}} + Zm_e$  — масса атома.

Для того чтобы получить формулу (2), в соотношении (1) необходимо прибавить и вычесть  $Zm_e$  и пренебречь энергией связи электронов в атоме, тогда:

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

Отметим, что так как  $m_{\text{H}}$  больше массы протона  $m_p$  на величину массы электрона  $m_e$ , то первое слагаемое включает в себя массу  $Z$  электронов. Но поскольку масса  $m$  атома отличается от массы ядра на массу  $Zm_e$  электронов, то вычисления по формулам (1) и (2) приводят к одинаковым результатам.

Эксперименты показывают, что в связи с устойчивостью ядер для расщепления ядра на отдельные частицы необходимо совершить внешнюю работу, равную энергии связи  $E_{\text{св}}$  данного ядра. При таком процессе энергия поглощается, поскольку энергия системы увеличивается. Соответственно, при образовании ядра (обратный процесс) такое же количество энергии выделяется. Однако согласно формуле Эйнштейна в виде  $E = \Delta mc^2$  изменение энергии связано с изменением массы. Следовательно, *масса ядра должна быть меньше суммы масс отдельных нуклонов, образующих его, на величину*

$$\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}.$$

Таким образом, массы всех ядер (за исключением ядра водорода) меньше, чем сумма масс образующих их протонов и нейтронов в свободном состоянии. Величина этой разности масс характеризует степень связанности нуклонов в данном ядре. Ее называют *дефектом (недостатком) масс*.

**Дефект масс** — это разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

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

Рассчитаем энергию связи нуклонов в ядре. Предположим, что ядро состоит из 4 протонов и 4 нейтронов (ядро бериллия  ${}^8_4\text{Be}$ ). Масса протона  $m_p = 938,28$  МэВ, нейтрона —  $m_n = 939,57$  МэВ. Суммарная масса всех частиц составляет  $E_0 = 7511,4$  МэВ. Масса ядра  ${}^8_4\text{Be}$  —  $E_0 = 7454,7$  МэВ. Отсюда дефект масс  $\Delta m = 56,7$  МэВ. Это и будет согласно определению *энергия связи* ядра берил-

лия. Эта энергия распределена между всеми 8 нуклонами ядра бериллия. Следовательно, на каждый нуклон приходится примерно 7 МэВ, что подтверждается экспериментальными данными.

Более удобной характеристикой прочности (связанности) ядер является **удельная энергия связи  $\epsilon$  ядра**, т. е. *энергия связи, приходящаяся на один нуклон*. Она равна отношению энергии связи к массовому числу:  $\epsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$ . Соответственно, чем больше значение  $\epsilon$ , тем сильнее связан каждый нуклон в ядре, следовательно, тем прочнее ядро. График зависимости удельной энергии связи от массовых чисел ядер  $\epsilon(A)$  приведен на рисунке 148.

Из графика видно, что кривая имеет пологий максимум в средней части. При этом  $\epsilon(A)$  быстро возрастает при малых значениях от  $\epsilon = 1$  МэВ при  $A = 1$  до  $\epsilon = 8$  МэВ при  $A = 16$ . Максимум удельной энергии связи ядра  $\epsilon_{\text{max}} = 8,8$  МэВ достигается при  $A = 60$ . Затем удельная энергия связи ядра постепенно уменьшается до значения  $\epsilon = 7,6$  МэВ для урана. Поэтому наиболее прочны ядра со средними значениями массовых чисел (15—60).

Таким образом, при смещении ядер к центральной части графика удельная энергия связи увеличивается, следовательно, любые ядерные реакции, приводящие к такому смещению, являются энергетически выгодными (сопровождаются

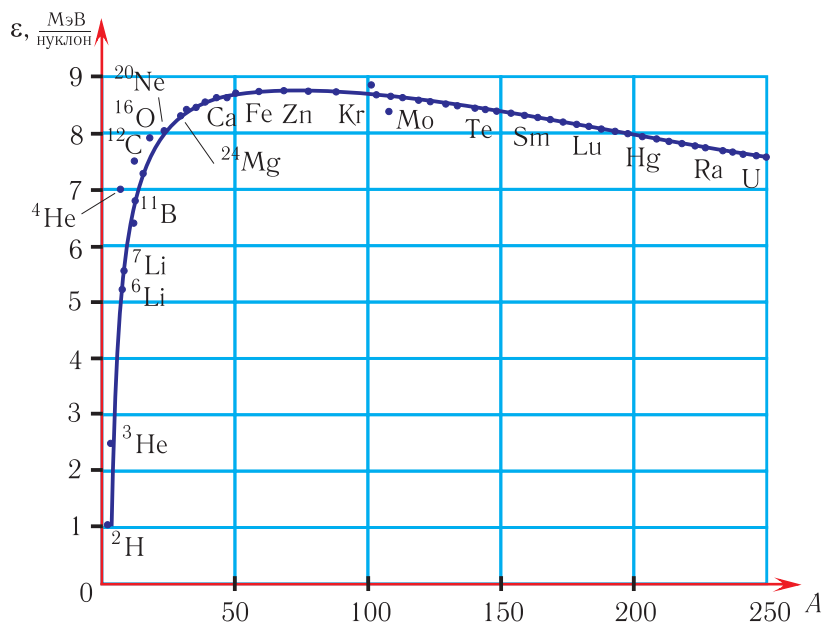


Рис. 148. Удельная энергия связи ядер

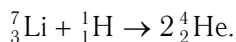
выделением энергии). Из рисунка 148 следует, что подобное смещение возможно при реакциях синтеза (объединения) легких ядер в области изменения  $A$  примерно  $0 \rightarrow 50$  и при реакциях деления тяжелых ядер в области изменения  $A$  примерно  $250 \rightarrow 50$ . При этом реакции синтеза должны идти мощнее, поскольку подъем графика происходит круче, чем последующее уменьшение удельной энергии связи.



1. В чем сущность протонно-нейтронной модели атомного ядра?
2. Что определяет атомный номер химического элемента в периодической системе элементов Менделеева?
3. Что определяет массовое число атомного ядра?
4. Как в ядерной физике обозначается любой химический элемент?
5. Какие нуклиды обозначены символом  $X$ : а)  ${}^{18}_7X$ ; б)  ${}^{82}_{38}X$ ; в)  ${}^{247}_{97}X$ ?
6. Чему равны заряд и масса протона?
7. Что называют изотопами химического элемента?
8. Что общего у различных изотопов одного и того же химического элемента? Чем они различаются?
9. Все ли химические элементы имеют изотопы?
10. Как называется число нуклонов в ядре?
11. Почему атомная масса химических элементов не выражается целым числом?

### Пример решения задачи

Вычислите энергию, выделяющуюся при ядерной реакции:



Решение

Массы частиц (в атомных единицах массы), вступивших в реакцию, и после нее:  ${}^7_3\text{Li} — 7,01601$  а. е. м.,  ${}^1_1\text{H} — 1,00783$  а. е. м.,  ${}^4_2\text{He} — 4,00260$  а. е. м.

Масса частиц, вступивших в реакцию:

$$m_1 = 7,01601 \text{ а. е. м.} + 1,00783 \text{ а. е. м.} = 8,02384 \text{ а. е. м.}$$

Масса частиц после реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00260 \text{ а. е. м.} = 8,00520 \text{ а. е. м.}$$

Дефект масс:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 0,01864 \text{ а. е. м.}$$

Энергия, выделяющаяся в результате реакции:

$$\Delta E = \Delta m c^2;$$

$$\Delta E = 0,01864 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Ответ:  $\Delta E = 2,8 \cdot 10^{-12}$  Дж.

### Упражнение 22

1. Вычислите удельную энергию связи  $\varepsilon_{\text{св}}$  для ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ .
2. Вычислите полную  $E$  и удельную  $\varepsilon_{\text{св}}$  энергии связи для ядра лития  ${}^6_3\text{Li}$ .
3. Пользуясь графиком для удельной энергии, оцените энергию связи ядер с массовыми числами 20, 100, 200.

## § 36. Ядерные реакции. Законы сохранения в ядерных реакциях. Энергетический выход ядерных реакций

**Ядерными реакциями** называются превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействиями с какими-либо частицами или друг с другом. Для осуществления ядерных реакций необходимо сближение частиц на расстояние действия ядерных сил.

В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения энергии, импульса, заряда, массы. Так как все ядра и заряженные частицы, участвующие в реакциях, имеют электрический заряд, кратный или равный элементарному, то как следствие закона сохранения электрического заряда говорят о законе сохранения зарядового числа. Закон сохранения массовых чисел следует из закона сохранения барионного заряда.

Сумма зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, получающихся в результате реакции.

Действие законов сохранения ограничивает возможные варианты ядерных реакций и позволяет предсказать возможные пути (механизмы) ядерных превращений.

Символически ядерные реакции записываются в следующем виде:



Здесь  $A$  — исходное ядро,  $a$  — бомбардирующая частица,  $B$  — конечное ядро,  $b$  — испускаемая частица. Для протонов и нейтронов в ядерной физике приняты следующие символические обозначения:  ${}^1_1p$  и  ${}^1_0n$ . Для осуществления ядерной реакции под действием положительно заряженной частицы необходимо, чтобы частица обладала кинетической энергией, достаточной для преодоления сил кулоновского отталкивания. Нейтроны, в отличие от заряженных частиц, не обладают электрическим зарядом и поэтому могут проникать в атомные ядра при сколь угодно малой кинетической энергии. Это позволяет использовать их особенно эффективно.



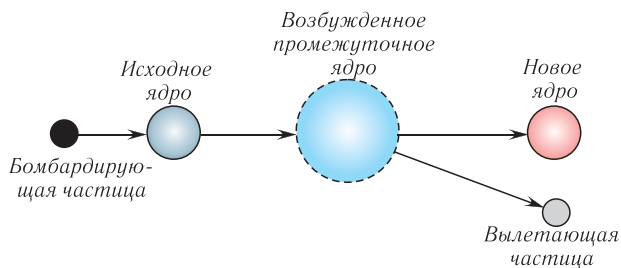


Рис. 149. Ядерная реакция с переходом ядра в возбужденное состояние

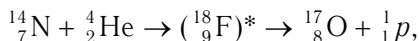
В большинстве ядерных реакций, которые называют *прямыми ядерными взаимодействиями*, участвуют два ядра и две частицы; первая пара «ядро — частица» называется *исходной*, а вторая — *конечной*. В таких реакциях энергия, вносимая в ядро, передается преимущественно одному или небольшой группе нуклонов. Время протекания прямой ядерной реакции определяется временем пролета  $\tau \approx 10^{-22}$  с частицы через область пространства, занимаемого ядром. Такой механизм реакции является основным при больших энергиях бомбардирующих частиц.

При малых энергиях бомбардирующих частиц наряду с прямыми ядерными реакциями в соответствии с представлениями, развитыми впервые Н. Бором, осуществляются также реакции, происходящие в два этапа, с образованием *составного ядра* (рис. 149):



На первом этапе ядро поглощает (захватывает) частицу и образуется составное ядро в возбужденном состоянии. Энергия поглощенной частицы распределяется между всеми нуклонами составного ядра, причем энергия, приходящаяся на каждый нуклон, меньше удельной энергии связи. На втором этапе вследствие обмена энергией между нуклонами на одном или нескольких из них может сконцентрироваться энергия, достаточная для преодоления ядерных сил и вылета из составного ядра. В результате составное ядро превращается в конечное и вылетающую частицу или  $\gamma$ -квант и освобождается от избытка энергии. Промежуток времени от поглощения частицы исходным ядром до испускания частицы (время жизни ядра в возбужденном состоянии) составляет величину порядка  $10^{-15}$ — $10^{-16}$  с, т. е. намного больше времени пролета частицы через область пространства, занимаемого ядром.

Исторически первой ядерной реакцией под действием  $\alpha$ -частиц считается реакция, в результате которой в 1919 г. Э. Резерфордом был открыт протон:



где \* означает составное ядро в возбужденном состоянии.

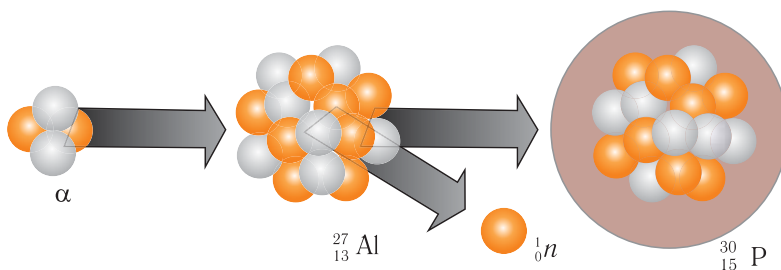
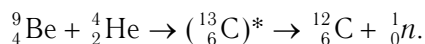
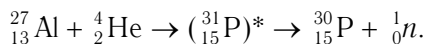


Рис. 150. Превращение алюминия в радиоактивный изотоп фосфора

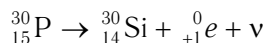
Нейтрон был открыт Дж. Чедвиком в 1932 г. в реакции радиоактивного превращения ядер бериллия в изотоп углерода при бомбардировке  $\alpha$ -частицами:



Как одну из самых известных ядерных реакций отметим еще первое искусственное получение Фредериком и Ирен Жолио-Кюри в 1934 г. радиоактивного изотопа фосфора в ходе ядерной реакции (рис. 150):



Далее изотоп  $^{30}_{15}\text{P}$  превращается в изотоп  $^{30}_{14}\text{Si}$ :



с испусканием позитрона  $^0_{+1}e$  (рис. 151). Эта частица имеет все свойства (массу, спин, заряд) электрона, но отличается знаком заряда.

Ядерные реакции бывают двух типов: *эндотермические* (с поглощением энергии) и *экзотермические* (с выделением энергии).

Если сумма масс исходного ядра и частиц, вступающих в реакцию, больше суммы масс конечного ядра и испускаемых частиц, то энергия выделяется, и наоборот.

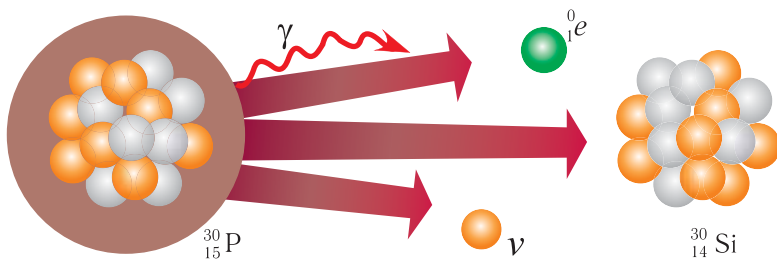


Рис. 151. Распад радиоактивного изотопа фосфора с образованием кремния и испусканием позитрона

Рассчитаем энергетический выход некоторой ядерной реакции  $A + a \rightarrow B + b$ . Если сумма масс частиц до реакции  $m_A + m_a$ , а после реакции —  $m_B + m_b$ , то разность энергий конечного и исходного состояний частиц:

$$\Delta E = (m_B + m_b) c^2 - (m_A + m_a) c^2 = (m_B + m_b - m_A - m_a) c^2.$$

Если  $\Delta E < 0$ , то при данной реакции энергия выделяется, а если  $\Delta E > 0$ , то поглощается. Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется **энергетическим выходом** ядерной реакции. Подчеркнем, что энергетический выход различных ядерных реакций может достигать сотен мегаэлектронвольт, что в миллионы раз превышает энергетический выход при химических реакциях.

Таким образом, ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

- 1) по роду участвующих в них частиц (нейтронов, заряженных частиц, излучений);
- 2) по энергии вызывающих их частиц (малых энергиях (порядка эВ), средних энергиях (МэВ), высоких энергиях (100—1000 МэВ));
- 3) по роду участвующих в них ядер (легких, средних, тяжелых);
- 4) по характеру происходящих ядерных превращений (с испусканием нейтронов, заряженных частиц, излучения).



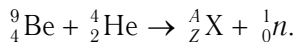
1. Что называют ядерными реакциями?
2. Когда и кем были открыты протон и нейтрон?
3. Объясните реакции прямых ядерных взаимодействий и реакции, происходящие в два этапа с образованием составного ядра, и запишите их в символической записи.
4. В чем основное отличие ядерных реакций на заряженных частицах от ядерных реакций на нейтронах?
5. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?
6. В каких случаях реакция идет с поглощением энергии, а в каких — с выделением?
7. По каким признакам производится классификация ядерных реакций?

### Пример решения задачи

Напишите ядерную реакцию, происходящую при бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами и сопровождающуюся испусканием нейтронов.

#### Решение

Для записи ядерных реакций необходимо знать законы сохранения массового и зарядового чисел:



Сумма массовых чисел вступивших в реакцию частиц равна сумме массовых чисел образовавшихся частиц:

$$9 + 4 = A + 1.$$

Отсюда  $A = 12$ .

Сумма зарядовых чисел частиц, вступивших в реакцию, равна сумме зарядовых чисел образовавшихся частиц:

$$4 + 2 = Z + 0.$$

Отсюда  $Z = 6$ .

Из периодической системы химических элементов Менделеева находим, что искомым элементом является углерод  $^{12}_6\text{C}$ .

Ответ:  $^{12}_6\text{C}$ .

### Упражнение 23

1. Напишите ядерную реакцию, происходящую при бомбардировке ядер нуклида бора  $^{11}_5\text{B}$   $\alpha$ -частицами и сопровождающуюся испусканием нейтронов.

2. Ядро тория  $^{230}_{90}\text{Th}$  превратилось в ядро радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$ . Какую частицу испустило ядро тория?

3. При облучении ядер изотопа фтора  $^{19}_9\text{F}$  протонами образуются ядра нуклида кислорода  $^{16}_8\text{O}$ . Сколько энергии  $\Delta E$  выделяется или поглощается в этой реакции?

4. При облучении ядер нуклида марганца  $^{54}_{25}\text{Mn}$  некоторыми частицами образуются ядра нуклида железа  $^{55}_{26}\text{Fe}$  и нейтроны — по одному на каждый акт превращения. Какие частицы вызывают данную реакцию? Напишите уравнение реакции.

5. Покажите, что самопроизвольный распад  $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_1\text{p}$  невозможен, так как в этом случае нарушался бы закон сохранения энергии.

6. Покажите, что ядро нуклида бериллия  $^8_4\text{Be}$  ( $m_{\text{Be}} = 8,005308$  а. е. м.) нестабильно и может распасться на две  $\alpha$ -частицы.

7. Стабильно ли ядро нуклида углерода  $^{12}_6\text{C}$  относительно распада на три  $\alpha$ -частицы? Ответ обоснуйте.

8. При бомбардировке нуклида алюминия  $^{27}_{13}\text{Al}$   $\alpha$ -частицами получается радиоактивный нуклид фосфора  $^{30}_{15}\text{P}$ , ядро которого затем распадается с выделением позитрона ( $^0_{+1}e$ ). Напишите уравнения обеих реакций.

9. При бомбардировке ядер железа  $^{56}_{26}\text{Fe}$  нейтронами образуется  $\beta^-$ -радиоактивный нуклид марганца с массовым числом  $A = 56$ . Напишите реакцию получения искусственного марганца и реакцию происходящего  $\beta^-$ -распада.

10. При бомбардировке ядер нуклида азота  $^{14}_7\text{N}$  нейтронами получают ядра нуклида углерода  $^{14}_6\text{C}$ , которые оказываются  $\beta^-$ -радиоактивными. Напишите уравнения обеих реакций.

## § 37. Радиоактивность

Историю ядерной физики принято отсчитывать с 1896 г. Именно в этом году французский физик Антуан Анри Беккерель обнаружил, что соли урана обладают способностью засвечивать фотопластинку, испуская самопроизвольно какое-то излучение. Это новое явление получило название *радиоактивности* (от лат. radio — испускаю лучи, action — действенный).

**Радиоактивность** — явление самопроизвольного превращения ядер, сопровождающееся испусканием частиц или ядер или коротковолновым электромагнитным излучением.

В 1898 г. Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри открыли новые радиоактивные химические элементы — радий  $^{226}_{88}\text{Ra}$  и полоний  $^{210}_{84}\text{Po}$ . Вскоре были открыты и другие радиоактивные элементы. В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди обнаружили, что явление радиоактивности сопровождается превращением одного химического элемента в другой с выделением энергии, которая уносится излучением.



Радий по-латыни означает «испускающий лучи», а полоний назвали в память о родине Марии Склодовской-Кюри — Польше.

В 1898 г. Э. Резерфорд обнаружил, что по проникающей способности излучения можно разделить на три различных вида. Излучение одного вида ( $\alpha$ -частицы) не проходило даже сквозь лист бумаги, второго ( $\beta$ -частицы) — не проникало уже через алюминиевую пластинку толщиной более 3 мм, а третьего ( $\gamma$ -частицы) — проходило даже сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров (рис. 152).

Эти три вида излучения были названы согласно первым трем буквам греческого алфавита:  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением. Впоследствии было обнаружено, что все

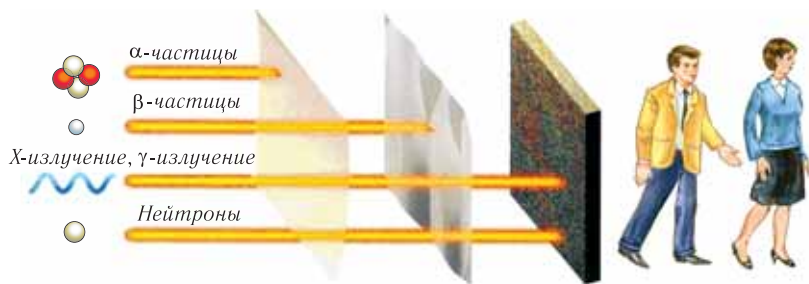


Рис. 152. Проникающая способность различных видов радиоактивных излучений

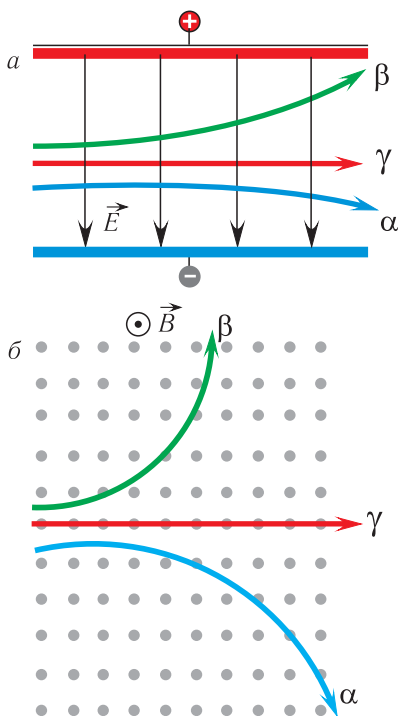
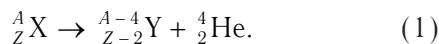


Рис. 153. Поведение радиоактивных излучений в электрическом (а) и магнитном (б) полях

эти виды излучения представляют собой известные частицы:  $\alpha$ -излучение — это ядра атомов гелия  ${}^4_2\text{He}$  (также обозначается  ${}^4_2\alpha$ ),  $\beta^-$ -излучение — электроны,  $\gamma$ -излучение — фотоны очень большой энергии. Радиоактивные излучения по-разному ведут себя в электрических и магнитных полях (рис. 153).

При  $\alpha$ -распаде начального (так называемого материнского) ядра  ${}^A_Z\text{X}$  продуктом распада оказывается изотоп Y с числом протонов  $Z - 2$  и массовым числом  $A - 4$ :



Особенности  $\alpha$ -распада:

1) наблюдается для природных ядер с  $Z > 83$ , а нестабильные изотопы и при  $Z < 83$ , так как энергетически выгодно становится испускание  $\alpha$ -частиц;

2) энергия  $\alpha$ -частиц, вылетающих из различных ядер, находится в основном в пределах 4—9 МэВ;

3) вылетающие  $\alpha$ -частицы имеют дискретный спектр значений энергии (при распаде данного ядра испускается  $\alpha$ -частица с определенной энергией).

Примером  $\alpha$ -распада является реакция  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ , в ходе которой получается радиоактивный радон (рис. 154).

При  $\beta^-$ -распаде ядра  ${}^A_Z\text{X}$  образуется нуклид с атомным номером  $Z + 1$  и таким же массовым числом, как у материнского ядра, и испускается электрон. Для

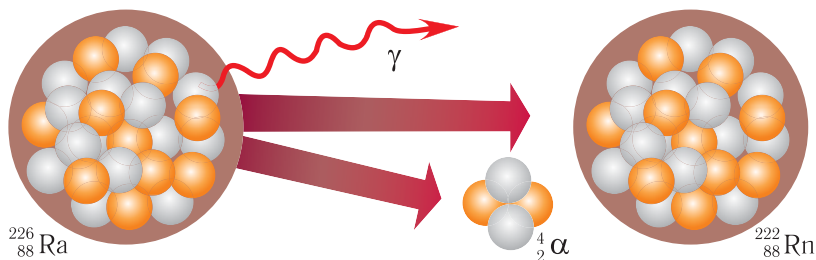


Рис. 154. Реакция  $\alpha$ -распада радия

электронов в ядерной физике принято обозначение  ${}_{-1}^0e$ . С учетом этого реакцию  $\beta^-$ -распада можно записать следующим образом:



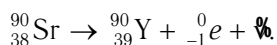
где  $\nu$  — неизвестная в то время частица, зарядовое и массовое числа которой равны нулю.

Поскольку в ядерных превращениях элементы «смещаются» по таблице Менделеева, то закономерности ядерных превращений (1) и (2), установленные в 1913 г. английским ученым Фредериком Содди и польским ученым Казимежем Фаянсом, называются *правилами смещения (сдвига)*.

Особенности  $\beta^-$ -распада:

- 1) наблюдается при радиоактивном распаде ядер с любыми значениями массовых чисел;
- 2) вылетающие электроны имеют непрерывный спектр значений энергии от 0 до  $E_{\max}$ .

Пример  $\beta^-$ -распада — излучение электрона нуклидом стронция:



При  $\beta^-$ -распаде ядра, состоящего из нейтронов и протонов, испускаются электроны. Возникает закономерный вопрос: откуда они берутся? И что это за частица  $\bar{\nu}$ ?

Согласно квантовой теории  $\beta$ -распада, разработанной в 1934 г. итальянским физиком Энрико Ферми, в момент распада ядра внутри него происходит превращение одного из нейтронов в протон, сопровождающееся в соответствии с законами сохранения электрического заряда и энергии возникновением еще двух частиц — электрона и частицы, зарядовое и массовое числа которой равны нулю. Эту частицу, по предложению Ферми, назвали *нейтрино*, что в переводе с итальянского означает «нейтрончик». Нейтрино обозначается греческой буквой  $\nu$ . Именно испускание нейтрино вместе с электроном приводит к тому, что электрон при  $\beta^-$ -распаде может иметь любую энергию от 0 до  $E_{\max}$ .



Существование нейтрино было предсказано В. Паули на основании закона сохранения энергии в 1931 г. Экспериментально нейтрино было зарегистрировано в 1956 г. в лаборатории Лос-Аламос (США) американскими физиками Ф. Райнесом и К. Коуном.

Свойства нейтрино оказались удивительными. Из-за отсутствия электрического заряда и очень малой массы нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом, и поэтому оно было экспериментально обнаружено только в 1952—1956 гг.

Фактически в любом веществе нейтрино ведет себя так, как будто вещества нет. Например, в свинце средняя длина пробега между взаимодействиями (проникающая способность) составляет величину порядка  $10^{18}$  м. Поэтому нейтрино свободно пронизывает космическое пространство, пролетая сквозь Землю, Солнце и другие небесные тела.



О фантастической проникающей способности нейтрино можно судить по такому примеру. Если бы железная плита имела толщину, равную расстоянию от Земли до Солнца, то она задержала бы лишь одно из ста миллионов нейтрино, образующихся в ядерных реакторах.

Реакция распада нейтрона имеет вид:



где  $\bar{\nu}$  обозначено *антинейтрино*.

Эта реакция схематично изображена на рисунке 155.

Ученым при исследовании особенностей  $\beta^-$ -распада, а также свойств нейтрино (антинейтрино) впервые пришлось иметь дело с еще одним видом фундаментального взаимодействия — *слабым взаимодействием*. Оно проявляется при взаимопревращениях элементарных частиц. Для характеристики слабых взаимодействий вводится квантовое число — *лептонный заряд*, обозначаемый латинской буквой  $L$ . Необходимость введения лептонного заряда обусловлена тем, что до сих пор не обнаружено ни одного явления, в котором не выполняется *закон сохранения лептонного заряда*. Лептонный заряд так же, как и барионный, представляет собой безразмерное целое число. У всех лептонов  $L = \pm 1$ , а у частиц, не являющихся лептонами (например, нуклоны),  $L = 0$ . Нейтрино так же, как и электрон, относят к классу *лептонов*.

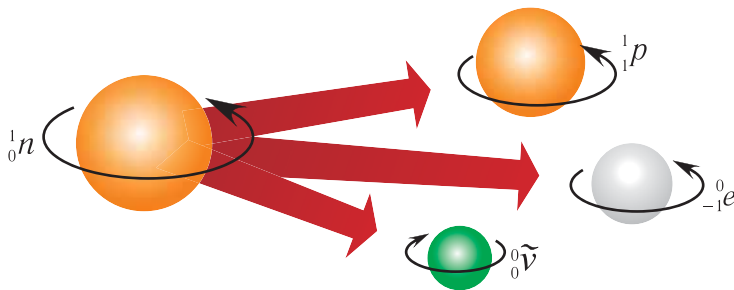


Рис. 155. Реакция распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрино



Из закона сохранения лептонного заряда для реакции (3) следует:

$$0 = 0 + 1 + L.$$

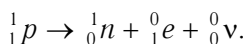
Откуда находим:

$$L = -1.$$

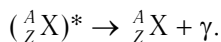
Таким образом, лептонный заряд нейтрино в данной реакции отрицателен. Следовательно, в момент  $\beta^-$ -распада ядра рождается не нейтрино, а антинейтрино (см. рис. 155).

В современной физике каждой частице соответствует своя *античастица*. Отличие между ними состоит в том, что у античастиц все заряды (электрический, барионный, лептонный) имеют противоположный по отношению к частице знак, в то время как массы частиц и соответствующих им античастиц строго одинаковы.

Отметим, что свободный протон, в отличие от нейтрона, стабилен. Однако в ядре становится возможным  $\beta^+$ -превращение протона в нейтрон с испусканием *позитрона* и *нейтрино*:



Испускание  $\gamma$ -излучения, в отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов ядер, не приводит к превращениям элементов:



Свойства  $\gamma$ -излучения:

- 1) коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda \approx 10^{-10}$ — $10^{-13}$  м;
- 2) не имеет электрического заряда;
- 3) спектр  $\gamma$ -излучения непрерывный; энергия излучения находится в пределах от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

Обычно  $\gamma$ -излучение сопровождает радиоактивные превращения ядер при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах. Полученные при ядерных реакциях конечные ядра (их называют дочерними) оказываются в возбужденных состояниях и переходят затем в основные состояния, испуская кванты  $\gamma$ -излучения.

Все радиоактивные распады происходят с выделением энергии, т. е. являются экзотермичными, так как масса радиоактивного ядра превышает суммарную массу ядер продуктов распада.

Неустойчивыми являются как ядра, у которых протонов намного больше, чем нейтронов, так и ядра, у которых число нейтронов намного больше числа протонов.

Многие нестабильные изотопы встречаются в природе. Их радиоактивность называется **естественной радиоактивностью**. Стабильных изотопов известно около 270, искусственных изотопов, получаемых на ускорителях и реакторах, — около 3000. Их радиоактивность называется **искусственной радиоактивностью**.

Основной способ получения радиоактивных изотопов — бомбардировка стабильных изотопов частицами высокой энергии. Для этой цели используют пучки протонов или электронов, разгоняемых в ускорителях, или нейтроны, получаемые в атомных реакторах.



Гамма-излучение находит широкое применение в медицине как в диагностических целях, так и для лечения. При диагностике заболеваний используют радиоактивный йод ( $E_\gamma \approx 0,3$  МэВ). Для лечения злокачественных опухолей применяют  $\gamma$ -излучение с энергией  $E_\gamma = 1,3$  МэВ. Гамма-излучение естественного радиоактивного изотопа калия  $^{40}_{19}\text{K}$  служит для определения радиоактивности человеческого тела.

В 1903 г. А. Беккерель получил Нобелевскую премию по физике в «знак признания выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиации». В 1903 г. Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри получили Нобелевскую премию по физике за исследование радиоактивности и открытие радия.



1. Какие нуклиды называют стабильными, а какие — радиоактивными?
2. Что называют радиоактивностью?
3. Какие экспериментальные данные свидетельствуют о том, что радиоактивность — ядерный процесс?
4. Перечислите свойства и объясните природу  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.
5. Может ли одно и то же радиоактивное ядро одновременно излучать  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы?
6. В каких случаях испускается  $\gamma$ -излучение?
7. Сформулируйте и запишите правила смещения для  $\alpha$ -распада. Охарактеризуйте их особенности.
8. Сформулируйте и запишите правило смещения для  $\beta$ -распада. Охарактеризуйте его особенности.
9. Какие частицы испускаются при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах?
10. Охарактеризуйте особенности  $\gamma$ -излучения.
11. Какие из законов сохранения выполняются при радиоактивных превращениях?

## § 38. Закон радиоактивного распада

Большинство изотопов любого химического элемента превращается в более устойчивые изотопы путем радиоактивного распада. Каждый радиоактивный элемент распадается со своей, присущей только ему «скоростью». При этом для каждого радиоактивного ядра существует характерное время, называемое *периодом полураспада*  $T_{1/2}$ , спустя которое в исходном состоянии остается половина имевшихся ядер. Таким образом, *периодом полураспада*  $T_{1/2}$  называется *промежуток времени, за который распадается половина начального количества  $N_0$  радиоактивных ядер*. При этом распавшиеся ядра превращаются в ядра других, более устойчивых изотопов.

Отметим, что период полураспада не зависит от того, в каком состоянии находится вещество: твердом, жидком или газообразном. Кроме того, период полураспада не зависит от времени, места и условий, в которых находится радиоактивное вещество. Поэтому количество радиоактивных ядер «тогда»  $N_1$  и «сейчас»  $N_2$  зависит только от промежутка времени  $\tau = t_2 - t_1$ , прошедшего с момента начала регистрации процесса распада ядер.

Невозможно точно предсказать, когда произойдет распад данного ядра. Однако можно оценить среднее число ядер, которые распадутся за данный промежуток времени. Таким образом, радиоактивный распад является процессом статистическим и справедлив только при достаточно большом количестве радиоактивных ядер.

Для нахождения закона радиоактивного распада будем считать, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) число радиоактивных ядер  $N_0$ . Через промежуток времени, равный периоду полураспада, это число будет  $\frac{N_0}{2}$ , еще через такой же промежуток времени —  $\frac{N_0}{4}$ . Спустя промежуток времени, равный  $n$  периодам полураспада ( $t = nT_{1/2}$ ), радиоактивных ядер останется:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (1)$$

Это соотношение выражает **закон радиоактивного распада**, который можно сформулировать следующим образом:

**число нераспавшихся радиоактивных ядер убывает с течением времени по закону, представленному соотношением (1).**

Закон радиоактивного распада позволяет найти число нераспавшихся ядер в любой момент времени. Подчеркнем, что полученное выражение хорошо описывает распад радиоактивных ядер только тогда, когда их количество достаточно велико.

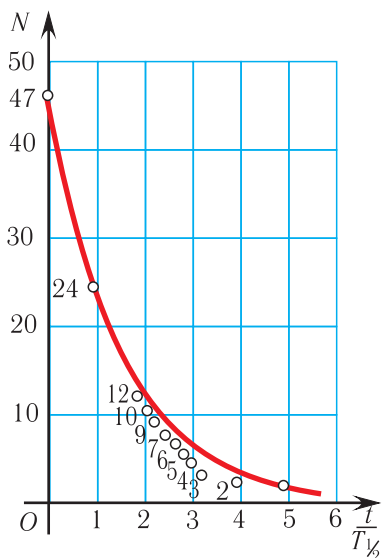


Рис. 156. Число нераспавшихся ядер  $^{256}_{100}\text{Fm}$  в зависимости от времени

Таблица 11. Периоды полураспада радиоактивных изотопов веществ

Вещество	Период полураспада
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30,17 года
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,3 года
$^{131}_{53}\text{I}$	8,04 суток
$^{239}_{94}\text{Pu}$	24 390 лет
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 лет
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8 суток
$^{235}_{92}\text{U}$	700 млн лет
$^{238}_{92}\text{U}$	4,5 млрд лет

Приведем экспериментальные результаты, которые показывают, что при малом количестве радиоактивных ядер это выражение неприменимо. На рисунке 156 изображен график распада 47 ядер изотопа фермия  $^{256}_{100}\text{Fm}$ , период полураспада которого  $T_{1/2} = 3,5$  ч. Из рисунка видно, что пока ядер было достаточно много — от 47 до 12, показательная функция хорошо описывала закон распада. Однако при меньшем числе ядер истинная зависимость существенно отличается от показательной функции. Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов веществ приведены в таблице 11.



Впервые процесс радиоактивного распада для измерения промежутков времени был использован в 1904 г. Э. Резерфордом. По отношению концентрации урана и его дочернего продукта распада (гелия) он определил возраст урановой породы. Эта работа положила начало ядерной геохронологии — определению возраста различных минералов Земли по радиоактивным долгоживущим веществам. В дальнейшем исследование процессов ядерного синтеза позволило перейти к ядерной космохронологии, т. е. к определению продолжительных промежутков времени, прошедших с момента образования элементов в масштабах Галактики и Вселенной. В основу ядерной космохронологии положена неизменность скорости радиоактивного распада.

В 1921 г. Ф. Содди была присуждена Нобелевская премия по химии «за вклад в химию радиоактивных веществ».



1. Каким закономерностям подчиняется закон радиоактивного распада?
2. Что называют периодом полураспада радиоактивного вещества? Что он характеризует?
3. Выведите формулу закона радиоактивного распада. Каков характер этого распада?
4. Сколько времени необходимо, чтобы распалась половина атомов радиоактивного вещества?
5. Почему на Земле до сих пор не распались все радиоактивные ядра?

### Упражнение 24

1. За промежуток времени  $t$  начальное количество некоторых радиоактивных изотопов уменьшилось в  $k_1 = 2,0$  раза. Во сколько раз  $k_2$  оно уменьшится за промежуток времени  $t_1 = 2t$ ?

2. Какая доля ядер изотопов германия  ${}^{68}_{32}\text{Ge}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 270$  сут сохранится через промежуток времени  $t = 4,5$  года?

3. Определите массу  $m$  нераспавшегося радиоактивного вещества по истечении суток, если вначале его масса была  $m_0 = 1,0$  кг. Период полураспада вещества  $T_{1/2} = 10$  дней.

4. При измерении периода полураспада радиоактивного вещества использован счетчик импульсов. В течение промежутка времени  $t = 1,0$  мин было зарегистрировано  $n_1 = 250$  импульсов, а спустя промежуток времени  $t_1 = 60$  мин после начала первого измерения зарегистрировано  $n_2 = 92$  импульса за минуту. Определите период полураспада  $T_{1/2}$  данного радиоактивного вещества.

5. Кусок ископаемого дерева содержит изотопы углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  и  ${}^{14}_6\text{C}$  общей массой  $m = 240$  г. При этом наблюдается  $N = 5$  распадов изотопов углерода  ${}^{14}_6\text{C}$  за секунду. Изотопы углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  стабильны. Определите возраст  $t$  дерева, если известно, что в живых деревьях отношение  $\frac{{}^{14}_6\text{C}}{{}^{12}_6\text{C}} \approx 1,3 \cdot 10^{-12}$ .

## § 39. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции

Открытие деления урана означало появление нового вида топлива — самой массы материи.

Д. Юз

Особый тип ядерных реакций представляют ядерные реакции деления элементов, расположенных в конце периодической системы химических элементов. В результате таких реакций выделяется огромное количество энергии. Почему это происходит? Обратимся к графику удельной энергии связи нуклонов, изображенному

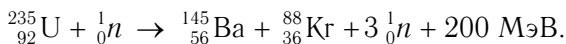
Правообладатель Народная асвета

на рисунке 148. Для тяжелых ядер, например таких, как  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , удельная энергия связи, приходящаяся на нуклон, составляет примерно 7,6 МэВ. Напомним, что эта энергия связана с дефектом масс — суммарная масса свободных нуклонов больше, чем масса ядра. Ядра химических элементов из середины периодической системы элементов Менделеева обладают максимальной удельной энергией связи — до 8,8 МэВ на нуклон. Таким образом, при расщеплении тяжелого ядра на 2—3 более легких осколка энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличится на величину порядка 1 МэВ. Согласно закону сохранения энергии такое же количество энергии выделится при делении ядра. Следовательно, в ходе ядерной реакции, приводящей к появлению ядер с большей удельной энергией связи, должна выделяться энергия. Число нуклонов в каждом ядре урана равно 235. Значит, реакция расщепления одного ядра приводит к выделению более 200 МэВ энергии. Даже учитывая всевозможные потери, это число несравнимо с энергией  $E \approx 1 \text{ эВ}$ , выделяемой в химических реакциях окисления (горения топлива).

Выводы теоретиков нашли свое подтверждение в ходе многочисленных экспериментов в середине XX в. Основной вопрос заключался в том, как заставить ядро делиться. Бомбардировка  $\alpha$ -частицами или протонами неэффективна ввиду их сильного отталкивания ядром. Поскольку электроны представляют собой слишком легкие «снаряды», то выбор пал на нейтроны. Они достаточно тяжелые

(по сравнению с электронами) и в то же время электрически нейтральны. Вследствие этого нейтроны могут беспрепятственно подлетать к ядру-мишени, двигаясь со сколь угодно малой скоростью. Попад в сферу действия ядерных сил притяжения, нейтрон проникает в ядро.

В 1938 г. немецкие радиохимики Отто Ган, Фриц Штрассман, Лизе Мейтнер, Отто Фриш впервые осуществили реакцию деления  ${}^{235}_{92}\text{U}$  нейтронами:



Отметим, что сама идея расщепления ядра была столь необычна, что ученый мир вначале не воспринял результаты их экспериментов. И только спустя некоторое время было осознано, что ядро урана распадается на два осколка. Данная реакция изображена на рисунке 157.

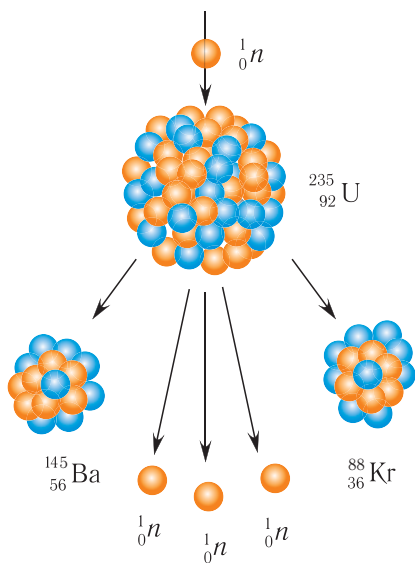


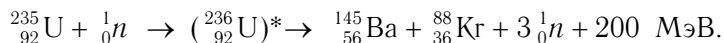
Рис. 157. Реакция деления ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$  под действием нейтрона

В 1940 г. советские физики Георгий Николаевич Флеров и Константин Антонович Петржак обнаружили новый вид радиоактивных превращений — спонтанное деление ядер урана  $^{238}_{92}\text{U}$ . В процессе деления образуются осколки — изотопы элементов середины периодической системы со значениями  $Z$  от 34 (изотопы селена  $^{74}_{34}\text{Se}$ ) до 67 (изотопы гольмия  $^{162}_{67}\text{Ho}$ ).

Новое явление было названо делением ядра из-за сходства с делением клетки в биологии. Наиболее вероятным является деление ядра на два осколка. Отношение их масс составляет примерно 3 : 2. Вероятность деления на три осколка составляет величину  $10^{-2}$ — $10^{-8}$  от вероятности деления на два. Реакции деления ядер обычно являются экзотермическими с выделением энергии  $E \approx 10^8$  МэВ в каждом акте реакции.

Наглядно процесс деления можно изобразить, представив ядро в виде капли заряженной жидкости. Вследствие того, что ядерные силы являются короткодействующими, они действуют только на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м. Поэтому нуклоны взаимодействуют только со своими ближайшими соседями. Вещество ядра практически несжимаемо. Между протонами в ядре, кроме ядерных сил притяжения, действуют, в отличие от нейтронов, еще и электростатические силы отталкивания. Так как ядро устойчиво, то ядерные силы и силы электростатического отталкивания в нем скомпенсированы. Поэтому ядро стремится принять шарообразную форму, аналогично капле жидкости в состоянии невесомости (рис. 158, а).

Согласно капельной модели нейтрон при поглощении ядром передает ему дополнительную энергию (подобно нагреву капли жидкости), которая распределяется между всеми входящими в состав ядра нуклонами. Образуется новое промежуточное ядро, находящееся в возбужденном состоянии ( $^{236}_{92}\text{U}^*$ ):



Ядерная «жидкость» начинает совершать колебания, ядро приобретает удлиненную форму типа гантели (рис. 158, б, в, г). Ядерные силы уже не в состоянии удержать все нуклоны вместе. Вследствие электростатического отталкивания двух

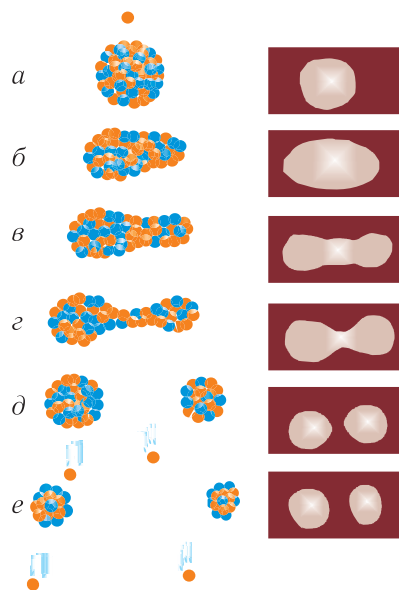


Рис. 158. Капельная модель ядра и объяснение процесса деления ядер на ее основе. Справа — фотографии процесса деления капли жидкости

сгустков ядерной «жидкости» ядро расщепляется на части (рис. 158, *д*), которые называются осколками деления. Деление сопровождается испусканием нейтронов (рис. 158, *е*).

При делении ядра урана один нейтрон первоначально вызывает деление одного ядра. Два осколка деления, уже не связанные мощными, но короткодействующими ядерными силами, с большими скоростями разлетаются за счет электростатического отталкивания. Суммарная кинетическая энергия осколков ( $E \approx 170$  МэВ) составляет основную долю всей энергии, освобождаемой при делении ядра ( $E \approx 200$  МэВ).

Появление осколков не единственный результат деления ядра. Начальное отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре-осколке заметно больше значения этой величины для стабильных ядер сравнимой массы.

При каждом акте деления ядра образуется 2—3 новых нейтрона, каждый с энергией в среднем  $E \approx 2$  МэВ ( $v \sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ). Образовавшиеся осколки являются  $\beta^-$ -радиоактивными. Поэтому после ряда их  $\beta^-$ -распадов они превращаются в стабильные изотопы. Чаще всего дочернее ядро, образовавшееся после  $\beta^-$ -распада, оказывается возбужденным и переходит в основное энергетическое состояние с испусканием  $\gamma$ -кванта.

Используемые в качестве сырья для получения искусственного горючего уран  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и торий  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  начинают делиться при энергии нейтронов около 1 МэВ. Особенность изотопов  ${}^{233}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  состоит в том, что они делятся под действием медленных нейтронов.



В принципе можно разделить любое ядро, но энергетически выгодно деление становится для всех элементов тяжелее серебра. Для этого их необходимо «сильно ударить». Например, ядро золота делится при энергии нейтронов  $E \geq 100$  МэВ.

Поскольку деление ядер вызывают нейтроны, а в результате деления опять рождаются нейтроны, то при определенных условиях процесс, начавшись однажды с одного нейтрона, может принять характер *цепной реакции*: за одним делением последуют другие и т. д.

**Ядерная реакция деления**, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой же реакции, называется **цепной**.

Какие же условия необходимы для цепных ядерных реакций?

1. Число вторичных нейтронов  $N > 1$ .
2. Энергия нейтронов, выделяющихся при делении, должна быть достаточной, чтобы вызвать деление ядер.



3. Должны отсутствовать примеси, поглощающие нейтроны.

4. Необходимо иметь минимальное количество вещества, чтобы нейтроны успели возбудить ядро до выхода из области деления ядер.

Минимальная масса вещества, необходимая для осуществления цепной реакции, называется **критической массой**. Если масса образца недостаточна, то нейтроны деления пролетают через него практически без возбуждения новых ядер. Наименьшие размеры и массу имеет вещество сферической формы, так как для него отношение площади поверхности к объему минимально. Радиус сферы должен быть больше длины пробега нейтрона до соударения с ядром. Тогда критическую массу урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  можно оценить, и она составляет примерно 48 кг. При плотности урана  $1,895 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  радиус шара такой массы равен примерно 8,5 см. Для изотопа плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  критическая масса составляет уже 17 кг, что соответствует шару радиусом 6,0 см.



Цепная ядерная реакция впервые была осуществлена в США Энрико Ферми в 1942 г., в СССР — под руководством Игоря Васильевича Курчатова в 1946 г.

Вновь образованные при ядерной реакции деления два или три нейтрона вызовут дополнительные акты деления, так что процесс лавинообразно нарастает (рис. 159). Так запускается цепная реакция деления, неконтролируемое (неуправляемое) развитие которой приводит к освобождению колоссального количества энергии за очень короткий промежуток времени. Подобные процессы происходят при ядерном взрыве (рис. 160).

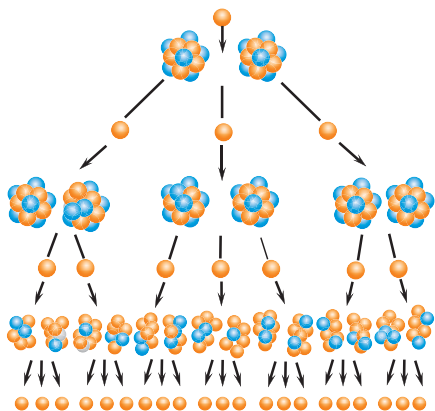


Рис. 159. Цепная реакция деления



Рис. 160. Ядерный взрыв

Количественной характеристикой цепной реакции деления является **коэффициент размножения нейтронов**:

$$k = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_2$  — число нейтронов в данном поколении,  $n_1$  — число нейтронов в предыдущем поколении. Если коэффициент размножения  $k = 1$ , то число нейтронов в нем все время остается неизменным. При  $k > 1$  общее число нейтронов в реакторе увеличивается со временем и возможно их неконтролируемое размножение, приводящее к взрыву. При  $k < 1$  число нейтронов уменьшается, и реакция с течением времени прекращается.

Нейтроны могут поглощаться различными примесями, покидать область, в которой происходит реакция, теряя свою энергию в результате большого числа актов рассеяния. С учетом всех возможных потерь коэффициент размножения  $k$  должен быть больше единицы.

Цепная ядерная реакция будет *самоподдерживающейся*, если количество нейтронов в каждом следующем поколении не уменьшается.

В ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии и импульса, электрического и барионного зарядов. Именно они позволяют предсказать возможные пути ядерных превращений.



Называя энергию, выделяющуюся при делении ядра, атомной, мы допускаем двойную неточность. Во-первых, делится не атом, а ядро, а во-вторых, выражение «атомная энергия» в буквальном смысле означает «энергия неделимого». Ф. Содди предлагал взамен термин «томная энергия» («энергия делимого») на том основании, что слово «*topic*» (делимый) устранил, по крайней мере, противоречие «деление неделимого». Однако «томная» энергия не прижилась, а так и осталась «а-томной». Правильно ее называть ядерной энергией. За выдающиеся теоретические и экспериментальные открытия в области ядерной физики Энрико Ферми в 1938 г. был удостоен Нобелевской премии по физике.



1. Что называют делением ядра? Каковы особенности этого процесса?
2. Как объяснить способность тяжелых ядер к делению? Почему при делении ядер происходит выделение энергии?
3. Опишите механизм деления ядра урана и напишите уравнение данной ядерной реакции.
4. Что называют цепной ядерной реакцией?
5. Благодаря чему оказалось возможным существование цепной ядерной реакции деления?
6. Что называют коэффициентом размножения нейтронов?
7. Чем вызвана необходимость замедления нейтронов, испускаемых при делении ядер?
8. Изобразите графически и объясните процессы, происходящие при цепной реакции в уране  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

## § 40. Ядерный реактор

Цепная реакция может быть управляемой и неуправляемой (ядерный взрыв). Для управления цепной реакцией необходимо очень точно контролировать процесс размножения нейтронов (рис. 161), делая его таким, чтобы число нейтронов в процессе реакции оставалось практически неизменным.

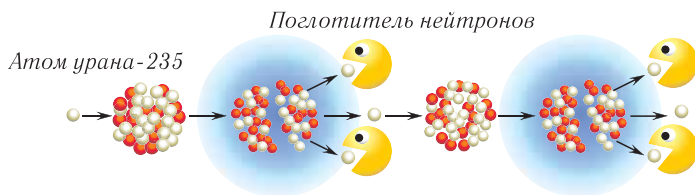


Рис. 161. Контролируемая ядерная реакция в ядерном реакторе



При коэффициенте размножения  $k \approx 1,006$  цепная ядерная реакция может принять неуправляемый характер, а при  $k > 1,006$  мгновенно происходит ядерный взрыв.

**Ядерный реактор** — это устройство, в котором происходит управляемая цепная ядерная реакция деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов. В ходе реакции освобождается энергия, которую можно использовать для производства электрической энергии.

Энергия, освобождаемая при делении ядра, уносится осколками деления, нейтронами,  $\gamma$ -квантами и электронами с сопровождающими их антинейтрино. В конечном итоге вся энергия деления ядра, около 200 МэВ, переходит во внутреннюю энергию, которая выделяется как в самом реакторе, так и в окружающих его материалах (в бетонной защите и пр.).

Ядерный реактор имеет пять основных составных частей, изображенных на рисунке 162.

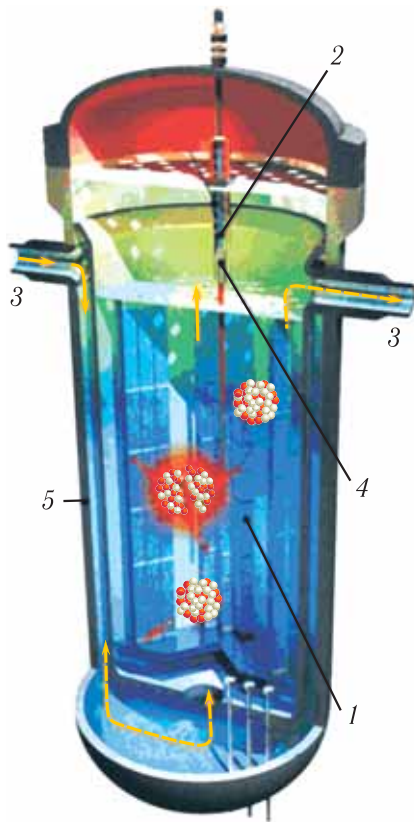


Рис. 162. Схема ядерного реактора: 1 — активная зона с твэлами; 2 — замедлитель (тяжелая вода); 3 — система теплоотвода; 4 — стержни управления реакцией; 5 — защитный корпус

1. *Активная зона*, которая содержит ядерное горючее, находящееся в специальных тепловыделяющих элементах, или *ТВЭлах* (по первым буквам словосочетания). ТВЭлы представляют собой очень длинные трубки, проходящие через всю активную зону реактора. Именно в них идет цепная реакция. Активная зона окружена отражателем нейтронов, возвращающим их внутрь активной зоны для продолжения реакции. Хорошим отражателем нейтронов является бериллий.

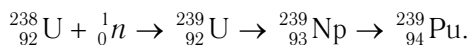
В качестве ядерного горючего используется три вида радиоактивных изотопов: урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ .

2. *Замедлитель быстрых нейтронов* (графит, тяжелая вода, бериллий, оксид бериллия, гидриды металлов, органические жидкости). Средняя энергия нейтронов, появляющихся в реакторе, около 2 МэВ. Если энергия нейтронов меньше 0,1 эВ, то их называют *тепловыми*, так как их скорости близки к скорости теплового движения, модуль которой  $2,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Если энергия нейтронов больше 0,1 МэВ, а модуль их скорости порядка  $10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , то нейтроны называют *быстрыми*. Промежуточная область энергий отведена промежуточным (резонансным) нейтронам. Замедлитель эффективно отбирает энергию у быстрых нейтронов, рождающихся в реакции деления. (Вспомните столкновение двух тел одинаковой массы.) Нейтроны замедляются (отсюда и название вещества — замедлитель) до энергий порядка долей электронвольта.

Под действием медленных (тепловых) нейтронов делятся лишь достаточно редкие в природе изотопы урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , в то время как гораздо более распространенные изотопы  ${}_{92}^{238}\text{U}$  поглощают тепловые нейтроны без деления на осколки. При каждом акте деления  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется в среднем  $W = 170$  МэВ в виде кинетической энергии разлетающихся осколков. Делящиеся под действием тепловых нейтронов изотопы  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}_{92}^{233}\text{U}$  в природе не встречаются и получают искусственным путем.

В реакторах на быстрых нейтронах используются *урано-плутониевый* цикл, в котором ядро  ${}_{92}^{238}\text{U}$  превращается в ядро  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ , и *ториевый цикл*, в котором ядро  ${}_{90}^{230}\text{Th}$  превращается в ядро  ${}_{92}^{233}\text{U}$ .

Ядра изотопов  ${}_{92}^{238}\text{U}$  могут делиться только под действием быстрых нейтронов. Однако основной реакцией при взаимодействии с нейтронами является захват нейтрона, после которого они самопроизвольно превращаются в ядра изотопов  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ :



Полученные изотопы  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  являются практически стабильными, так как их период полураспада  $T_{1/2} = 24\,400$  лет. Плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  по способности к взаимо-

действию с нейтронами похож на изотопы урана  $^{235}_{92}\text{U}$ . При захвате нейтрона ядро плутония делится и испускает в среднем 3 нейтрона, которые способны поддерживать развитие цепной реакции.

Под действием быстрых нейтронов ядра изотопов тория  $^{232}_{90}\text{Th}$  также самопроизвольно претерпевают цепочку распадов, превращаясь в ядра изотопов  $^{233}_{92}\text{U}$ :



Изотопы урана  $^{233}_{92}\text{U}$  также являются практически стабильными, так как их период полураспада  $T_{1/2} = 162\,000$  лет, но они делятся тепловыми нейтронами.

Таким образом, захват быстрых нейтронов изотопами  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{232}_{90}\text{Th}$  позволяет осуществлять воспроизводство ядерного горючего  $^{239}_{94}\text{Pu}$  и  $^{233}_{92}\text{U}$ .

Ядерный реактор на быстрых нейтронах выполняет одновременно две функции — производство энергии и воспроизводство ядерного горючего. Именно поэтому он называется еще реактором-размножителем (бридером). Кроме того, в нем можно использовать в качестве горючего не только редкие в природе изотопы урана  $^{235}_{92}\text{U}$ , но и гораздо более распространенные изотопы урана  $^{238}_{92}\text{U}$ .

В связи с тем что запасы естественно делящихся радиоактивных изотопов ограничены, возможность осуществления процессов производства ядерного горючего  $^{239}_{94}\text{Pu}$  и  $^{233}_{92}\text{U}$  в реакторах на быстрых нейтронах имеет принципиальный характер для будущего ядерной энергетики. Помимо того, ядерные реакторы на тепловых нейтронах способны «сжечь» только 0,5—1 % урана. Применение реактора-размножителя позволяет увеличить эффективность использования горючего в десятки раз.

3. *Система охлаждения* — теплоноситель (для отвода из активной зоны реактора выделяющейся в ней энергии) — вода, газы, жидкий натрий. Вода нагревается стенками твэлов до температуры 300 °С и под давлением порядка  $10^7$  Па (100 атм) выводится из активной зоны. Далее вода превращается в пар и направляется к паровым турбинам для генерации электрической энергии.

4. *Система регулирования* — устройство для обеспечения возможности управления цепной реакцией. В системе регулирования используются кадмий, бор. Это так называемые поглотители — вещества, активно поглощающие нейтроны. Если стержни с поглотителем ввести в активную зону, то коэффициент размножения нейтронов уменьшается. И наоборот, выведение стержней из активной зоны увеличивает коэффициент размножения. Этим и достигается управление реакцией. Обычно это делается автоматически. В случае внештатных ситуаций предусмотрена ручная регулировка погружения стержней.

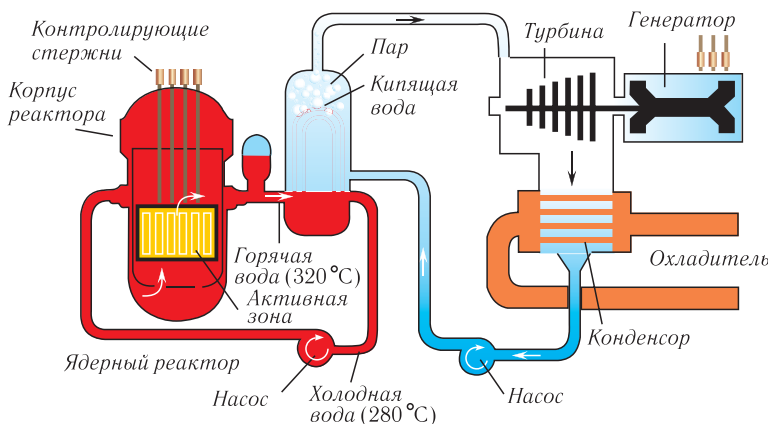


Рис. 163. Схема атомной электростанции с герметичным водяным контуром охлаждения

5. Система безопасности — оболочка из бетона с железным наполнителем (для защиты окружающего пространства от ионизирующего излучения компонентов топлива и продуктов ядерной реакции).

Ядерные реакторы различаются по типу используемого ядерного горючего, замедлителя и теплоносителя.

Выработка электроэнергии, основанная на использовании управляемой ядерной реакции, производится на атомных электростанциях (АЭС) (рис. 163).

Преимущества атомных электростанций:

- 1) не потребляют кислород и органическое топливо;
- 2) отсутствует загрязнение окружающей среды золой, серой и другими продуктами сгорания органического топлива.

Опасные факторы воздействия АЭС на окружающую среду:

- 1) нарушение теплового баланса в окрестностях АЭС;
- 2) радиоактивные отходы;
- 3) радиоактивное загрязнение местности;
- 4) опасность экологических катастроф.



Первая в мире атомная электростанция была построена в СССР в г. Обнинске и дала ток 27 июня 1954 г.

Всем известно о катастрофе, произошедшей на 4-м блоке Чернобыльской атомной станции в апреле 1986 г. В результате нарушения технологических процессов произошло перегревание активной зоны. Последующий за этим взрыв разрушил оболочку реактора. Большое количество радиоактивных веществ было

Правообладатель Народная асвета

выброшено в атмосферу. Кратковременному заражению короткоживущими изотопами подверглись огромные территории. Долговременное заражение сделало невозможными для проживания тысячи квадратных километров территории Беларуси, России и Украины, где выпали наиболее опасные изотопы стронция  $^{90}_{38}\text{Sr}$  (период полураспада 27,7 года) и цезия  $^{137}_{55}\text{Cs}$  (период полураспада около 30 лет). Изотопы  $^{90}_{38}\text{Sr}$  концентрируются в костных тканях и костном мозге — органе кроветворения, что приводит к тяжелейшему заболеванию — лейкемии. А изотопы  $^{137}_{55}\text{Cs}$ , которые накапливаются в мягких тканях организма, испускают  $\gamma$ -излучение, наносящее значительные повреждения организму.



1. Что называют ядерным реактором?
2. Что является ядерным горючим в реакторах?
3. Какое вещество служит замедлителем нейтронов в ядерных реакторах? Зачем нужен замедлитель?
4. Что используют в качестве теплоносителя в ядерных реакторах?
5. Как осуществляется управление цепной реакцией деления?
6. Что применяется в системе биологической защиты от потока нейтронов и  $\gamma$ -излучения, возникающих в реакторе?
7. В чем состоят преимущества использования атомных электростанций по сравнению с тепловыми электростанциями?
8. В чем заключаются основные недостатки атомной энергетики?

## § 41. Реакции ядерного синтеза

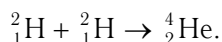
Несмотря на то что атомные электростанции экологически более чистые по сравнению с тепловыми электростанциями и потребляют значительно меньше топлива, у атомной энергетики есть существенные недостатки. Во-первых, радиоактивные элементы (уран и торий) составляют около  $(3-8) \cdot 10^{-4} \%$  по массе в земной коре и их добыча все усложняется. Во-вторых, что делать с растущим количеством радиоактивных отходов?

Эти недостатки можно устранить, если для получения энергии использовать не реакции деления тяжелых ядер, а реакции синтеза легких ядер. Эти реакции эффективно протекают при сверхвысоких температурах порядка  $10^9 \text{ K}$  и самоподдерживаются за счет значительного выделения в них энергии. Такие реакции названы **термоядерными**. Причина выделения энергии та же, что и в случае реакций деления, — удельная энергия связи продуктов реакции выше, чем исходных материалов.

Энергия покоя двух легких ядер больше, чем образованного из них результирующего ядра. Так как результирующее ядро имеет меньшую массу, то при его образовании должна высвободиться энергия  $\Delta E = \Delta mc^2$ .



Простейшим примером термоядерной реакции является преобразование дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  в гелий  ${}^4_2\text{He}$ :



Массовое число ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$   $m_{\text{H}} = 2,01410$  а. е. м., массовое число ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$   $m_{\text{He}} = 4,002080$  а. е. м. В результате реакции синтеза дефект масс:

$$\Delta m = m_{\text{He}} - 2m_{\text{H}} = 4,00280 \text{ а. е. м.} - 2 \cdot 2,01410 \text{ а. е. м.} = -0,0254 \text{ а. е. м.}$$

Это составляет 0,63 % общей массы ядер водорода. В то время как при делении урана дефект масс составляет 0,056 %. Следовательно, для одной и той же массы вещества при ядерном синтезе выделяется примерно в 10 раз больше энергии, чем при делении ядра. Если бы этот процесс удалось использовать для производства энергии, то он оказался бы в 10 раз эффективнее процесса деления урана.

Основное преимущество использования ядерного синтеза для получения энергии заключается, прежде всего, в количестве запасов топлива. Для человечества было бы очень удобно, если бы для реакции синтеза требовались наиболее часто встречающиеся изотопы водорода  ${}^1_1\text{H}$ , но для реакции синтеза их необходимо нагреть до огромной температуры. Дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  вступает в реакцию синтеза при более низкой температуре, чем изотопы водорода  ${}^1_1\text{H}$ , а тритий  ${}^3_1\text{H}$  — еще при более низкой температуре. Но так как тритий  ${}^3_1\text{H}$  нестабилен, то в качестве основного ядерного топлива остается лишь дейтерий  ${}^2_1\text{H}$ .

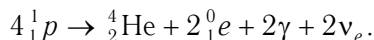
В Мировом океане из 7000 атомов водорода только один является дейтерием  ${}^2_1\text{H}$ . Следовательно, с учетом мировых запасов воды можем найти, что запасы дейтерия составляют 80 000 км<sup>3</sup>. В результате реакции синтеза водорода, который содержится в 1 л вод Мирового океана, выделяется столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 300 л бензина. Значит, из дейтерия, содержащегося в океане, можно получить столько энергии, сколько выделяется при сгорании бензина, объем которого многократно превышает объем Мирового океана, т. е. запасы дейтерия практически неисчерпаемы. Кроме того, при реакциях синтеза не образуются радиоактивные отходы.

Однако серьезным препятствием на пути к получению энергии является электростатическое отталкивание ядер дейтерия. При комнатной температуре оно не позволяет ядрам сблизиться до расстояний, на которых сказываются короткодействующие ядерные силы притяжения. Для преодоления сил отталкивания необходимо нагреть дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  до очень высокой температуры порядка 10<sup>9</sup> К, при которой возможны реакции синтеза. Это является существенным препятствием



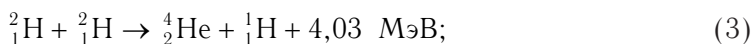
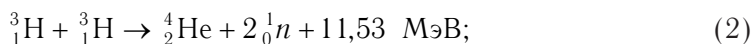
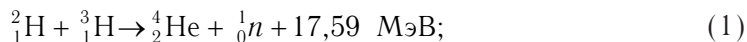
для широкого применения реакций ядерного синтеза в энергетике. Термоядерная реакция происходит на Солнце и на других звездах. Благодаря огромным массам и размерам в них оптимально решается проблема гравитационного удержания и термоизоляции вещества, представляющего собой плазму.

Основным источником энергии Солнца являются реакции, приводящие к превращению четырех протонов в ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  с выделением 26,72 МэВ энергии:



В природных условиях такие реакции протекают лишь в недрах звезд, а для осуществления их на Земле необходимо сильно разогреть вещество либо ядерным взрывом, либо мощным газовым разрядом, либо гигантским импульсом лазерного излучения, либо бомбардировкой интенсивным пучком частиц.

Для управления реакциями синтеза необходимо создать термоядерный реактор. Более вероятным является осуществление такого реактора на следующих ядерных реакциях синтеза:



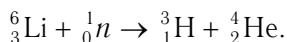
Наиболее доступной из реакций синтеза (по области необходимых температур) и энергетически выгодной является реакция (1) между ядрами дейтерия и трития. При этом на один нуклон выделяется 3,5 МэВ, а при реакциях деления — 1 МэВ. Для того чтобы дейтерий мог проникнуть к ядру трития, ему необходимо иметь энергию порядка 1 МэВ. Рассчитаем температуру, при которой частица может иметь такую энергию.

Средняя кинетическая энергия частицы в газе  $E = \frac{3}{2}kT$ , тогда:

$$T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ К}.$$

При такой температуре вещества почти каждое столкновение частиц приводило бы к ядерной реакции, однако на Земле такие условия недостижимы.

В проблеме термоядерного синтеза есть еще один вопрос: где взять тритий? Тритий, не встречающийся в природе, может быть получен в самом термоядерном реакторе, если использовать мощные потоки нейтронов:



Сейчас тритий получают с помощью нейтронов ядерного уранового реактора. Дейтерий присутствует в природном водороде, и его можно получить, разделяя изотопы водорода. Запасы дейтерия в мировом океане огромны, на многие тысячи лет хватит также запасов лития, необходимого для производства другого изотопа — трития.

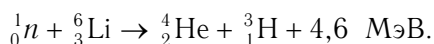
Для практического управления термоядерными реакциями важнейшим является создание таких условий, при которых высокотемпературная плазма с помощью магнитных полей устойчиво удерживается в состоянии теплоизоляции. Для этой цели применяются магнитные камеры. Основными видами потерь являются теплота, уходящая через стенки реактора, и тормозное излучение в плазме.

К преимуществам использования реакций синтеза для получения энергии относятся:

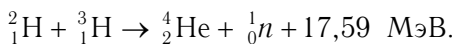
- 1) высокий выход энергии;
- 2) экологическая безопасность реактора;
- 3) отсутствие проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Осуществить управляемую термоядерную реакцию в промышленных масштабах, т. е. добиться энергетического выхода, превышающего затраты, пока не удалось.

На Земле удалось осуществить в настоящее время лишь неуправляемую термоядерную реакцию синтеза при взрыве водородной бомбы. Следует заметить, что сначала в водородной бомбе взрывается находящаяся внутри нее атомная бомба. В результате происходит резкий рост температуры до  $\approx (10-20) \cdot 10^6$  К, возникает поток нейтронов и электромагнитного излучения. Нейтроны вступают в реакцию с изотопами лития, находящимися в бомбе, с образованием трития:



Повышение температуры до необходимого значения вместе с образовавшимся тритием приводит к термоядерной реакции:



Основная часть энергии (70 %) уносится быстрыми нейтронами и ядрами атомов гелия (20 %).



Исследование механизмов ядерного синтеза и распространенности различных ядер дает возможность заглянуть в далекое прошлое, когда «рождались» химические элементы. Изучение радиоактивности, открытие деления и синтеза ядер показали, что на ранних стадиях Вселенная состояла только из самых легких элементов — водорода и гелия, а все более тяжелые элементы образовались в результате ядерных реакций на звездах и при взрывах звезд.

В 2005 г. было принято решение о постройке Международного экспериментального термоядерного реактора в г. Карадаш (Франция), запуск которого намечен на 2018 г.



1. Какие реакции называются термоядерными?
2. Чем объяснить, что при синтезе легких ядер выделяется энергия?
3. Каковы условия осуществления ядерной реакции синтеза?
4. Как называются изотопы водорода и как их обозначают?
5. Сравните энергию, приходящуюся на один нуклон при термоядерной реакции и цепной ядерной реакции.
6. Каким образом применима формула Эйнштейна  $E = mc^2$ : а) к делению ядер; б) к ядерному синтезу; в) к ядерным реакциям?
7. Источником световой энергии, излучаемой Солнцем и другими звездами, служит термоядерный синтез. Какие условия в недрах звезд делают возможным протекание термоядерного синтеза?

## § 42. Ионизирующие излучения. Элементы дозиметрии

Заряженные частицы, рентгеновское и  $\gamma$ -излучение, распространяясь в веществе, взаимодействуют с его атомами. За счет своей энергии частицы излучения могут ионизировать атомы, выбивая из них электроны. Часто одна частица в состоянии ионизировать несколько атомов, поэтому процесс распространения такого излучения через вещество сопровождается его сильной ионизацией. Вследствие этого **ионизирующими** называют такие излучения, взаимодействие которых с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул (рис. 164).

Основу биологического действия ионизирующих излучений на живые ткани составляют химические процессы, происходящие в их клетках при поглощении



Рис. 164. Виды излучений

ими излучений. Ионизация атомов и молекул тканей вещества приводит к повреждению клеток и изменению структуры тканей. Часть атомов и молекул переходит в возбужденное состояние и, возвращаясь в невозбужденное состояние, отдает излишек энергии в виде ультрафиолетового излучения. Под воздействием этого излучения в тканях происходят биохимические реакции, обусловленные образованием новых молекул, чуждых нормальной клетке. В результате нарушается клеточное деление и образование новых клеток. В свою очередь это приводит к хромосомным перестройкам и возникновению мутаций, приводящих к изменениям в генах клетки. Таким образом, биологическое действие ионизирующих излучений сказывается не только на данном организме, но и на последующих поколениях.

Повреждения живого организма, вызванные действием ионизирующих излучений, называются *лучевой болезнью*. Опасность этой болезни усугубляется наличием скрытого периода, т. е. ее симптомы проявляются только через некоторый промежуток времени. Симптомами лучевой болезни являются тошнота, рвота, общая слабость, повышенная температура, выпадение волос, кровоизлияние.



А. Беккерель первым столкнулся с «результатами» воздействия радиоактивного излучения на ткани живого организма. Он положил пробирку с радием в карман и получил серьезный ожог кожи.

Разные виды ионизирующих излучений обладают различной проникающей способностью (см. рис. 152). Биологическое действие разных видов излучения на живые организмы неодинаково. Например,  $\alpha$ -частицы не способны проникнуть через наружный слой кожи. Поэтому они не представляют опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие  $\alpha$ -частицы, не попадут внутрь организма с пищей, вдыхаемым воздухом, на слизистую оболочку или через открытую рану.  $\beta$ -Излучение обладает большей проникающей способностью: оно проникает в ткани организма на 1—2 см. Проникающая способность  $\gamma$ -излучения настолько велика, что задержать его может только достаточно толстая свинцовая или бетонная плита. Чем больше энергии передает излучение тканям живого организма, тем больше в них будет повреждений.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников ионизирующих излучений: космических лучей, естественной радиоактивности горных пород и почвы, попадающих в пищу радиоактивных изотопов. Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи. В этом случае говорят о *внешнем облучении*. В то же время они могут находиться в пище, воде,

воздухе и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют *внутренним*.

Основными источниками внутреннего фонового облучения человеческого организма являются:

- 1) естественные изотопы углерода  $^{14}_6\text{C}$ , содержащиеся во всех тканях человеческого организма;
- 2) естественные радиоактивные изотопы калия  $^{40}_{19}\text{K}$ , содержащиеся в мягких тканях (преимущественно в мышцах);
- 3) долгоживущие изотопы радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$  и его короткоживущие изотопы  $^{224}_{88}\text{Ra}$ , откладывающиеся в костных тканях;
- 4) радон  $^{222}_{86}\text{Rn}$ , торий  $^{232}_{90}\text{Th}$  и их дочерние продукты распада, вдыхаемые с воздухом и откладывающиеся в дыхательных органах человека.

Кроме того, источники ионизирующих излучений избирательно концентрируются в отдельных органах (йод — в щитовидной железе, стронций — в костях, уран — в почках) и подвергают их повышенному облучению.

Очень важно уметь определять результат действия ионизирующего излучения на вещество, мерой которого является доза. Этим занимается **дозиметрия**.

Количество энергии, переданной организму ионизирующим излучением, называется *дозой* (от греч.  $\delta\omicron\sigma\eta$  (доза) — доля, порция). Существуют различные виды доз в зависимости от вида излучения, вида органа или ткани, подвергшихся облучению.

Энергия излучения  $W$ , поглощенная единицей массы  $m$  облучаемого тела (тканями организма), называется **поглощенной дозой  $D$** :

$$D = \frac{W}{m}, \quad (1)$$

где  $W$  — энергия, поглощенная телом (органом, тканью),  $m$  — его масса.

В СИ единицей поглощенной дозы является **1 грей (1 Гр)**.  $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Поглощенная доза излучения равна 1 Гр, если веществом массой 1 кг поглощено ионизирующее излучение, энергия которого равна 1 Дж.

Поглощенная доза расходуется на нагревание вещества и на его физические и химические превращения. Величина дозы зависит от вида излучения, энергии его частиц, плотности их потока и от состава облучаемого вещества. При одинаковой поглощенной дозе  $\alpha$ -излучение гораздо опаснее  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений. Для учета этого фактора дозу излучения следует умножить на коэффициент  $w_R$ , учитывающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Он называется *взвешивающим коэффициентом* излучения.

Значения  $\omega_R$  для различных видов ионизирующих излучений приведены в таблице 12.

Пересчитанную таким образом дозу называют *эквивалентной дозой*. **Эквивалентная доза  $H$**  — это поглощенная доза, умноженная на взвешивающий коэффициент излучения:

$$H = \omega_R D. \quad (2)$$

В СИ единицей эквивалентной дозы является **1 зиверт** (1 Зв).

1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой поглощенная доза равна 1 Гр и взвешивающий коэффициент равен единице.

Необходимо учитывать также, что одни части тела более чувствительны к облучению, чем другие. Поэтому дозы облучения органов и тканей организма необходимо учитывать с разными взвешивающими коэффициентами  $\omega_T$ . Например, костная ткань и щитовидная железа имеют коэффициент  $\omega_T = 0,03$ , легкие и красный костный мозг —  $\omega_T = 0,12$ , молочная железа —  $\omega_T = 0,15$ .

При умножении эквивалентной дозы на соответствующие коэффициенты и суммировании по всем органам и тканям получают **эффективную эквивалентную дозу**, отражающую суммарный эффект облучения для организма.

На практике широко используются внесистемные единицы:

**1 рад** — единица поглощенной дозы излучения:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}; \quad (3)$$

**1 бэр** (биологический эквивалент рад) — единица эквивалентной дозы:

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}; \quad 1 \text{ Зв} = 1 \cdot 10^2 \text{ бэр}. \quad (4)$$

Облучению от естественных источников подвергается любой житель Земли. Естественный фон составляет около 1,3 мЗв в год на человека. Однако одни получают большую дозу, а другие — меньшую. Это зависит от места проживания

Таблица 12. **Взвешивающие коэффициенты для различных типов ионизирующих излучений**

Тип и энергия излучения	Взвешивающий коэффициент, $\omega_R$
Фотоны любых энергий	1
$\beta$ -излучение (электроны любых энергий)	1
Протоны	5
Нейтроны с энергией меньше 10 кэВ	5
Нейтроны с энергией от 10 кэВ до 100 кэВ	10
Нейтроны с энергией от 100 кэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны с энергией от 2 МэВ до 20 МэВ	10
Нейтроны с энергией больше 20 МэВ	5
$\alpha$ -Частицы и тяжелые ионы	20

ния, образа жизни. Использование газа для приготовления пищи, герметизация помещений, полеты на самолетах, применение некоторых строительных материалов — все это увеличивает уровень облучения за счет естественных источников. В среднем земные источники ионизирующих излучений обеспечивают более  $\frac{5}{6}$  годовой эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением, в основном за счет внутреннего облучения. Остальную часть естественного облучения вносят космические лучи путем внешнего облучения.

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космического излучения эффективную эквивалентную дозу около 300 мкЗв в год. Для людей, живущих выше 2 км над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше. При подъеме с высоты 4 км до высоты 12 км уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз.



При перелете Нью-Йорк — Париж пассажир реактивного самолета получает дозу около 50 мкЗв. Всего за счет использования воздушного транспорта человечество получает в год коллективную эффективную эквивалентную дозу около 2000 чел.-Зв.

В среднем примерно  $\frac{2}{3}$  эффективной эквивалентной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает от радиоактивных веществ, попавших в организм с водой, пищей и воздухом.



Наиболее значительным из всех естественных источников ионизирующих излучений является невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ радон и его дочерние продукты. Именно они ответственны примерно за  $\frac{3}{4}$  годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой населением от земных источников ионизирующих излучений (рис. 165). Главный источник радона — это почва, в которой он постоянно образуется.

Основной вклад в индивидуальные дозы, получаемые людьми от искусственных источников радиации, вносят методы лечения, связанные с применением ионизирующих излучений. Они используются в медицине как в диагностических целях, так и для лечения. Одним из самых распространенных медицинских приборов является рентгеновский аппарат. Значительным достижением рентгенодиагностики стала компьютерная томография. Ее применение позволило уменьшить дозы облучения в десятки раз.

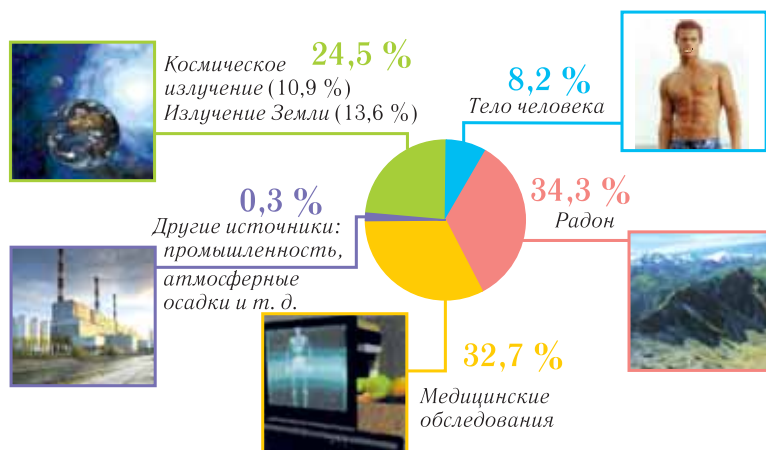


Рис. 165. Источники ионизирующих излучений

Если доза облучения достаточно велика, облученный человек погибнет. Доза облучения порядка 100 Гр вызывает настолько серьезные поражения центральной нервной системы, что смерть наступает в течение нескольких часов или дней. Наиболее чувствительными к поражению ионизирующими излучениями являются кроветворные органы, а наиболее опасными являются дозы, полученные в течение очень малого промежутка времени. Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы теряют способность нормально функционировать при дозах 0,5—1 Гр.

Для защиты от ионизирующих излучений, по возможности, нужно использовать следующие способы:

- 1) удаление на большое расстояние от источника;
- 2) ограничение времени пребывания на загрязненной местности;
- 3) применение защитных веществ (свинец, бор, кадмий), эффективно поглощающих ионизирующие излучения;
- 4) применение веществ, ослабляющих воздействие ионизирующих излучений на организм;
- 5) дозиметрический контроль окружающей местности и продуктов питания.

Широкое применение находят ионизирующие излучения в науке и технике. В результате взаимодействия частиц высоких энергий с исследуемым веществом образуются радиоактивные нуклиды. При переходе их в стабильное состояние испускается  $\gamma$ -излучение. По виду  $\gamma$ -спектров и интенсивности спектральных линий определяют химический состав вещества и концентрации содержащихся в нем элементов. Для этого метода характерны универсальность



методики, быстрота измерения и очень высокая чувствительность. Она достигает величины порядка  $10^{-7}$ .

Радиоактивационный метод анализа широко применяется в геологоразведке, особенно при исследовании руд, содержащих редкие и драгоценные металлы. В технике благодаря высокой чувствительности им исследуют скорость износа металлических деталей, например исследование износа железнодорожных рельсов.

Радионуклиды (изотопы йода, технеция, ксенона, таллия) широко используются в медицинской диагностике.

В качестве приборов для измерения дозы или ее мощности используются дозиметры, способные регистрировать ионизирующие излучения. Шкалы приборов специально проградуированы в единицах дозы либо в единицах мощности дозы.

Внимание! Знак, предупреждающий о радиационной опасности, изображен на рисунке 166.



Рис. 166. Знак радиационной опасности



По правилам МАГАТЭ (Международное Агентство по Атомной Энергии), предельная доза облучения составляет 5 мЗв в год для населения и 0,05 Зв в год для людей вредных профессий (не считая фонового излучения).

В Республике Беларусь с 19 апреля 2000 г. введены следующие Нормы радиационной безопасности. Основным пределом доз для населения является эффективная доза, равная 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год, или эффективная доза за период жизни (70 лет) — 70 мЗв. Эквивалентные дозы за год: в хрусталике глаза — 15 мЗв; в коже, кистях и стопах — 50 мЗв.



1. Какие излучения называют ионизирующими?
2. В чем проявляется биологическое воздействие ионизирующего излучения на живые организмы?
3. Какое излучение обладает наибольшей проникающей способностью?
4. К каким последствиям может привести облучение человека ионизирующими излучениями?
5. Назовите основные источники естественных ионизирующих излучений.
6. Чем занимается дозиметрия?
7. Дайте определение поглощенной дозы излучения. Что является единицей измерения поглощенной дозы в СИ?
8. Что такое эквивалентная доза? Что является единицей эквивалентной дозы в СИ?
9. Что такое эффективная эквивалентная доза? Что является единицей эффективной эквивалентной дозы в СИ?
10. Какие внесистемные единицы используются для измерения поглощенной и эквивалентной доз?
11. Какие из естественных внутренних источников ионизирующих излучений наиболее опасны?
12. Какие органы человека наиболее чувствительны к поражению ионизирующими излучениями?

### § 43. Элементарные частицы и их взаимодействия



Каждый электрон характеризуется собственным механическим моментом движения, который называется *спином* (от англ. spin — вращать).

**Элементарные частицы** — первичные, неразложимые далее частицы, которые нельзя считать соединением других частиц, существующих в свободном состоянии.

Элементарные частицы способны взаимодействовать друг с другом. Для всех элементарных частиц характерна способность возникать и поглощаться (рождаться и уничтожаться) при взаимодействии с другими частицами. Например, хотя нейтрон и не состоит из протона, электрона и антинейтрино, но он может превращаться в указанные частицы при взаимодействиях.

Общими характеристиками всех элементарных частиц является масса, время жизни, электрический заряд и спин.

Первоначально классификация элементарных частиц осуществлялась по их массе, что и получило отражение в названиях типов частиц (**лептоны** — легкие, **мезоны** — средние, **барионы** — тяжелые).

Электрические заряды элементарных частиц являются кратными величине элементарного электрического заряда.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на *стабильные*, *квазистабильные* и *нестабильные (резонансы)*.

Стабильными в пределах точности современных измерений являются электрон, протон, фотон и нейтрино.

К квазистабильным относятся частицы, распадающиеся за счет электромагнитного и слабого взаимодействий. Их время жизни  $\tau > 10^{-20}$  с.

Резонансами (нестабильными частицами) называются элементарные частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия. Их время жизни  $10^{-22}$ — $10^{-24}$  с.

Спин элементарных частиц является целым или полуцелым кратным постоянной Планка  $\hbar$ .

В основу современной классификации элементарных частиц положены типы фундаментальных взаимодействий, в которых они участвуют (табл. 13).

Таблица 13. Фундаментальные взаимодействия, их относительная интенсивность и соответствующие им кванты

Взаимодействие	Относительная интенсивность	Квант поля
Сильное	1	Мезон
Электромагнитное	$10^{-2}$	Фотон
Слабое	$10^{-10}$	$W^{\pm}, Z^0$
Гравитационное	$10^{-38}$	

Из четырех фундаментальных взаимодействий лишь *гравитационное* является универсальным. *Электромагнитные* силы оказывают влияние главным образом на частицы, обладающие электрическим зарядом. В *слабых* взаимодействиях участвуют все частицы, за исключением фотонов. *Сильное* взаимодействие — самое избирательное. Оно служит основой для разделения элементарных частиц на две обширные группы — группу **адронов** (от греч.  $\chi\alpha\delta\rho\sigma$  (адрос) — большой, сильный), которые участвуют в сильных взаимодействиях, и группу **лептонов** (от греч.  $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\varsigma$  (лептос) — тонкий, легкий), которые не участвуют в сильном взаимодействии.

Внутри этих групп частицы классифицируются по системе квантовых чисел.

Механизм всех взаимодействий — *обменный*, т. е. взаимодействие между двумя частицами осуществляется в результате их обмена промежуточной частицей — переносчиком взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие проявляется в виде сил тяготения между всеми частицами (рис. 167, *а*). Квант гравитационного поля до настоящего времени экспериментально не обнаружен.

Электромагнитное взаимодействие характерно для всех частиц, обладающих электрическим зарядом. Квант электромагнитного поля — **фотон** ( $\gamma$ -квант). Фотоны не только осуществляют электромагнитное взаимодействие, но и наблюдаются в качестве свободных частиц (рис. 167, *б*).

Сильное взаимодействие свойственно адронам. Это самый многочисленный класс элементарных частиц. Характерный масштаб массы адронов задается мас-

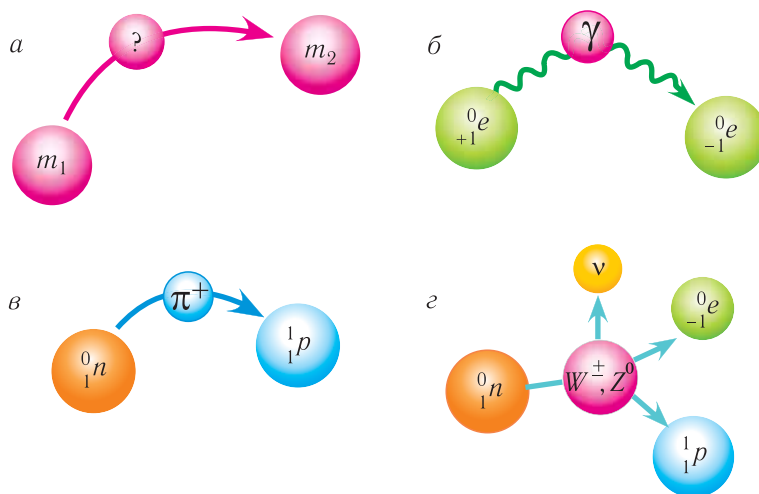


Рис. 167. Обменный характер фундаментальных взаимодействий

сой протона  $m_p$ . Наименьшую массу среди адронов имеет  $\pi$ -мезон ( $\approx \frac{1}{7}m_p$ ), наибольшую —  $\Upsilon$ -мезон ( $\approx 10m_p$ ).

Адроны делятся на два класса:

с целым спином — **мезоны (бозоны)**;

с полуцелым спином — **фермионы (барионы)**.

Среди элементарных частиц выделяют *фундаментальные* и *составные*. К фундаментальным элементарным частицам относятся лептоны и кварки, а к составным — барионы и мезоны. **Кварки** обнаружены внутри протонов и нейтронов, но не существуют в свободном состоянии. Они имеют заряд  $+\frac{2}{3}e$  или  $-\frac{1}{3}e$  и являются составными частями адронов. Барионы состоят из трех различных кварков, мезоны — из кварка и антикварка. Кварки в адронах взаимодействуют посредством глюонов. Объяснение кварковой структуры составных частиц возможно только при наличии у кварка цветового заряда.

В современной теории сильного взаимодействия — *квантовой хромодинамике* — частицы, переносящие сильное взаимодействие, получили название **глюоны** (от англ. glue — клей) (рис. 167, в). Глюоны являются электрически нейтральными частицами с нулевой массой покоя и переносят сильное взаимодействие между кварками. Они не существуют в свободном виде, а проявляются только в процессах рождения и уничтожения барионов и мезонов.

Кварки и глюоны обладают особым квантовым числом — цветом (цветовым зарядом). Есть шесть типов («ароматов») кварков —  $u, d, s, c, b, t$ , каждый из которых существует в трех «цветовых» видах — «зеленом», «синем», «красном». Глюоны имеют 8 цветов. Обмен глюонами между кварками меняет цвет кварка. Составные частицы не несут цветового заряда, т. е. являются бесцветными.

Бозоном сильного взаимодействия являются **мезоны** (от греч. μέσος — средний).

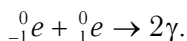
К неучаствующим в сильном взаимодействии лептонам относятся электрон  $e^-$ , электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюон  $\mu^-$ , мюонное нейтрино  $\nu_\mu$ , таон  $\tau^-$ , таонное нейтрино  $\nu_\tau$  и их античастицы. Массы лептонов составляют  $\leq 0,1m_p$  (исключение  $\tau$ -лептон). Для выделения лептонов как группы элементарных частиц им приписывают лептонный заряд.

Слабое взаимодействие характерно для всех элементарных частиц. Переносчиками слабого взаимодействия между лептонами и кварками являются **тяжелые бозоны**  $W^\pm, Z^0$  (рис. 167, г).

В соответствии с действующими в микромире законами сохранения (энергии, импульса, электрического, барионного, лептонного зарядов) возникновение античастиц происходит только в парах с частицами. Поэтому все заряженные частицы существуют парами. Это так называемый принцип зарядового сопряжения. Оказалось, что у всех частиц имеются **античастицы**. Все характеристики частиц и античастиц одинаковы, но заряды (магнитные моменты) противоположны по знаку. Исключение — фотон,  $\pi^0$ -мезон,  $\eta^0$ -мезон — истинно нейтральные частицы, т. е. полностью совпадающие со своими античастицами.

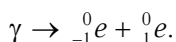
Существование первой античастицы — позитрона (от лат. positus — положительный) предсказал Поль Дирак в 1928 г. В 1932 г. К. Андерсон обнаружил позитрон, исследуя космические излучения.

При столкновении медленно движущихся электрона и позитрона они аннигилируют (от лат. nihil — ничто) и возникают обычно два фотона (рис. 168, а)



Образование при аннигиляции именно двух (редко трех) фотонов является следствием закона сохранения импульса. Фотоны обладают импульсом, модуль которого  $p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c}$ . При медленно движущихся электроне и позитроне образовавшиеся фотоны должны разлетаться в противоположных направлениях так, чтобы их суммарный импульс оказался равным нулю, а энергия каждого из фотонов  $E_\gamma = 0,511$  МэВ.

Возможен и обратный процесс рождения электронно-позитронной пары в поле ядра за счет энергии фотонов:



Схематическое изображение такого процесса показано на рисунке 168, б.

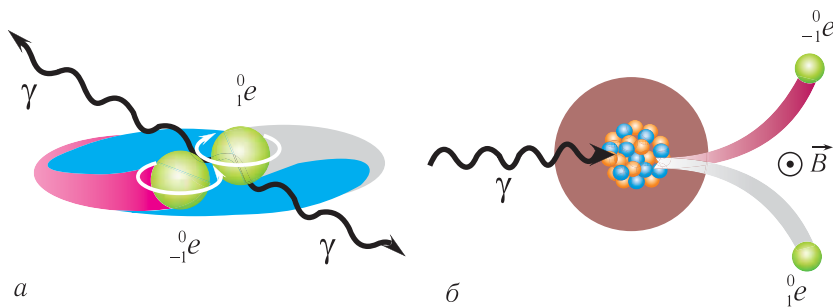


Рис. 168. Аннигиляция электрона и позитрона при столкновении (а); рождение электрон-позитронной пары из  $\gamma$ -кванта в поле ядра (б)

Для образования электронно-позитронной пары энергия фотона должна быть не меньше полной энергии покоя электрона и позитрона, т. е.

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2.$$

С учетом того, что массы электрона и позитрона одинаковы ( $m_e = m_{+e} = 0,00055$  а. е. м.), для их образования необходима энергия  $E = 2 \cdot 0,511$  МэВ.

Общее число элементарных частиц с античастицами около 500. Из них 30 — относительно стабильные, со временем жизни не менее  $10^{-17}$  с, и более 400 — короткоживущие, со временем жизни  $10^{-23}$  с. Время жизни элементарной частицы зависит от природы (интенсивности) взаимодействия. Так, самый быстрый распад обусловлен сильным взаимодействием — время жизни частицы оказывается настолько малым ( $10^{-22} — 10^{-24}$  с), что для подобных частиц исторически сложилось название резонансы. А при медленных распадах, обусловленных слабым взаимодействием, время жизни частиц  $10^{-10}$  с и более. При распадах под воздействием электромагнитных взаимодействий время жизни частиц занимает промежуточное положение —  $10^{-16} — 10^{-19}$  с.

В настоящее время сложилась общепринятая теория наиболее общих типов элементарных частиц и их взаимодействий, которая называется *стандартной моделью* (рис. 169).

**Стандартная модель** элементарных частиц — теоретическая конструкция в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц. Экспериментальное подтверждение существования промежуточных векторных бозонов в середине 1980-х годов и подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 г. завершило экспериментальное обнаружение предсказываемых стандартной моделью элементарных частиц.



П. В. Хиггс (английский физик-теоретик) известен благодаря предложенному им в 1960-х гг. механизму спонтанного нарушения электрослабой симметрии, объясняющему происхождение массы элементарных частиц, в частности масс векторных  $W$ - и  $Z$ -бозонов.

**Бозон Хиггса** — элементарная частица или элементарный бозон, который обладает нулевым спином. В рамках стандартной модели именно бозон Хиггса «отвечает» за наличие массы у элементарных частиц.



Бозон Хиггса первоначально был предсказан в 1964 г. теоретически. 4 июля 2012 г. сообщалось, что на обоих основных детекторах Большого адронного коллайдера наблюдалась новая частица. 14 марта 2013 г. было подтверждено, что найденная полугодом ранее частица действительно является бозоном Хиггса.

*Три поколения  
материи (фермионы)*

	I	II	III	
Масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
Заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Название →	верхний	очаровательный	истинный	фотон
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b><math>\gamma</math></b>
Кварки	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	нижний	странный	прелестный	глюон
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b>g</b>
Лептоны	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау-нейтрино	Z-бозон
	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	<b><math>Z^0</math></b>
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электрон	мюон	тау	W-бозон
	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>	<b><math>W^\pm</math></b>

*Калибровочные бозоны  
(переносчики взаимодействия)*

Рис. 169. Таблица элементарных частиц

Согласно стандартной модели существуют два основных вида фундаментальных элементарных частиц: фермионы и бозоны. Фермионы являются элементарными «кирпичиками» окружающего нас вещества, а бозоны — переносчиками взаимодействий между фермионами.

**Фундаментальная частица** — бесструктурная элементарная частица, которую до настоящего времени не удалось описать как составную. В настоящее время данный термин применяется для **6 лептонов** (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино) и **6 кварков** (u, d, s, c, b, t). Все эти частицы являются фермионами со спином  $\frac{1}{2}$  и естественным образом организуются в три поколения (см. рис. 169). Вместе с античастицами фермионы составляют набор из 24 фундаментальных частиц в совокупности с калибровочными бозонами (частицами-переносчиками фундаментальных взаимодействий).

Между фундаментальными фермионами действуют три типа сил — электромагнитные, слабые и сильные. Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряженные лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях. Сильное взаимодействие связывает кварки в адроны — составные частицы, состоящие из кварков в разных комбинациях.

Взаимодействие частиц, имеющих электрический заряд, происходит путем обмена фотонами — квантами электромагнитного поля. Сильное взаимодействие осуществляется за счет обмена глюонами — переносчиками сильного взаимодействия. Переносчиками слабого взаимодействия являются  $W^{\pm}$ ,  $Z^0$ -бозоны.



Название «кварк» было заимствовано М. Гелл-Маном из книги Джеймса Джойса «Поминки по Финнигану». По-немецки «кварк» — «творог», но в романе это слово означает нечто двусмысленное и таинственное. Скорее всего этот термин прижился потому, что соответствует «таинственной» роли кварков в физике.



1. Какая частица называется элементарной?
2. Какие частицы участвуют в сильном взаимодействии?
3. Как называется современная теория сильного взаимодействия?
4. Как называются частицы, посредством которых передается сильное взаимодействие?
5. В каком взаимодействии участвуют лептоны?
6. Какая античастица была открыта первой?
7. Перечислите все стабильные элементарные частицы.
8. Все ли элементарные частицы имеют античастицу?
9. Чем отличается античастица от частицы?
10. Сколько типов кварков известно в настоящее время?
11. Что описывает стандартная модель элементарных частиц?
12. Какие элементарные частицы считаются фундаментальными?

## § 44. Ускорители заряженных частиц

Для получения пучков заряженных частиц с энергией, достаточной для проникновения в любое атомное ядро, созданы ускорители заряженных частиц, в которых ядра атомов или электроны с помощью электрических и магнитных полей разгоняются до энергий от десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт.

Частицы высоких энергий, т. е. разогнанные до скоростей, близких к скорости света, находят широкое применение в физических исследованиях и в технике. Использование таких частиц в качестве «снарядов» для изучения столкновений ядерных частиц позволило получить богатую информацию об атомных ядрах и элементарных частицах.



Простейший способ получения таких высокоэнергетических частиц состоит в ускорении их с помощью электрических полей высоких и сверхвысоких напряжений.

По форме траекторий движения частиц ускорители делятся на *линейные* и *циклические*. В линейных ускорителях траектории движения частиц близки к прямым линиям, в циклических они являются окружностями или спиралями.

По типу ускоряемых частиц различают *электронные* ускорители, *протонные* и ускорители *ионов*.

Многообразие существующих типов ускорителей можно разделить на четыре группы: ускорители прямого действия, линейные ускорители, циклические ускорители и ускорители на встречных пучках.

Наиболее просты по принципу работы *ускорители прямого действия*. В них частицы разгоняются в постоянном электрическом поле. В данном случае не удастся достичь энергий выше 10 МэВ, поскольку при дальнейшем повышении напряжения между электродами возникает электрический пробой.

В линейном ускорителе частицы движутся по прямой линии, последовательно проходя через систему трубчатых электродов, называемых трубками дрейфа, на которые подается переменное напряжение (рис. 170). Внутри трубок поля нет, там частица движется равномерно.

Частица ускоряется тогда, когда она попадает в промежуток между соседними трубками дрейфа, который называют ускоряющим промежутком. Для ускорения частицы необходимо, чтобы время пролета частицы от одного промежутка к другому равнялось половине периода  $T$  переменного напряжения, т. е. длина  $n$ -трубки должна быть  $l_n = \frac{v_n T}{2}$ , где  $v_n$  — модуль скорости частицы в трубке. Для уменьшения длины ускорителя трубки дрейфа должны быть как можно более короткими, для этого приходится увеличивать частоту ускоряющего поля. В протонных ускорителях используют частоты 200—300 МГц, а в электронных — еще большие. Большинство существующих линейных ускорителей позволяют достигать энергии электронов до 10 ГэВ. В ускорителе в г. Стэнфорде (США), длина которого 3 км, достигнута энергия 20 ГэВ.

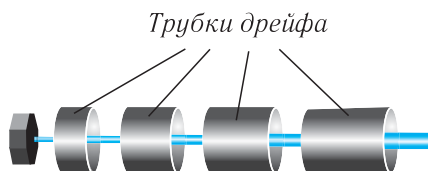


Рис. 170. Линейный ускоритель



Самый крупный из построенных протонных линейных ускорителей работает в г. Лос-Аламосе (США). Он ускоряет протоны до энергии 800 МэВ при силе тока в пучке около 1 мА.

Простейшим представителем и родоначальником циклических ускорителей является *циклотрон* (рис. 171, а).

В циклотроне используется независимость частоты обращения частиц в магнитном поле от их энергии. Частицы движутся по траекториям, представляющим собой раскручивающиеся спирали, многократно возвращаясь к одним и тем же ускоряющим узлам. Для искривления траектории частицы применяют однородное магнитное поле  $B$ , перпендикулярное направлению движения частиц. В зазор между полюсами электромагнита помещают вакуумную камеру, внутри которой находятся электроды 1 (дуанты), напоминающие по форме половинки полого плоского цилиндра (рис. 171, б).

Пока частица движется внутри дуанта, модуль ее скорости постоянен. Когда частица массой  $m$  и зарядом  $q$  проходит промежуток между дуантами, она испытывает действие электрического поля и ускоряется. Поэтому во второй дуант частица попадет, имея уже большую скорость, и движется по окружности большего радиуса  $R = \frac{mv}{qB}$ . Поскольку время движения частицы  $\Delta t = \frac{\pi m}{qB}$  внутри дуанта не зависит от радиуса траектории, то период изменения высокочастотного напряжения, подаваемого на дуанты, удобно подобрать равным

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

В этом случае частицы будут ускоряться всякий раз, попадая в промежуток между дуантами. В конце они попадают либо на мишень, установленную внутри циклотрона, либо выводятся из него и направляются на внешнюю мишень 2 (см. рис. 171, б).

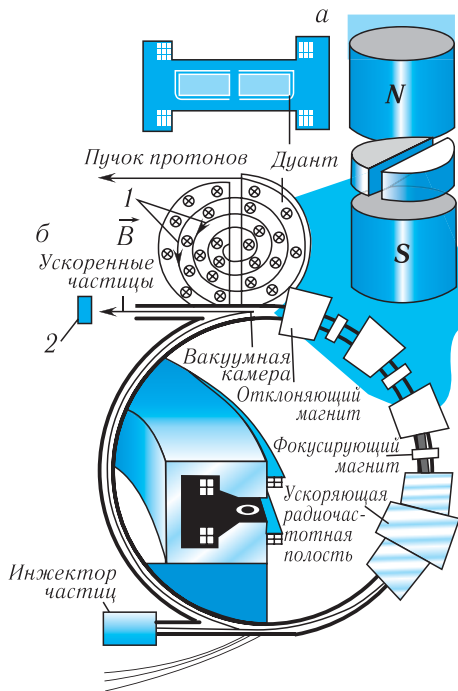


Рис. 171. Циклотрон: а — общий вид; б — функциональная схема

Максимальную энергию частиц можно рассчитать по формуле:

$$W_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2 B^2 R_{\max}^2}{m},$$

где  $R_{\max}$  определяется радиусом дуанта.



Первый циклотрон был построен в 1932 г. в Калифорнийском университете в г. Беркли (США) Э. Лоуренсом.

Циклотроны применяют для ускорения протонов и ионов. Они позволяют достичь энергий в несколько десятков мегаэлектронвольт.



Типичный циклотрон средней величины ( $B = 1,0$  Тл,  $R = 0,50$  м) при ускорении ионов водорода ( $\frac{e}{m} = 0,96 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ ) позволяет достичь их максимальной энергии  $W_{\max} = 12$  МэВ.

Для ускорения тяжелых частиц до предельно больших скоростей используют *синхрофазотроны* — кольцевые ускорители, у которых в процессе ускорения в строгом соответствии друг с другом меняются одновременно и модуль индукции магнитного поля, и частота ускоряющего напряжения. Это позволяет при росте энергии частиц сохранять постоянным радиус их орбиты и достичь больших энергий. Например, на синхрофазотроне в г. Серпухов (Россия) энергии протонов достигают значения 76 ГэВ.

В обычных ускорителях пучок ускоренных частиц направляют на неподвижную мишень. При этом основная часть их энергии переходит в кинетическую энергию движения частиц — мишеней.

В *ускорителе на встречных пучках* используют взаимодействие движущихся навстречу друг другу частиц в пучках 1 и 2 (рис. 172). Это позволяет в области пересечения пучков 3 достичь такой энергии их взаимодействия, которая эквивалентна энергии нескольких тысяч гигаэлектронвольт в обычном ускорителе. Данный факт позволяет эффективно использовать подобные ускорители для исследования внутренней структуры частиц и динамики их превращений.

Развитие ускорителей идет как по пути увеличения энергии ускоренных частиц, так и по пути улучшения характеристик ускоренного пучка.

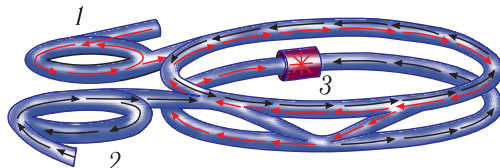


Рис. 172. Ускоритель на встречных протонных пучках



Рис. 173. Большой адронный коллайдер

Пробный запуск самого большого в мире ускорителя элементарных частиц — *большого адронного коллайдера* (БАК) — состоялся 10 сентября 2008 г., официальное открытие — 21 октября 2008 г. **Большой адронный коллайдер (БАК)** — это устройство для концентрации энергии в очень малой области пространства (рис. 173). Энергии частиц в БАКе измеряются в *тераэлектрон-вольтах*.



БАК, длина окружности которого 27 км, установлен в туннеле, находящемся на глубине от 50 до 150 м от поверхности земли. Он расположен между горой Юра во Франции и Женевским озером в Швейцарии. Туннель был построен в 1980 г. для предыдущего большого ускорителя — большого электрон-позитронного коллайдера.

В БАКе сталкиваются пучки одинаковых частиц — протонов или ионов свинца. Пучки создаются в существующем циклическом ускорителе и вводятся в БАК, где они движутся по окружности и могут делать до миллиона оборотов. На каждом круге пучки получают дополнительную энергию. Два сталкивающихся протона будут иметь общую энергию 14 ТэВ. Эта энергия в 10 раз больше, чем в настоящее время достигается в протон-антипротонном коллайдере в национальной лаборатории Ферми в США.

Без ускорителей не было бы возможности изучать фундаментальные свойства и взаимодействие элементарных частиц. Большинство элементарных частиц было открыто с помощью ускорителей частиц высоких энергий.

Ускорители относительно невысоких энергий широко применяются в медицине и технике — для лечения онкологических заболеваний, производства радиоактивных изотопов, улучшения свойств полимерных материалов.

Совершенствование ускорителей преобразует не только физику, но также технику и технологию. Современные производство и медицину невозможно представить без таких ускорителей, как ускорители для модификации свойств материалов (резина, полиэтилен и т. д.), ускорители для стерилизации (пищевая промышленность, животноводство, медицина), ускорители для наработки радиоактивных изотопов и для облучения больных (диагностика, терапия).

Для прикладных целей не нужно ускорять частицы до сверхвысоких энергий. Энергии электронов обычно не превышают 10 МэВ. Для производства радио-

нуклидов нужны протоны или дейтроны с энергией до 70 МэВ, а в лучевой терапии используются электроны с энергией до 50 МэВ и протоны, ускоренные до 200—250 МэВ.



Ускорители широко применяются для внедрения (имплантации) примесных ионов в полупроводниковой микроэлектронике, причем глубина внедрения ионов зависит от их энергии.

Активно используются заряженные частицы в медицине. В кардиологии с их помощью устанавливают проходимость кровеносных сосудов, питающих сердечную мышцу. В онкологии воздействие пучков заряженных частиц применяют для разрыва межмолекулярных связей, в результате чего живая раковая клетка либо разрушается, либо теряет способность к воспроизводству. Поэтому лучевая терапия — один из важных методов борьбы с онкологическими заболеваниями.



1. Назовите ускорители заряженных частиц и охарактеризуйте их.
2. Выведите условие ускорения частиц в циклотроне.
3. В каких областях науки, техники, медицины, промышленности применяются ускорители заряженных частиц?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 7

Ядерная физика изучает атомные ядра. Протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — **нуклона**.

Число протонов в ядре называется **атомным номером** и обозначается буквой  $Z$ . Общее число нуклонов называется **массовым числом** и обозначается буквой  $A$ . Число нейтронов в ядре  $N = A - Z$ .

**Ядерные силы** — короткодействующие силы притяжения действуют только между данным нуклоном и его непосредственными соседями.

Под **энергией связи** атомных ядер понимается энергия, необходимая для разделения ядра на отдельные нуклоны:

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2.$$

**Дефект масс** — разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

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

Характеристикой прочности (связанности) ядер служит **удельная энергия связи ядра**, т. е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

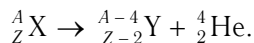
$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

**Ядерными реакциями** называют процессы изменения атомных ядер, вызванные их взаимодействиями с элементарными частицами или друг с другом. Энергия, освобождающаяся при ядерной реакции, т. е. разность энергий покоя ядер и частиц до и после взаимодействия, называется **энергетическим выходом ядерной реакции**.

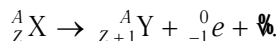
**Радиоактивность** — явление самопроизвольного превращения ядер, сопровождающееся испусканием частиц или ядер или коротковолновым электромагнитным излучением.

Радиоактивный распад ядер сопровождается испусканием  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -излучения.

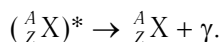
При  $\alpha$ -распаде продуктом распада оказываются изотопы с числом протонов  $Z - 2$  с испусканием  $\alpha$ -частицы:



При  $\beta^-$ -распаде образуются изотопы с атомным номером  $Z + 1$ :



Испускание  $\gamma$ -излучения не приводит к превращениям элементов:



**Закон радиоактивного распада:**

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

**Цепной реакцией** называется процесс, в котором продукты определенной реакции вызывают последующие реакции такого же типа.

**Критической массой** называется минимальная масса ядерного горючего, необходимая для поддержания цепной реакции.

**Ядерным реактором** называется устройство, в котором может происходить самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов.

Одним из видов ядерных реакций являются реакции синтеза легких ядер, эффективно протекающие при сверхвысоких температурах порядка  $10^9$  К и самоподдерживающиеся за счет значительного выделения в них энергии. Такие реакции названы **термоядерными**.

**Ионизирующими** называют излучения, взаимодействие которых с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул.

Количество энергии, переданной организму ионизирующим излучением, называется **дозой**.

Приборы для регистрации ионизирующих излучений называют **детекторами**.

**Элементарные частицы** — первичные, неразложимые далее частицы, которые нельзя считать соединением других частиц, существующих в свободном состоянии. Основными характеристиками элементарных частиц являются их масса, электрический заряд, время жизни, спин.

Для всех элементарных частиц характерна способность испускаться и поглощаться (рождаться и уничтожаться) при взаимодействии с другими частицами. Различают четыре типа **фундаментальных** взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое.

Механизм всех взаимодействий — *обменный*, т. е. взаимодействие между двумя частицами осуществляется в результате их обмена промежуточной частицей — переносчиком взаимодействия.

Электромагнитное взаимодействие характерно для всех частиц, обладающих электрическим зарядом. Квант электромагнитного поля — **фотон**.

Сильное взаимодействие (на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м) свойственно **адронам**. Частицы, переносящие сильное взаимодействие, получили название **глюоны**.

Слабое взаимодействие (на расстояниях порядка  $10^{-18}$  м) характерно для любых элементарных частиц. Переносчиками слабого взаимодействия между лептонами и кварками являются **тяжелые (векторные) бозоны**  $W^{\pm}$ ,  $Z^0$ .

Каждой элементарной частице соответствует своя **античастица**.

Общее число элементарных частиц с античастицами около 500.

В настоящее время известно 36 кварков и антикварков, 8 глюонов, 12 лептонов  $W^{\pm}$ ,  $Z^0$ -частицы и фотон, т. е. число фундаментальных элементарных частиц оказывается равным 60.

В микромире выполняются фундаментальные законы сохранения энергии, импульса и электрического, барионного и лептонного зарядов.

# Глава 8

## Основы единой физической картины мира

### § 45. Современная естественнонаучная картина мира

Главная цель естественных наук — раскрыть единство сил Природы.

*Л. Больцман*

Наиболее непознаваемым явлением природы является тот факт, что она познаваема.

*А. Эйнштейн*

Физика, являясь центральной наукой о природе, дает человеку знания об окружающем его мире, позволяя тем самым, с одной стороны, решать проблемы цивилизации, а с другой стороны, беречь нашу планету для будущих поколений. Как объединить накопленные знания? Что сегодня должен знать каждый образованный человек о физических явлениях?

В курсе физики вы познакомились с различными видами взаимодействий тел и объектов в природе, определяющих не только разнообразие физических явлений окружающего нас мира, но и направление эволюции Вселенной. Физика — наука о природе, однако каждый ее раздел подробно рассматривает физические явления только с одной стороны, выделяя те или иные свойства материи по определенному признаку. Познание законов природы исторически также шло в основном на базе того или иного физического подхода.

По мере накопления знаний человечество стремилось соединить все разрозненные факты и законы в рамках обобщенной научной **картины мира**. Под картиной мира понимают совокупность теорий, законов и принципов, описывающих окружающий нас мир.

Первая, **механическая картина** мира была основана на классической механике И. Ньютона. В основе построения этой картины мира лежало объяснение причин и установление закономерностей механического движения небесных тел, а также макро- и мегасистем (Земля, Луна, Солнце, Солнечная система, Галактика). В качестве первопричины механического движения рассматривалось гравитационное взаимодействие между телами, бесконечно быстро передаваемое на любые расстояния во Вселенной.

Напомним, что на основании силовых или энергетических представлений можно установить законы движения различных объектов: от атомов и молекул до

Правообладатель Народная асвета



планет и звезд. Важнейшую роль играют принципы инерции и относительности, введенные в механику Г. Галилеем.

На основе механической картины мира в XVIII — XIX вв. были разработаны земная, небесная и молекулярная механики. Однако в то же время в физике накапливалось значительное количество экспериментальных данных, противоречащих идеям атомизма (дискретности строения вещества), которые лежали в ее фундаменте.

Изучение электрических и магнитных взаимодействий существенно изменило представления о материи и привело к появлению **электромагнитной картины** мира. В ее основе лежали представления о мире, в котором все явления описываются с помощью сил (гравитационных и электромагнитных). Основной вклад в создание электродинамики внесли Ш. Кулон (электростатические взаимодействия), А. Вольта (источник постоянного тока), А. Ампер (магнитные поля и токи), М. Фарадей (электромагнитная индукция), Дж. Максвелл (теория электромагнетизма), Г. Герц (открытие электромагнитных волн) и Г. Лоренц (классическая электронная теория строения вещества).

М. Фарадей пришел к мысли о необходимости замены дискретных (корпускулярных) представлений о материи непрерывными (континуальными). Материя по Фарадею представлялась как непрерывное бесконечное поле с силовыми точечными центрами. Дж. Максвелл создал математическую теорию электромагнитного поля. На основании этой теории он сделал вывод, что распространение электромагнитного возмущения происходит с конечной скоростью в виде электромагнитных волн. Новая картина мира сменила и принципы передачи взаимодействия: они передаются посредством поля непрерывно от точки к точке и с конечной скоростью. Как следует из электромагнитной картины мира, внутреннее строение вещества определяется действием электромагнитных сил.

Фактическим завершением формирования электромагнитной картины мира стала специальная теория относительности А. Эйнштейна. Он дополнил законы электродинамики идеей относительности как пространства, так и времени.

Однако на рубеже XIX — XX в. обнаружился ряд теоретических проблем и экспериментальных фактов, которые не находили объяснения в рамках электромагнитной картины мира: радиоактивность, тепловое излучение, атомные спектры, устойчивость атомов.

Первые радикальные шаги в создании **квантово-полевой** картины мира были сделаны в начале XX в.: квантование излучения в процессах испускания, поглощения и распространения (М. Планк, А. Эйнштейн); стационарные состояния электронов в атоме (Н. Бор); совершенно фантастическая для своего времени

идея корпускулярно-волнового дуализма (Л. де Бройль) и, наконец, создание квантовой механики (Э. Шредингер, В. Гейзенберг, П. Дирак, В. Паули).

Изучение строения атомного ядра (Э. Резерфорд, П. Кюри и М. Склодовская-Кюри, Дж. Чедвик) привело к становлению физики атомного ядра и элементарных частиц. Были открыты принципиально новые типы взаимодействий, свойственные только микромиру субатомных частиц, — сильное и слабое. Энергия ядерных реакций была поставлена на службу людям (Э. Ферми, И. Курчатов).

Особенностью **современной** физической картины мира является ее вероятностный характер, который выражается в виде статистических законов. Здесь, в отличие от механической картины мира, нет «жесткой определенности будущего». Случайность событий выступает как объективное свойство материи. В современной физике основным материальным объектом является квантовое поле, переход которого из одного состояния в другое и приводит к появлению частиц.

Отметим две закономерности, присущие развитию физики как таковой. Первая выражена принципом соответствия: частные теории, справедливость которых экспериментально подтверждена, с появлением более общих теорий сохраняют свое значение как частный или предельный случай. Примером может служить специальная теория относительности, выводы которой при малых скоростях соответствуют выводам механики Ньютона.

Вторая закономерность — интеграция, или взаимопроникновение разделов физики. Например, развитие физики элементарных частиц и ее слияние с астрономией привели к становлению астрофизики, занимающейся закономерностями эволюции звезд и Вселенной.

Квантово-полевая картина мира по мере накопления новых научных фактов и появления новых научных гипотез продолжает развиваться.

Таким образом, под **естественнонаучной картиной мира** понимают совокупное современное знание об окружающем нас мире, накопленное естественными науками: физикой, математикой, химией, биологией. Физическая картина мира является составной частью естественнонаучной картины мира.

Физическая картина мира не исчерпывается представлениями о структурном строении материи. Она проявляется также и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий объектов в окружающем нас мире (частиц, тел, галактик), в природе, по современным данным, присутствуют лишь четыре типа **фундаментальных взаимодействий**. Они различаются по интенсивности и радиусу действия. Именно эти фундаментальные взаимодействия и являются главными «действующими лицами и исполнителями» в построении современной физической картины мира.

Самое слабое из взаимодействий — **гравитационное взаимодействие**. Оно примерно в  $10^{38}$  раз слабее ядерного. Это взаимодействие описывается законом всемирного тяготения, который был открыт И. Ньютоном в 1687 г. Гравитационные силы действуют между любыми телами, в том числе и между элементарными частицами, однако решающую роль они играют лишь у астрономических объектов, имеющих огромные массы.

В **электромагнитном взаимодействии** участвуют любые электрически заряженные частицы и тела, а его «переносчиком» (квантом электромагнитного поля) являются фотоны. Электромагнитные силы обеспечивают возможность стабильного существования атомов, молекул, определяют механические свойства твердых тел, жидкостей и газов.

**Сильное взаимодействие** проявляется при взаимодействиях адронов. В отличие от гравитационного и электромагнитного взаимодействий, которые можно отнести к дальнедействующим, т. е. действующим на расстояниях, характерных для макромира, сильное взаимодействие является короткодействующим, так как оно проявляется на расстояниях не более размеров ядра ( $\approx 10^{-15}$  м). Однако на этих расстояниях сильное взаимодействие значительно интенсивнее электромагнитного и тем более гравитационного, за что и получило свое название. Образно сильное взаимодействие можно назвать «богатырем с короткими руками». Сильные взаимодействия между нуклонами в ядрах атомов обеспечивают устойчивость ядер различных атомов. Согласно современным представлениям сильное взаимодействие переносится квантами нового типа — глюонами, которые подобно фотонам являются безмассовыми частицами.

В **слабом взаимодействии** участвуют любые элементарные частицы, кроме фотонов. Радиус действия слабых сил определяется характерным размером элементарных частиц ( $\approx 10^{-18}$  м). Это взаимодействие сильнее гравитационного, но значительно слабее электромагнитного и сильного взаимодействий. Слабые взаимодействия проявляются при распадах одних элементарных частиц, в результате чего появляются другие элементарные частицы. Таким образом, слабое взаимодействие определяет стабильность элементарных частиц и играет решающую роль при их взаимопревращениях. Оно осуществляется посредством обмена достаточно массивными частицами — векторными бозонами ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ), массы которых составляют около 80 масс протона. Бозоны были экспериментально открыты в 1983 г.

Все многообразие окружающих нас взаимодействий, согласно современной квантово-полевой картине мира, сводится к взаимодействию двух групп квантовых объектов, первую из которых составляют **участники** фундаментальных взаимодействий, а вторую — их **переносчики**.

К участникам взаимодействий относятся лептоны и кварки, которые и являются первичным «строительным материалом» для создания всего материального многообразия в природе. Обмен частицами-переносчиками (гравитон, фотон, глюоны и векторные бозоны) позволяет частицам-участникам осуществлять четыре типа фундаментальных взаимодействий, к которым сводятся все наблюдаемые взаимодействия в природе. Образно можно представить себе окружающий мир как царство «кишащих и взаимодействующих друг с другом» фундаментальных частиц.

На следующем уровне более сложной организации материи располагаются элементарные частицы, составленные из фундаментальных, общее число которых, согласно современным данным, более 500. Далее следуют ядра, состоящие из нуклонов, общее число которых соответствует числу химических элементов и их изотопов — 2000. На следующем этаже организации материи появляются атомы, составленные из ядер и лептонов, количество которых соответствует количеству ядер.

Атомы, взаимодействуя между собой, образуют молекулы, общее число которых оценивается примерно в 10 млн и постоянно возрастает за счет синтеза новых соединений. Молекулы образуют различные вещества, вещества — тела, тела — астрономические объекты, астрономические объекты — Вселенную.

В настоящее время актуальной является проблема **объединения** различных типов фундаментальных взаимодействий в рамках одной теории. Обнадеживающим успехом на этом пути стало объединение электромагнитного и слабого взаимодействий в единое **электрослабое взаимодействие** (рис. 174). На повестке дня — построение теории большого объединения, включающей в себя электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия.

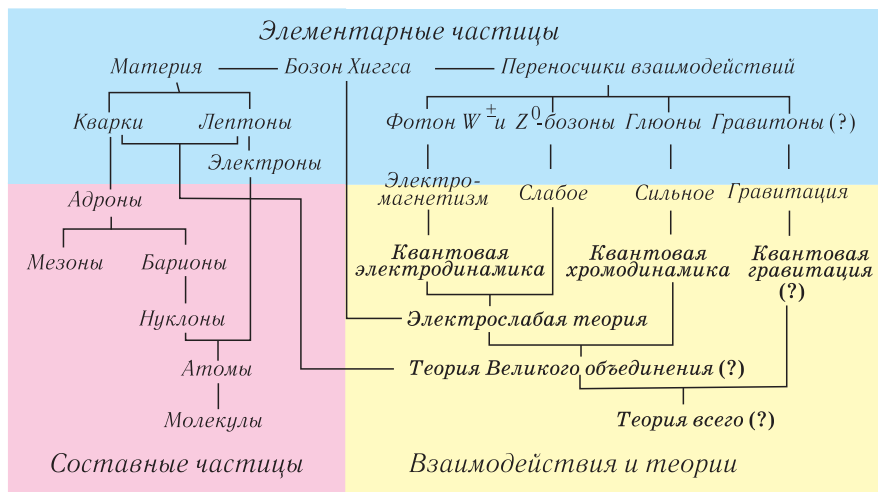


Рис. 174. Элементарные частицы и теории взаимодействий

Еще более грандиозна идея объединения всех четырех фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию, в рамках теории суперобъединения. Эта теория может быть создана на основе новейшей физической теории «суперструн», разработанной американскими физиками М. Грином и Дж. Шварцем, объединяющей все фундаментальные взаимодействия при сверхвысоких энергиях.

Помимо построения современной физической картины мира, которая является составной частью современной естественнонаучной картины мира, физика сформулировала ряд принципов, которые являются общими для любого научного исследования, т. е. они могут считаться философскими принципами. Сюда следует отнести принцип **причинности**, принцип **относительности**, принцип **сохранения**, принцип **инвариантности**, принцип **дополнительности**, принцип **соответствия** и некоторые другие.

**Современная естественнонаучная картина мира** в соответствии с принципом дополнительности базируется на новейших достижениях естественных наук. Соответственно, можно сказать, что современная физическая картина мира является фрагментом естественнонаучной картины мира.



1. Что понимают под научной картиной мира?
2. Что называется механической картиной мира? На чем она базируется?
3. Перечислите основные понятия и законы электромагнитной картины мира. Когда она возникла?
4. Какие научные открытия положены в основу квантово-полевого картины мира?
5. Что является основным материальным объектом в современной физической картине мира?
6. Какие частицы являются переносчиками фундаментальных взаимодействий?
7. Каково количество фундаментальных частиц согласно современным представлениям?
8. Каково количество известных сегодня элементарных частиц? Ядер? Атомов? Молекул?
9. В чем заключается сущность теории большого объединения? Суперобъединения?
10. Какие общенаучные (философские) принципы были сформулированы в современной физической картине мира?

## САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 8

Различают четыре типа **фундаментальных** взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое.

В микромире выполняются фундаментальные законы сохранения **энергии, импульса, электрического, барионного и лептонного зарядов**.

Электромагнитное и слабое взаимодействия являются проявлением единого **электрослабого взаимодействия**.

В настоящее время актуальна проблема построения теории **большого (великого) объединения**, которая могла бы описать все типы существующих взаимодействий.

## Лабораторный эксперимент

### Лабораторная работа 1

#### Изучение колебаний математического маятника

**Цель работы:** исследование зависимости характеристик нитяных маятников от длины нити, массы грузов, амплитуды колебаний.

**Приборы и принадлежности:** два нитяных маятника с подвесами для них (шарики различной массы), штатив с зажимом, метровая линейка с миллиметровыми делениями, секундомер или часы с секундной стрелкой, весы, разновес.

#### Расчетная формула

$$T = \frac{t}{n}.$$

#### Порядок выполнения работы

1. Поставьте штатив на край стола.  
2. Закрепите в зажиме штатива подвес для маятника так, чтобы он выступал за край стола (рис. 175), и зажмите в нем свободный конец нити длиной не менее 1 м. Отведите шарик в сторону и отпустите его: маятник начнет колебаться.

3. Исследуйте, зависит ли период колебаний математического маятника от амплитуды. Для этого отведите шарик вдоль стола в сторону на расстояние  $\approx 10$  см и осторожно отпустите его, стараясь избегать боковых толчков. Измерьте время 40 полных колебаний маятника. Определите период колебаний. Повторите измерения не менее 4 раз и результаты занесите в таблицу. Определите период колебаний этого же маятника, отклоняя шарик на 20 см и 30 см. Результаты измерений занесите в таблицу. По результатам измерений сделайте вывод: зависит ли период колебаний математического маятника от амплитуды колебаний  $T(A)$ .

4. Возьмите второй маятник той же длины, но с шариком иной массы. Повторяя процедуру, описанную в предыдущем пункте, определите период колебаний маятника с новым шариком. Сравните его с периодом, найденным в предыдущем пункте, и сделайте вывод: зависит ли период колебаний от массы шарика  $T(m)$ .

5. Измените длину маятника, взяв ее равной 75 см и 50 см, и снова определите период колебаний маятника так же, как описано в пункте 3. По результатам измерений сделайте вывод: зависит ли период колебаний маятника от его длины  $T(l)$ .

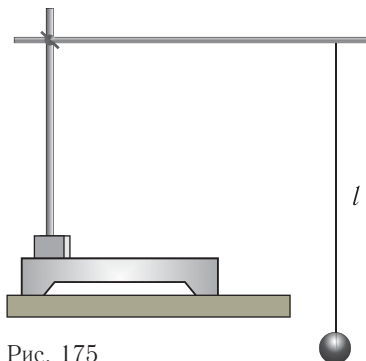


Рис. 175

Таблица измерений и вычислений

№ опыта	$n$	$l$ , м	$\Delta l$ , м	$t$ , с	$\Delta t$ , с	$T$ , с
Не менее 5 опытов						
Среднее значение						

**Контрольные вопросы**

1. Какую длину имеет математический маятник, период колебаний которого 1 с?
2. Вычислите период колебаний математического маятника длиной 64 см.
3. Определите экспериментально период колебаний маятника длиной 64 см и сравните с найденным значением.

**Выводы****Лабораторная работа 2****Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки**

**Цель работы:** измерение длины световой волны для красной и фиолетовой границ спектра с использованием дифракционной решетки с известным периодом.

**Приборы и принадлежности:** прибор для определения длины световой волны (рис. 176, а), лампа накаливания, дифракционная решетка.

**Расчетная формула**

Длина волны  $\lambda$  для дифракционного максимума первого порядка определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{d l}{L}, \quad (1)$$

где  $d$  — период решетки,  $\frac{l}{L} = \tan \theta \approx \sin \theta$  (из-за малости угла  $\theta$ ) (рис. 176, б).

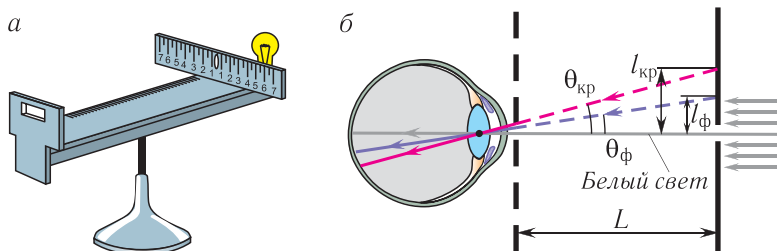


Рис. 176

В работе источником света служит узкая щель в экране прибора для измерения длины световой волны.

### **Порядок выполнения работы**

1. Установите экран на расстоянии 45—50 см от дифракционной решетки.  
2. Включите лампу и расположите ее за экраном со щелью. Добейтесь наилучших условий видимости спектра, изменяя взаимное расположение экрана и лампы.

3. Измерьте  $L$  не менее 5 раз, рассчитайте среднее значение расстояния  $\langle L \rangle$  от дифракционной решетки до экрана. Данные занесите в таблицу.

4. Измерьте расстояния от центра щели в экране до красного  $l_{\text{кр}}$  и фиолетового  $l_{\text{ф}}$  краев спектра. Эти расстояния измерьте справа и слева от щели на экране и найдите их средние значения  $\langle l_{\text{кр}} \rangle$  и  $\langle l_{\text{ф}} \rangle$ .

5. По измеренному расстоянию  $\langle l_{\text{кр}} \rangle$  от центра щели в экране до положения красного края спектра и расстоянию  $\langle L \rangle$  от дифракционной решетки до экрана вычислите  $\sin \theta_{\text{кр}}$ , под которым наблюдается соответствующая полоса спектра:

$$\sin \theta_{\text{кр}} \approx \text{tg } \theta_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{кр}}}{L}.$$

6. Вычислите по формуле (1) длину волны  $\lambda_{\text{кр}}$ , соответствующую красной границе воспринимаемого глазом спектра.

7. Определите длину волны  $\lambda_{\text{ф}}$  для фиолетового края спектра.

8. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности измерений длин волн:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle} = \frac{\Delta l}{\langle l \rangle} + \frac{\Delta L}{\langle L \rangle}; \quad \Delta \lambda = \varepsilon_{\lambda} \langle \lambda \rangle.$$

9. Запишите значения длин волн и относительной погрешности их измерения в виде:

$$\lambda = (\langle \lambda \rangle \pm \Delta \lambda) \text{ м}; \quad \varepsilon_{\lambda} = \dots \%$$

**Таблица измерений и вычислений**

№ опыта	$L$ , м	$l_{\text{кр}1}$ , м	$l_{\text{кр}2}$ , м	$l_{\text{ф}1}$ , м	$l_{\text{ф}2}$ , м	$\langle l_{\text{кр}} \rangle$ , м	$\langle l_{\text{ф}} \rangle$ , м	$d$ , м	$\lambda_{\text{кр}} \cdot 10^7$ , м	$\lambda_{\text{ф}} \cdot 10^7$ , м	$\varepsilon_{\lambda}$ , %	$\Delta \lambda \cdot 10^7$ , м
Среднее значение												



### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса — Френеля.
2. В каком порядке следуют основные цвета в дифракционном спектре?
3. Как изменится характер дифракционного спектра, если использовать решетку с периодом, в два раза большим, чем в вашем опыте? В два раза меньшим?

### Выводы

## Лабораторная работа 3

### Определение показателя преломления стекла

**Цель работы:** изучение преломления света на границе раздела сред воздух — стекло, измерение показателя преломления стекла.

**Приборы и принадлежности:** лабораторный комплект по оптике, лист белой бумаги, линейка, карандаш, транспортир.

### Расчетная формула

В соответствии с законом преломления (рис. 177)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\langle AE \rangle}{\langle DC \rangle} \approx n_2,$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  — углы падения и преломления,  $n_2$  — показатель преломления стекла.

### Порядок выполнения работы

1. Установите источник света на столе. В окно прибора вставьте рамку со щелью. Щель должна быть расположена вертикально.
2. Соберите электрическую цепь, присоединив лампочку к источнику постоянного тока через выключатель. Замокните цепь и получите яркую тонкую полоску света на бумаге (световой пучок).
3. Наблюдайте явление преломления света при различных углах падения. Зафиксируйте ход лучей, используя булавки (рис. 178).

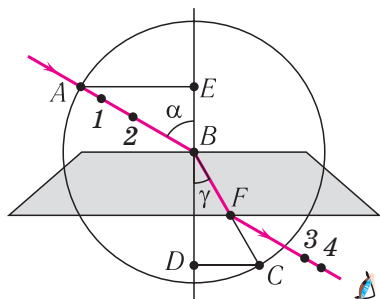


Рис. 177

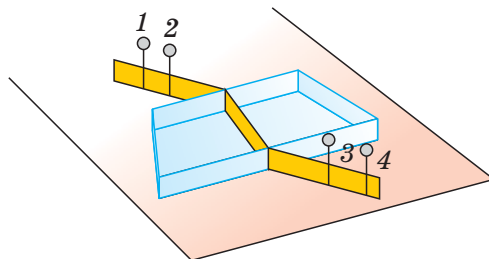


Рис. 178

4. Выполните построение в соответствии с рисунком 177. Измерьте отрезки  $AE$  и  $DC$ . Вычислите их средние значения  $\langle AE \rangle$  и  $\langle DC \rangle$ . Результаты измерений занесите в таблицу.

5. Вычислите значение показателя преломления стекла:

$$\langle n \rangle = \frac{\langle AE \rangle}{\langle DC \rangle}.$$

6. Прodelайте данный эксперимент еще не менее двух раз, меняя угол падения луча на пластинку. Результаты занесите в таблицу.

7. Рассчитайте абсолютные погрешности измерения отрезков:

$$\Delta AE = \Delta_{\text{и}} AE + \Delta_{\text{о}} AE; \quad \Delta DC = \Delta_{\text{и}} DC + \Delta_{\text{о}} DC.$$

8. Вычислите относительную и абсолютную погрешности измерения показателя преломления стекла:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta n}{\langle n \rangle} = \frac{\Delta AE}{\langle AE \rangle} + \frac{\Delta DC}{\langle DC \rangle}; \quad \Delta n = \varepsilon_n \langle n \rangle.$$

9. Запишите значения показателя преломления стекла и относительной погрешности его измерения в виде:

$$n = (\langle n \rangle \pm \Delta n); \quad \varepsilon_n = \dots \%$$

*Таблица измерений и вычислений*

№ опыта	$AE$ , мм	$DC$ , мм	$\langle n \rangle$	$\Delta AE$ , мм	$\Delta DC$ , мм	$\varepsilon_n$ , %	$\Delta n$
Среднее значение							

### **Контрольные вопросы**

1. Запишите формулу для вычисления модуля скорости распространения света в веществе с показателем преломления  $n$ .

2. От чего зависит показатель преломления вещества?

3. В чем заключается явление полного отражения света на границе раздела двух сред?

### **Выводы**

**Суперзадание.** Попробуйте, используя стеклянную пластинку, наблюдать явление полного отражения. Зарисуйте схему для наблюдения данного явления.

Правообладатель Народная асвета

## Лабораторная работа 4

### Определение фокусных расстояний тонких линз

**Цель работы:** определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей и рассеивающей линз.

**Приборы и принадлежности:** лабораторный комплект по оптике, линейка, источник тока, электрическая лампа, ключ, соединительные провода, экран.

#### Расчетные формулы

Фокусное расстояние  $F$  собирающей линзы можно найти из формулы тонкой линзы:

$$F = \frac{df}{d + f}, \quad (1)$$

где  $d$  — расстояние от предмета до линзы,  $f$  — расстояние от линзы до изображения.

Оптическая сила линзы находится из соотношения:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (2)$$

Фокусное расстояние рассеивающей линзы можно определить, если использовать ее вместе с собирающей линзой (рис. 179). Для этого поставим между собирающей линзой и экраном рассеивающую линзу. Действительное изображение источника света при этом смещается. Используя свойство обратимости световых лучей, можно считать, что световые лучи выходят из точки  $S''$ , а в точке  $S'$  получается изображение точки  $S''$ . Обозначив расстояния от точек  $S''$  и  $S'$  до рассеивающей линзы соответственно через  $d$  и  $f$ , модуль фокусного расстояния линзы определяем по формуле:

$$F = \frac{fd}{d - f}. \quad (3)$$

#### Порядок выполнения работы

1. Для определения фокусного расстояния собирающей линзы установите на столе источник света, вставьте в его окно рамку с отверстием в виде стрелки. Установите вдоль одной прямой окно с рамкой, собирающую линзу и экран. Перемещая линзу между источником и экраном, добейтесь четкого изображения стрелки на экране.

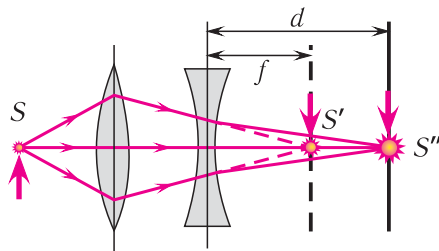


Рис. 179

2. Измерьте расстояние  $d$  от окна прибора до линзы и расстояние  $f$  от линзы до экрана не менее пяти раз. Вычислите средние значения  $\langle d \rangle$  и  $\langle f \rangle$ . Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

3. Вычислите средние значения фокусного расстояния  $\langle F \rangle$  по формуле (1) и оптической силы  $\langle D \rangle$  линзы по формуле (2). Результаты вычислений запишите в таблицу.

4. Поверните линзу к окну и получите на экране изображение далеких предметов за окном. Измерьте расстояние от линзы до экрана и сравните его с полученными ранее значениями фокусного расстояния линзы.

5. Рассчитайте абсолютные погрешности прямых измерений  $\Delta d = \Delta_{\text{и}} d + \Delta_{\text{о}} d$  и  $\Delta f = \Delta_{\text{и}} f + \Delta_{\text{о}} f$ . Результаты занесите в таблицу.

6. Вычислите относительную и абсолютную погрешности косвенных измерений фокусного расстояния собирающей линзы:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} + \frac{\Delta d + \Delta f}{\langle d \rangle + \langle f \rangle}; \quad \Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

7. Сделайте вывод о том, согласуются ли между собой результаты трех экспериментов по определению фокусного расстояния линзы.

8. Запишите значения фокусного расстояния собирающей линзы и относительной погрешности его измерения в виде:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \text{ м}; \quad \varepsilon_F = \dots \%$$

*Таблица измерений и вычислений*

№ опыта	$d$ , м	$f$ , м	$F$ , м	$D$ , дптр	$\Delta d$ , м	$\Delta f$ , м	$\varepsilon_F$ , %	$\Delta F$ , м
Не менее 5 опытов								
Среднее значение								

9. Используя собирающую линзу, получите на экране действительное изображение нити лампы. Поставьте между собирающей линзой и экраном рассеивающую линзу. Измерьте расстояние  $f$  от изображения на экране до рассеивающей линзы не менее пяти раз. Вычислите среднее значение  $\langle f \rangle$ . Результаты занесите в таблицу.

10. Отодвигая экран от рассеивающей линзы, вновь получите четкое изображение нити на экране. Измерьте расстояние  $d$  от экрана до рассеивающей линзы не менее пяти раз. Вычислите среднее значение  $\langle d \rangle$ . Результаты занесите в таблицу.

11. Вычислите средние значения фокусного расстояния  $\langle F \rangle$  и оптической силы  $\langle D \rangle$  рассеивающей линзы. Результаты занесите в таблицу.

12. Вычислите относительную и абсолютную погрешности измерения фокусного расстояния рассеивающей линзы:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} + \frac{\Delta d + \Delta f}{\langle d \rangle - \langle f \rangle}; \quad \Delta F = \varepsilon_F \langle F \rangle.$$

13. Запишите результат измерений в виде:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \text{ м}; \quad \varepsilon_F = \dots \%$$

*Таблица измерений и вычислений*

№ опыта	$d$ , м	$f$ , м	$F$ , м	$D$ , дптр	$\Delta d$ , м	$\Delta f$ , м	$\varepsilon_F, \%$	$\Delta F$ , м
Не менее 5 опытов								
Среднее значение								

### **Контрольные вопросы**

1. В каком случае линзу можно считать тонкой? Ответ обоснуйте.
2. Как отличить собирающую линзу от рассеивающей?
3. Запишите правило знаков для формулы тонкой линзы.
4. Каким образом определялось расстояние до мнимого изображения при выполнении задания?

### **Выводы**

## **Лабораторная работа 5**

### **Наблюдение сплошного и линейчатого спектров**

**Цель работы:** наблюдение сплошного спектра излучения электрической лампы и линейчатых спектров излучения ионизированных газов.

**Приборы и принадлежности:** спектроскоп прямого зрения или спектроскоп двухтрубный, набор спектральных трубок, выпрямитель или аккумуляторная батарея напряжением 6 В, прибор для зажигания спектральных трубок, лампа накаливания на подставке, люминесцентная лампа, ключ, реостат сопротивлением 6—10 Ом, соединительные провода, штатив, набор цветных карандашей (фломастеров), таблицы со спектрами излучения газов (в спектральных трубках).

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с устройством спектроסקопа прямого зрения (рис. 180, а) или спектроסקопа двухтрубного (рис. 180, б).

Спектроскоп прямого зрения состоит из металлической трубки 1, в которой помещена призма 2, собирающая линза 3, закрепленная в подвижном держателе 4 с винтом 5, коллиматорной щели 6 и крышки 7 с окулярным отверстием. При наблюдении спектров спектроскоп направляют коллиматорной щелью на источник света и смотрят в окулярное отверстие. Резкость изображения спектра регулируют передвиганием линзы за головку винта вдоль небольшой прорези в трубке.

Спектроскоп двухтрубный состоит из окуляра 1, зрительной трубы 2, объективов 3, коллиматора 4, щели 5 и микрометрического винта 6. При наблюдении спектров щель направляют на источник света и с помощью объектива и окуляра добиваются появления четкого изображения. Вращением винта меняют диапазон видимой части спектра.

2. Укрепите спектроскоп в штативе таким образом, чтобы щель его коллиматора была расположена вертикально. Перед щелью на расстоянии нескольких сантиметров установите электрическую лампочку на подставке так, чтобы ее нить была на высоте щели. Подключите лампу через реостат к источнику тока.

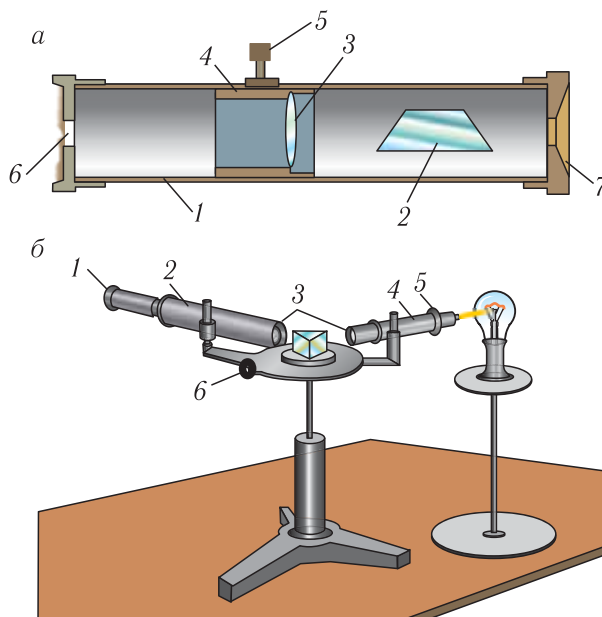


Рис. 180

3. Включите лампу и при полном накале наблюдайте сплошной спектр излучения нити. Уменьшая накал нити, наблюдайте ослабление яркости спектра и постепенное исчезновение спектральных цветов, начиная с фиолетового. Зарисуйте цветными карандашами несколько картин спектров, наблюдаемых вами.

4. Направьте коллиматор спектроскопа на светящуюся люминесцентную лампу, установленную на демонстрационном столе (висящую на потолке), и рассмотрите ее спектр. Зарисуйте наблюдаемую картину спектра. Опишите, чем спектр люминесцентной лампы отличается от спектра лампы накаливания.

5. Вставьте трубку с гелием 1 в держатель 2 прибора для зажигания спектральных трубок и подключите прибор к источнику напряжения 3 (6 В). Зажгите спектральную трубку и рассмотрите в спектроскоп 4 линейчатый спектр излучения гелия (рис. 181). Зарисуйте его цветными карандашами и запишите основные цвета в наблюдаемой последовательности.

6. Повторите наблюдение со спектральной трубкой, наполненной другим газом (водородом, неоном, аргоном, криптоном). Зарисуйте спектр излучения данного газа и запишите основные цвета в наблюдаемой последовательности.

7. Сравните полученные линейчатые спектры излучения с табличными спектрами излучения соответствующих газов. Сделайте выводы.

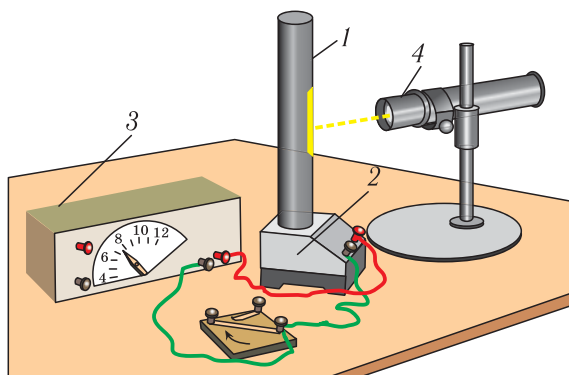


Рис. 181

## Выводы

### Контрольные вопросы

1. Какие вещества дают сплошной спектр?
2. Какие вещества дают линейчатый спектр?
3. Объясните, почему отличаются линейчатые спектры различных газов.
4. Почему отверстие коллиматора спектроскопа имеет форму узкой щели? Изменится ли вид наблюдаемого спектра (если да, то как?), если это отверстие сделать, например, в форме квадрата?

## ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

- Упр. 1.** 1.  $T = 0,33$  с;  $\nu = 3,0$  Гц;  $\omega = 19 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . 2.  $v_{\text{max}} = 0,10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $a_{\text{max}} = 0,22 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . 3.  $x_1 = 8,4$  см.  
4.  $x(t) = 1,0 \sin(\pi t)$  (см);  $x = 1,0$  см;  $\varphi = 2,5\pi$ . 5.  $x(t) = 10 \sin\left(4\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$  (см).
- Упр. 2.** 1.  $T = 8,9$  с;  $\nu = 0,11$  Гц. 2.  $l = 25$  см. 3. Одновременно. 4.  $m = 1,05$  кг. 5. Увеличить.  
6.  $T_1 = 1,6T = 0,99$  с. 7.  $l_2 = 56$  см. 8. Увеличилась в  $n = \sqrt{2} = 1,4$ . 9.  $n = \frac{\sqrt{k_1 k_2}}{k_1 + k_2}$ .
- Упр. 3.** 1.  $W = 80$  мДж. 2.  $W = 2\pi^2 \nu^2 A^2 m$ . 3.  $x_1 = 2,4$  мм. 4.  $n = \frac{1}{8}$ . 5.  $A = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{(W_K)_{\text{max}}}{2m}}$ ;  
 $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(W_K)_{\text{max}}}{m}}$ ;  $x(t) = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{(W_K)_{\text{max}}}{2m}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$ . 6.  $T = 9,1$  с.
- Упр. 4.** 1. Для устранения возможного резонанса. 2.  $l = 14$  см. 3.  $l = 63$  см.
- Упр. 5.** 1.  $v = 75 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 2.  $T = 2,5$  с. 3.  $v = 0,70 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ;  $v_{\text{max}} = 3,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 4.  $L = 1,1 \cdot 10^2$  м. 5.  $v = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
6.  $l = 2,7$  км.
- Упр. 6.** 1.  $\tau_1 = 24$  с;  $\tau_2 = 1,6$  с. 2.  $\lambda_1 = 6,0$  мм;  $\lambda_2 = 1,4$  мм. 3.  $H = 1,5 \cdot 10^2$  м. 4.  $l = 0,45$  км.  
5. Уменьшится в  $k = 3$  раза. 6.  $t = 153$  с.
- Упр. 7.** 1.  $T = 1,2$  мс. 2.  $\nu = 36$  кГц. 3. Период увеличится (уменьшится) в 4 раза. 4.  $C$  изменяется  
от 1,2 пФ до 0,14 пФ. 5.  $W_C = 0,12$  мДж;  $W_L = 40$  мкДж. 6.  $\varepsilon = 2,5$ .
- Упр. 8.** 1.  $U_0 = 311$  В. 2.  $\nu = 25$  Гц;  $U_d = 141$  В;  $U = 200$  В. 3.  $\nu = 50$  Гц;  $I_d = 2,1$  А. 4.  $U_0 = 6,2$  В.  
5.  $\mathcal{E}(t) = 2\pi n B S \cos(2\pi n t)$ ;  $\mathcal{E}_0 = 0,19$  В.
- Упр. 9.** 1. Понижающий;  $k = 2,8$ . 2.  $k = 10$ . 3.  $I_1 = 0,53$  А;  $U_2 = 8,0$  В. 4. Понижающий;  $k = 2,3$ .  
5. Потери уменьшатся на 48 кВт. 6.  $N_{21} = 6$ ;  $N_{22} = 60$ .
- Упр. 10.** 1.  $T = 50$  нс;  $\nu = 2,0 \cdot 10^7$  Гц. 2.  $N = 7,5 \cdot 10^3$ . 3.  $\lambda = 30$  км. 4.  $\lambda = 7,5$  км; 5.  $d_2 = 5,6$  мм.  
6.  $l = 4,5 \cdot 10^2$  м. 7.  $\tau = 50$  нс.
- Упр. 11.** 1.  $\Delta t = 493$  с. 2.  $l = 1,7$  км. 3.  $v = 1,95 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 4.  $k = 1,135$ . 5.  $\Delta t = 2,00$  мс. 6.  $n = 1,52$ .
- Упр. 12.** 1. Ослабление. 2. Ослабление. 3.  $N = 5$ . 4. Ослабление. 6.  $\Delta x = 0,092$  мм. 7.  $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$  м.
- Упр. 13.** 1.  $\theta = 6,1^\circ$ . 2. Максимумы сужаются, а расстояние между ними увеличивается. 3. В крас-  
ной области спектра  $m_{\text{max}} = 2$ ; в фиолетовой области спектра  $m_{\text{max}} = 5$ . 4.  $\Delta\theta = 15,4^\circ$ .  
5.  $\lambda_2 = 455$  нм. 6.  $m_{\text{max}} = 6$ .
- Упр. 14.** 1.  $D_1 = 0,65$  м;  $D_2 = 0,85$  м. 3.  $h = 5,3$  м. 4.  $n_{21} = 0,89$ . 5.  $\alpha = 83^\circ$ . 6.  $\alpha_2 = 82^\circ$ .
- Упр. 15.** 1.  $h = 2,0$  мм. 2.  $l = 22$  мм. 3.  $\varphi = 40^\circ$ . 4.  $n = 1,5$ .
- Упр. 16.** 4. Собирающая;  $F = 18,3$  см. 5.  $d = 24$  см. 6.  $d = 30$  см;  $\Gamma = 1,5$ . 7.  $d = 5,8$  см. 8.  $F = 15$  см.  
9.  $\delta = 80^\circ$ ;  $l = 44$  см.
- Упр. 17.** 1.  $D = 6,8$  дптр. 2.  $d = 62,5$  см. 3.  $h = 2,7$  м. 4.  $F = 8,3$  см. 5.  $D = -2,7$  дптр.  
6.  $D_1 = 5,3 \cdot 10^2$  дптр. 7.  $D = -3,5$  дптр. 8.  $t = 2,2$  мс.
- Упр. 18.** 1.  $l_0 = 0,15$  км. 2.  $v = 0,80c$ . 3.  $\tau = 1,9$  мкс. 4.  $v = 0,80c$ . 5.  $\tau = 1,4$  мкс. 6.  $P = 66$  см.  
7.  $S = 0,60$  м<sup>2</sup>. 8.  $v = 0,95c$ .
- Упр. 19.** 1.  $E = 9,0 \cdot 10^{10}$  Дж. 2.  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. 3.  $\Delta m = 3,5 \cdot 10^{-8}$  кг. 4.  $\Delta m = 8,3 \cdot 10^{18}$  кг.  
5.  $v = 0,82c$ . 6.  $E_K = 6,0 \cdot 10^{19}$  Дж;  $\varepsilon = 5,1$  %.



- Упр. 20.** 1.  $E = 3,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. 2.  $p = 1,11 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ . 3.  $E_1 = 3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $\frac{E_2}{E_1} = 2,4$ ;  
 $\frac{E_3}{E_1} = 6,0 \cdot 10^3$ ;  $\frac{E_4}{E_1} = 6,0 \cdot 10^6$ . 4.  $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7}$  м. 5.  $v_{\text{max}} = 4,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 6.  $v_{\text{min}} = 5,0 \cdot 10^{14}$  Гц. 7.  $\lambda = 3,2 \cdot 10^{-7}$  м. 8.  $E_{\text{к}}^{\text{max}} = 6,3 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $v_{\text{max}} = 1,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 9.  $A_{\text{вых}} = 2,0$  эВ. 10.  $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-7}$  м.
- Упр. 21.** 1.  $N = 6$ . 2. Энергия атома уменьшилась на  $\Delta E \approx 2,5$  эВ  $\approx 4,1 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 3. Переходы возможны только под действием ультрафиолетового излучения; на любой.  
 4.  $\frac{\Delta m}{m} = 1,1 \cdot 10^{-8}$ . 5.  $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-7}$  м. 6.  $r_3 = 4,8 \cdot 10^{-10}$  м;  $r_{300} = 4,8 \cdot 10^{-6}$  м.  
 7.  $E = 1,6 \cdot 10^{-18}$  Дж. 8.  $n = 4,3 \cdot 10^3$ ;  $E_n = -7,2 \cdot 10^{-7}$  эВ.
- Упр. 22.** 1.  $\varepsilon_{\text{св}} = 7,0$  МэВ на нуклон. 2.  $E = 32$  МэВ;  $\varepsilon_{\text{св}} = 5,33$  МэВ на нуклон.
- Упр. 23.** 1.  ${}^1_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n}$ . 2.  $\alpha$ -Частица. 3. Выделяется  $E = 1,3 \cdot 10^{-12}$  Дж. 4.  ${}^2_1\text{D}$ ;  
 ${}^{54}_{25}\text{Mn} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^1_0\text{n}$ .  
 5. Указание: вычислите дефект масс. 6. Указание: вычислите дефект масс.  
 7. Да, стабильно, так как дефект масс указанной системы положителен.  
 8.  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ ;  ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^0_1\text{e}$ . 9.  ${}^{56}_{26}\text{Fe} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{56}_{25}\text{Mn} + {}^1_1\text{p}$ ;  
 ${}^{56}_{25}\text{Mn} \rightarrow {}^{56}_{26}\text{Fe} + {}^0_{-1}\text{e}$ . 10.  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$ ;  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$ .
- Упр. 24.** 1.  $k_2 = 4,0$ . 2.  $k = 1,6$  %. 3.  $m = 0,93$  кг. 4.  $T_{1/2} = 2,5 \cdot 10^3$  с. 5.  $t = 41$  год.

## ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адроны 251  
Акустика 36  
Амплитуда 9, 32  
Анализ спектральный 127, 198  
Античастица 253
- Барионы** 250  
Бинокль 125  
Бозон Хиггса 254  
Бозоны 252  
*Бор Н. А.* 182  
Бэр 246
- Взаимодействие гравитационное** 251, 267  
— сильное 210, 251, 267  
— слабое 224, 251, 267  
— электромагнитное 251, 267
- Вибратор Герца 73  
Волна бегущая 33  
— звуковая 36  
— когерентная 87  
— механическая 31  
— монохроматическая 84  
— поперечная 33  
— продольная 33  
— электромагнитная 72
- Выход ядерной реакции энергетический 219
- Галилей Г.* 15  
Генератор переменного тока 54  
*Герц Г.* 73, 156  
Глюоны 252  
Граница фотоэффекта красная 159, 165  
Грей 245  
*Гойгенс Х.* 16, 94
- Движение колебательное** 6  
Дефект масс 213  
Диоптрия 113  
Дисперсия света 128  
— — аномальная 128  
— — нормальная 128  
Дифракция 95  
Длина волны 32  
Доза излучения поглощенного 245  
— — — эквивалентная 246  
Дозиметрия 245
- Дуализм корпускулярно-волновой 172
- Закон взаимосвязи массы и энергии** 151  
— внешнего фотоэффекта 158  
— независимости световых лучей 102  
— отражения 102  
— преломления 102, 105  
— прямолинейного распространения света 102  
— радиоактивного распада 227
- Звука высота 39  
— громкость 39  
Зиверт 246  
Значение напряжения (силы тока) амплитудное 57  
— — — действующее 58  
— — — мгновенное 57
- Излучение видимое** 76  
— инфракрасное 76  
— ионизирующее 243  
— рентгеновское 76  
— ультрафиолетовое 76
- Инверсия населенностей 201  
Интенсивность волны 36  
— — световой 89  
Интерференция 89
- Картина дифракционная** 98  
— интерференционная 89  
Квант энергии 160  
Кварки 252  
Когерентность 87  
Колебания 6, 26  
— вынужденные 27  
— затухающие 27  
— незатухающие 26  
— свободные (собственные) 26  
— электромагнитные 48, 53  
Коллайдер большой адронный 260  
Контур колебательный 46  
— — идеальный 46  
Коэффициент трансформации 62  
— размножения нейтронов 234
- Лазер** 91, 203  
*Лебедев П. Н.* 170  
Лептон 250

Линза 112  
— рассеивающая 112, 113  
— собирающая 112, 113  
— тонкая 113  
Лупа 122  
Луч света 95, 102  
Лучи света расходящиеся 103  
— — сходящиеся 103  
*Майкельсон А. А.* 82, 137  
*Максвелл Дж.* 70, 265  
Масса критическая 233  
Маятник математический 15  
— пружинный 14  
Мезоны 250  
Механика квантовая 190  
Микроскоп 123  
— электронный 174  
Модель атома квантовая 182  
— — ядерная (Резерфорда) 180  
— стандартная 254  
— ядра 208  
**Накачка** 201  
Напряжение задержки 158  
Нейтрон 207  
Нуклид 209  
Нуклон 208  
**Обертон** 39  
Оптика 80  
— геометрическая 102  
Осциллятор гармонический 9  
Отражение полное 106  
Очки 121  
**Переходы вынужденные** 200  
— спонтанные 199  
Период полураспада 227  
*Планк М.* 160  
Показатель преломления абсолютный 83  
— — относительный 105  
*Попов А. С.* 73  
Поле электромагнитное 71  
Постоянная Планка 161

Постулат Бора 182  
— относительности 139  
— постоянства скорости света 139  
Порог болевого ощущения 38  
— слышимости 37  
Порядок максимума дифракции 98  
Правило знаков 115  
— отбора 194  
— сдвига (смещения) 223  
Преобразования Галилея 147  
— Лоренца 148  
Призмы преломляющая грань 110  
— преломляющий угол 110  
Принцип Гюйгенса 94  
— Гюйгенса — Френеля 96  
— дополнительности 175  
— запрета Паули 193  
— неопределенности Гейзенберга 191  
— относительности Галилея 135  
Проектор мультимедийный 118

**Работа выхода** 163  
Рад 246  
Радиоактивность 221  
— естественная 226  
— искусственная 226  
Разность хода 87  
— — оптическая 89  
Расстояние наилучшего зрения 122  
Реакция термоядерная 239  
— ядерная 216  
— — экзотермическая 218  
— — эндотермическая 218  
— — цепная 232  
*Резерфорд Э.* 179  
Резонанс 28  
Решетка дифракционная 96  
*Рёмер О.* 81

**Свет** 80  
Сила вынуждающая 27  
Силы ядерные 211  
Система отсчета инерциальная 135  
Скорость света в вакууме 82, 83  
— — в веществе 83, 84  
Сокращение длины 145  
Сопротивление активное 59

- Состояние атома основное 183  
— — возбужденное 183  
Спектр 38, 128  
— дискретный 38, 200  
— испускания 195, 196  
— линейчатый 195, 196  
— поглощения 195, 197  
— полосатый 196  
— сплошной 38, 196, 197  
Спектрограф 129  
Спектрометр 129  
Спектроскоп 129  
Спектрофотометр 129  
Среда активная 201  
*Столетов А. Г.* 157
- Телескоп 124  
Тембр 39  
Ток электрический вихревой 63  
— — переменный 53  
*Томсон Дж.* 160  
Тон музыкальный 38  
Трансформатор 60  
— повышающий 60  
— понижающий 60  
Трансформатора режим короткого замыкания 63  
— — рабочего хода 62  
— — холостого хода 62  
— обмотка первичная 61  
— — вторичная 61
- Увеличение линейное (поперечное) 115  
Угол зрения 120  
— отклонения 110  
— полного отражения предельный 106  
Уравнение гармонических колебаний (гармонического осциллятора) 9  
— Эйнштейна для внешнего фотоэффекта 164  
Ускоритель линейный 257  
— циклический 257  
Условие квантования 184  
— максимума дифракции 98  
— максимума интерференции 90  
— минимума интерференции 90
- Фаза 10  
— начальная 10  
*Фарадей М.* 60, 265  
Фермионы 252, 255  
Формула Гюйгенса 16  
— Томсона 50  
— тонкой линзы 114, 115  
Фотоаппарат 119  
Фотон 162, 251  
Фототок 157  
— насыщения 158  
Фотоэффект внешний 157  
— внутренний 157  
Фронт волновой 32
- Частица элементарная 250  
— — фундаментальная 255  
Частота собственных колебаний 26  
— циклическая 10  
Число квантовое 192  
— — главное 192  
— — магнитное 192  
— — орбитальное 192  
— — спиновое 192  
— зарядовое 208  
— массовое 208
- Шкала электромагнитных волн 75  
Шум 38
- Эйнштейн А.* 139, 162, 265  
Электронвольт 162, 265  
Электростанция гидро (ГЭС) 65  
— атомная (АЭС) 65  
— тепловая (ТЭС) 65  
Эмиссия 157  
Энергетика ветровая 68  
— водородная 69  
— гелио 69  
— геотермальная 69  
— приливная 69  
Энергия ионизации 187  
— покоя 150  
— связи ядра 187, 212
- Яблочков П. Н.* 60

# СОДЕРЖАНИЕ

От авторов .....	3
------------------	---

## Глава 1. Механические колебания и волны

§ 1. Колебательное движение. Гармонические колебания. Амплитуда, период, частота, фаза колебаний. Уравнение гармонических колебаний .....	5
Упражнение 1 .....	13
§ 2. Пружинный и математический маятники .....	—
Упражнение 2 .....	19
§ 3. Превращения энергии при гармонических колебаниях .....	20
Упражнение 3 .....	25
§ 4. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс .....	26
Упражнение 4 .....	30
§ 5. Распространение колебаний в упругой среде. Продольные и поперечные волны .....	—
Упражнение 5 .....	35
§ 6. Звук .....	—
Упражнение 6 .....	42
Самое важное в главе 1 .....	—

## Глава 2. Электромагнитные колебания и волны

§ 7. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Формула Томсона. Превращения энергии в колебательном контуре .....	46
Упражнение 7 .....	52
§ 8. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный электрический ток. Действующие значения силы тока и напряжения .....	53
Упражнение 8 .....	59
§ 9. Преобразование переменного тока. Трансформатор .....	60
Упражнение 9 .....	64
§ 10. Производство, передача и потребление электрической энергии. Экологические проблемы производства и передачи электрической энергии .....	65
§ 11. Электромагнитные волны и их свойства. Шкала электромагнитных волн .....	70
Упражнение 10 .....	78
Самое важное в главе 2 .....	—

## Глава 3. Оптика

§ 12. Электромагнитная природа света. Скорость света .....	80
Упражнение 11 .....	86
§ 13. Интерференция света .....	—
Упражнение 12 .....	93
§ 14. Принцип Гюйгенса — Френеля. Дифракция света. Дифракционная решетка .....	94
Упражнение 13 .....	101
§ 15. Закон преломления света. Показатель преломления. Полное отражение .....	102
Упражнение 14 .....	108
§ 16. Прохождение света через плоскопараллельные пластинки и призмы .....	—
Упражнение 15 .....	112
§ 17. Формула тонкой линзы .....	—
Упражнение 16 .....	116

Правообладатель Народная асвета

§ 18. Оптические приборы для получения действительных изображений .....	118
§ 19. Оптические приборы для увеличения угла зрения .....	120
Упражнение 17 .....	126
§ 20. Дисперсия света. Спектр. Спектральные приборы .....	127
Самое важное в главе 3 .....	131

#### **Глава 4. Основы специальной теории относительности**

§ 21. Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Экспериментальные предпосылки специальной теории относительности .....	135
§ 22. Постулаты специальной теории относительности. Относительность одновременности ...	139
§ 23. Пространство и время в специальной теории относительности .....	142
Упражнение 18 .....	146
§ 24. Преобразования Галилея. Преобразования Лоренца. Релятивистский закон сложения скоростей .....	147
§ 25. Элементы релятивистской динамики. Взаимосвязь массы и энергии .....	149
Упражнение 19 .....	153
Самое важное в главе 4 .....	154

#### **Глава 5. Фотоны. Действия света**

§ 26. Фотоэффект. Экспериментальные законы внешнего фотоэффекта. Квантовая гипотеза Планка .....	155
§ 27. Фотон. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта .....	162
Упражнение 20 .....	167
§ 28. Давление света. Корпускулярно-волновой дуализм .....	168
Самое важное в главе 5 .....	176

#### **Глава 6. Физика атома**

§ 29. Явления, подтверждающие сложное строение атома. Опыты Резерфорда. Ядерная модель атома .....	178
§ 30. Квантовые постулаты Бора .....	182
Упражнение 21 .....	189
§ 31. Квантово-механическая модель атома .....	—
§ 32. Излучение и поглощение света атомом. Спектры испускания и поглощения .....	195
§ 33. Спонтанное и индуцированное излучение .....	199
§ 34. Лазеры .....	203
Самое важное в главе 6 .....	205

#### **Глава 7. Ядерная физика и элементарные частицы**

§ 35. Протонно-нейтронная модель строения ядра атома. Энергия связи ядра атома .....	207
Упражнение 22 .....	216
§ 36. Ядерные реакции. Законы сохранения в ядерных реакциях. Энергетический выход ядерных реакций .....	—
Упражнение 23 .....	220
§ 37. Радиоактивность .....	221
§ 38. Закон радиоактивного распада .....	227
Упражнение 24 .....	229

§ 39. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции .....	229
§ 40. Ядерный реактор .....	235
§ 41. Реакции ядерного синтеза .....	239
§ 42. Ионизирующие излучения. Элементы дозиметрии .....	243
§ 43. Элементарные частицы и их взаимодействия .....	250
§ 44. Ускорители заряженных частиц .....	256
Самое важное в главе 7 .....	261

## **Глава 8. Основы единой физической картины мира**

§ 45. Современная естественнонаучная картина мира .....	264
Самое важное в главе 8 .....	269
Приложение. Лабораторный эксперимент .....	270
Ответы к упражнениям .....	280
Предметно-именной указатель .....	282

(Название и номер учреждения образования)

Учебный год	Имя и фамилия учащегося	Состояние учебного пособия при получении	Оценка учащегося за пользование учебным пособием
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Учебное издание

**Жилко** Виталий Владимирович  
**Маркович** Леонид Григорьевич

### **ФИЗИКА**

Учебное пособие для 11 класса  
учреждений общего среднего образования  
с русским языком обучения

2-е издание, пересмотренное и дополненное

Зав. редакцией *В. Г. Бехтина*. Редактор *Л. В. Гринкевич*. Художественный редактор *Л. В. Павленко*.  
Технический редактор *Г. А. Дудко*. Компьютерная верстка *Г. А. Дудко, Л. И. Шевко*. Корректоры  
*В. С. Бабеня, Е. П. Тхир, О. С. Козицкая, А. В. Алешко*.

Подписано в печать 18.04.2014. Формат  $70 \times 90^{1/16}$ . Бумага офсетная. Гарнитура литературная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,06 + 0,29 форз. Уч.-изд. л. 15,78 + 0,22 форз. Тираж 110 000 экз.  
Заказ .

Издательское республиканское унитарное предприятие «Народная асвета»  
Министерства информации Республики Беларусь.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/2 от 08.07.2013.  
Пр. Победителей, 11, 220004, Минск.

ОАО «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/3 от 04.10.2013.  
Ул. Корженевского, 20, 220024, Минск.

**Правообладатель Народная асвета**