

В. А. Касьянов

# Физика

# 11

БАЗОВЫЙ  
УРОВЕНЬ

 ДРОФА

В. А. Касьянов

# Физика

11

класс

УЧЕБНИК  
ДЛЯ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
УЧРЕЖДЕНИЙ  
БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

*Рекомендовано  
Министерством образования и науки  
Российской Федерации*

3-е издание, доработанное

Москва

 дрофа

2012



УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я72

К28

**Касьянов, В. А.**

**К28** Физика. 11 кл. Базовый уровень : учеб. для общеобразоват. учреждений / В. А. Касьянов. — 3-е изд., дораб. — М. : Дрофа, 2012. — 269 [3] с. : ил., 6 л. цв. вкл.

ISBN 978-5-358-10010-7

Учебник предназначен учащимся 11 классов общеобразовательных учреждений, изучающих физику на базовом уровне, и является продолжением учебника «Физика. 10 класс» того же автора.

Учебник создан с учетом современных научных представлений, соответствует требованиям федерального компонента государственного стандарта по физике и включает следующие разделы: «Электродинамика», «Электромагнитное излучение», «Физика высоких энергий», «Элементы астрофизики».

Достоинством учебника является тщательно разработанный методический аппарат, включающий вопросы и задачи различной степени сложности. Синим цветом обозначены названия параграфов для дополнительного чтения. Книга хорошо иллюстрирована.

К учебнику издана тетрадь для лабораторных работ, комплект тетрадей контрольных и проверочных работ.

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я72

ISBN 978-5-358-10010-7

© Касьянов В. А., 2008

© Касьянов В. А., 2012, с изменениями

© ООО «Дрофа», 2008

© ООО «Дрофа», 2012, с изменениями

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

---

## 1

## Постоянный электрический ток

### § 1. Электрический ток

**Движение электрических зарядов в проводнике.** В соответствии с современными научными представлениями, изложенными в разделе «Электростатика» в 10 классе, с неподвижными электрическими зарядами связано электрическое поле. Движущиеся электрические заряды способны создавать электрический ток и магнитное поле.

*Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.*

Для существования электрического тока необходимы свободные заряды — носители заряда, например электроны в металлах и вакууме, ионы в электролитах и т. п.

В проводнике концентрация свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объёму тела, наибольшая в сравнении с другими веществами.

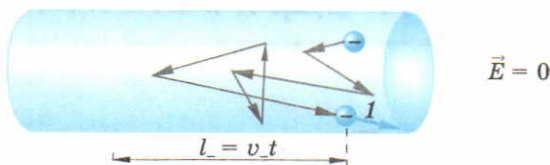
Второе условие существования электрического тока в проводнике — наличие внешнего электрического поля.

В отсутствие внешнего электрического поля (его напряжённость  $E = 0$ ) движение зарядов в проводнике является хаотическим (рис. 1).

Так движутся, например, положительные и отрицательные ионы в электролитах, электроны в металлических проводниках. После нескольких столкновений с другими частицами заряженные частицы могут вернуться практически к первоначальному положению.

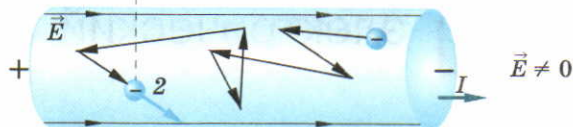
## 1 ►

Траектория движения электрона в проводнике в отсутствие внешнего электрического поля ( $\vec{E} = 0$ )



## 2 ►

Траектория движения электрона в проводнике при наличии внешнего электрического поля ( $\vec{E} \neq 0$ )



В том случае, когда к проводнику приложено внешнее электрическое поле ( $E \neq 0$ ) (рис. 2), на заряды действует дополнительно кулоновская сила. В результате этого электроны, являющиеся носителями свободного заряда в металлах, под действием электрического поля приобретают составляющую скорости  $v_-$  против напряжённости электрического поля, или *направленную скорость*. За промежуток времени  $t$  электрон «дрейфует» на расстояние  $l_- = v_- t$  ( $v_-$  — скорость дрейфа в направлении, противоположном напряжённости электрического поля).

**Направление электрического тока.** В проводнике, помещённом в электрическое поле, происходит наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое.

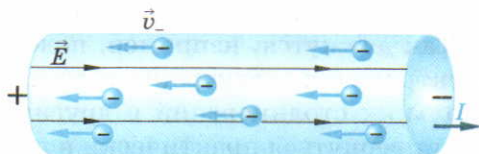
**За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц.**

**Направление тока совпадает с направлением напряжённости электрического поля, вызывающего этот ток.**

Таким образом, в металлах, где носителями тока являются свободные электроны, направление тока считается противоположным направлению скорости их упорядоченного движения (рис. 3).

## 3 ►

Направление тока  $I$  в металлическом проводнике противоположно направлению движения электронов





## В О П Р О С Ы

1. Дайте определение электрического тока.
2. При каких условиях возникает электрический ток?
3. Почему движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие внешнего электрического поля является хаотическим?
4. Чем отличается движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие и при наличии внешнего электрического поля?
5. Как выбирается направление электрического тока? В каком направлении движутся электроны в металлическом проводнике, по которому протекает электрический ток?

## § 2. Сила тока

**Определение силы тока.** Степень направленности движения заряженных частиц в проводнике характеризуется величиной электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с, или *силой тока*. Эта величина может меняться с течением времени.

*Сила тока в данный момент времени — скалярная физическая величина, равная пределу отношения электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени его прохождения:*

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Формулу (1) можно записать через производную:

$$I = \frac{dq}{dt} = q'. \quad (2)$$

*Сила тока — производная по времени от заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $t$ .*

Единица силы тока (основная единица СИ) — *ампер* (1 А):

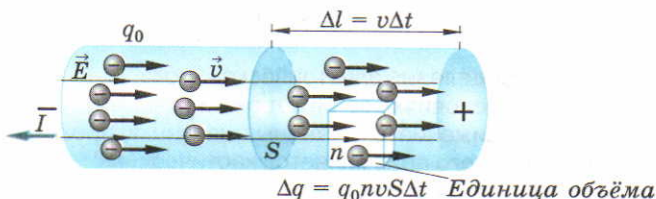
$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с.}$$

Точное определение ампера будет дано в § 17.

**Связь силы тока с направленной скоростью.** Для того чтобы рассчитать силу тока, найдём заряд  $\Delta q$ , протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$  (рис. 4). За это время через сечение проводника пройдут только заряды, движущиеся со скоростью  $v$  сонаправленно с напряжённостью внешнего электрического поля, которые находятся внутри цилиндра сечением  $S$  с образующей

## 4

Движение отрицательных зарядов в проводнике



$\Delta l = v\Delta t$ . Зная концентрацию  $n$  заряженных частиц, можно найти число заряженных частиц в этом объёме  $N = nSv\Delta t$  и определить их заряд:

$$\Delta q = q_0 N = q_0 n S v \Delta t,$$

где  $q_0$  — заряд одной частицы.

Тогда из формулы (1) следует, что сила тока

$$I = q_0 n S v. \quad (3)$$

Если скорость движения зарядов не зависит от времени, т. е.  $v = \text{const}$ , то сила тока  $I = \text{const}$ .

**Постоянный электрический ток — значение силы тока и направление которого не изменяются с течением времени.**

Постоянный ток широко используется в электрических схемах автомобилей, а также в микроэлектронике и т. д.

### В О П Р О С Ы

1. Какая величина характеризует интенсивность направленного движения заряженных частиц?
2. Дайте определение силы тока.
3. Как сила тока связана с зарядом, прошедшим за время  $t$  через поперечное сечение проводника?
4. В каких единицах измеряется сила тока?
5. Какой электрический ток называют постоянным? Как сила тока зависит от концентрации заряженных частиц?

### З А Д А Ч И

1. Какой заряд пройдёт через поперечное сечение проводника за 1 мин, если сила тока в проводнике 2 А?
2. Сколько электронов проходит через спираль лампы накаливания за 1 с при силе тока в лампе 1,6 А?
3. В проводнике, площадь поперечного сечения которого 1 мм<sup>2</sup>, сила тока 1,6 А. Концентрация электронов в проводнике  $10^{28}$  м<sup>-3</sup> при температуре 20 °С. Найдите среднюю скорость направленного движения электронов и сравните её с тепловой скоростью электронов.



### § 3. Источник тока в электрической цепи. ЭДС

**Условия существования постоянного тока в проводнике.** При помещении проводника во внешнее электрическое поле в нём происходит перераспределение *свободных зарядов*, называемое *электростатической индукцией* (см. Ф-10, § 61).

Электрическое поле индуцированных (наведённых) зарядов достаточно быстро компенсирует внешнее поле. Напряжённость поля внутри проводника становится равной нулю, заряды перестают двигаться направленно, ток прекращается. Для того чтобы ток существовал непрерывно, необходимо создание и поддержание в проводнике электрического поля. Напряжённость внешнего поля должна быть больше напряжённости поля индуцированных зарядов. Это возможно, если скорость нарастания внешнего электрического поля превосходит скорость разделения индуцированных зарядов. Добиться увеличения напряжённости внешнего электрического поля можно, подводя дополнительные заряды к проводнику извне. Эти заряды генерирует и подводит к проводнику *источник тока*.

**Источник тока — устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды.**

**Источники тока.** Разделение зарядов возможно в результате преобразования механической, тепловой, химической, световой энергий в электрическую. Так, в гальваническом элементе заряды на электродах оказываются разноимёнными за счёт энергии химической реакции между электродами и электролитом.

Наиболее распространённые элементы — источники тока — изображены на рисунке 5. Ртутная батарейка (рис. 5, а), используемая в часах, калькуляторах и слуховых аппаратах, даёт ЭДС около 1,4 В. В настоящее время ртутные батарейки заменяют серебряно-цинковыми, чтобы ограничить применение вредных веществ. Традиционная батарейка для карманных фонарей (рис. 5, б) имеет ЭДС 1,5 В.

**Источник тока в электрической цепи.** Для поддержания постоянной разности потенциалов заряды должны накапливаться на полюсах источника: положительные заряды в электролите должны двигаться к аноду, а отрицательные к катоду. Такое движение в направлении, противоположном действию кулоновских сил отталкивания между одноимёнными зарядами, может происходить лишь под действием сил неэлектрической природы, называемых *сторонними силами*.



5

Источники тока:  
а) миниатюрная  
батарейка;  
б) батарейка для  
карманного фонаря



**Сторонние силы — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов.**

Например, в электролите гальванического элемента положительно заряженная частица (ион) движется от катода к аноду под действием сторонней силы  $\vec{F}_{\text{ст}}$  (рис. 6, а). Кроме того, на эту частицу в направлении, противоположном скорости её движения, действуют электрическая сила  $\vec{F}_K$  со стороны электродов и сила сопротивления  $\vec{F}_c$ . Сила сопротивления характеризует противодействие движению заряженной частицы со стороны ионов, с которыми она сталкивается в процессе движения в электролите.

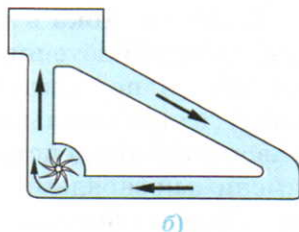
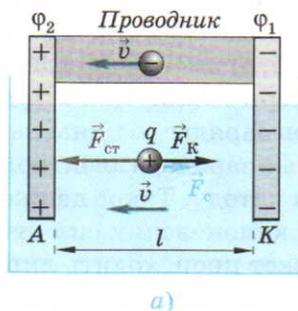
Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости (рис. 6, б). Сторонней силой в этом случае является сила давления на воду вращающейся крыльчатки насоса.

6

Аналогия между действием источника тока и водяного насоса:

а) силы, действующие на заряженную частицу в гальваническом элементе;

б) водяной насос



**ЭДС источника тока.** Изменение потенциальной энергии заряда при его перемещении между электродами источника тока равно суммарной работе сторонней силы и силы сопротивления:

$$\Delta W = A_{\text{ст}} + A_{\text{с}}. \quad (4)$$

Постоянной величиной для данного источника тока является *электродвижущая сила (ЭДС)*.

*ЭДС — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному к величине этого заряда:*

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (5)$$

Единица электродвижущей силы — *вольт (1 В)*:

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}.$$

Изменение потенциальной энергии заряда связано с разностью потенциалов  $U$  между электродами:  $\Delta W = qU$ . Работа силы сопротивления отрицательна, так как эта сила направлена противоположно перемещению заряда, поэтому формулу (4) можно представить в виде

$$U = \mathcal{E} - \frac{|A_{\text{с}}|}{q}. \quad (6)$$

*Разность потенциалов между полюсами источника тока (напряжение), приложенная к подключённому к полюсам проводнику, меньше ЭДС.*

Если полюсы источника разомкнуты, ток через источник не протекает, а работа силы сопротивления равна нулю. Следовательно,

$$\mathcal{E} = U.$$

*ЭДС равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока.*

### В О П Р О С Ы

1. Каково назначение источника тока?
2. Какие силы называют сторонними? Почему накопление зарядов на полюсах источника может происходить лишь под действием сторонних сил?
3. Опишите особенности движения заряженной частицы в электролите источника тока.
4. Дайте определение ЭДС. В каких единицах она измеряется?
5. Может ли напряжение источника равняться его ЭДС? При каком условии?

## § 4. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи)

**Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения.** Для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

**Напряжение — разность потенциалов между концами однородного проводника.**

Однородным является проводник, в котором не действуют сторонние силы.

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого, газообразного, плазменного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной к нему разности потенциалов (или приложенного напряжения). Наиболее простой вид эта зависимость имеет для однородного металлического проводника.

*Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению.*

**Сопротивление проводника.** Коэффициентом пропорциональности между силой тока и напряжением, как вам известно из курса физики основной школы, является электрическое сопротивление проводника  $R$ .

Впервые зависимость силы тока от напряжения была экспериментально получена в 1826 г. немецким учёным **Георгом Омом**.

### Закон Ома для однородного проводника

**Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:**

$$I = \frac{U}{R}. \quad (7)$$

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называют *вольт-амперной характеристикой проводника* (рис. 7).

**Гидродинамическая аналогия сопротивления проводника.** Сопротивление — основная электрическая характеристика проводника. Чем больше электрическое сопротивление при заданном напряжении, тем меньше сила тока в проводнике. Сопротивление характеризует



степень противодействия проводника направленному движению зарядов. Из-за столкновений с неоднородностями кристаллической решётки (возникающими, например, при образовании кристалла) или атомами примесей другого элемента в металле электроны движутся по сложной траектории (рис. 8, а). Она напоминает траекторию движения шарика, скатывающегося с наклонной плоскости под действием силы тяжести и сталкивающегося с выступающими цилиндрическими штырями (рис. 8, б).

Единица сопротивления — ом (1 Ом):

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}.$$

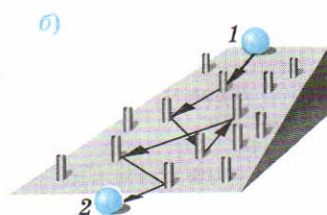
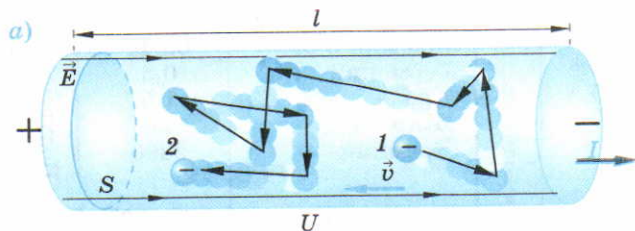
*Электрическое сопротивление зависит от геометрических размеров и материала проводника.*

Зависимость сопротивления от длины и площади поперечного сечения проводника легко понять с помощью гидродинамической аналогии.

Сопротивление движению, которое испытывает вода, текущая по трубе, возрастает при увеличении длины трубы и уменьшении её сечения (рис. 9). Соответственно, масса жидкости, перекачиваемая насосом в единицу времени по трубе 2, будет меньше, чем по трубе 1. Сила тока подобна массе жидкости, перекачиваемой насосом в единицу времени.

*Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади его поперечного сечения  $S$ :*

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (8)$$

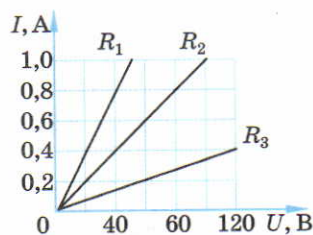


▲ 8

*Движение электрона в проводнике:*

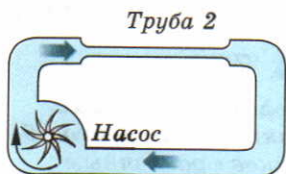
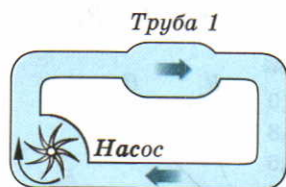
- а) траектория движения электрона в проводнике;  
б) моделирование движения электрона в проводнике

$$R_1 < R_2 < R_3$$



▲ 7

*Вольт-амперные характеристики проводников с различным электрическим сопротивлением*



### ▲ 9

Гидродинамическая аналогия электрического сопротивления

**Удельное сопротивление.** Коэффициент пропорциональности  $\rho$  в формуле (8) — *удельное сопротивление проводника*.

**Удельное сопротивление — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади.**

Чем больше удельное сопротивление материала проводника, тем больше его электрическое сопротивление.

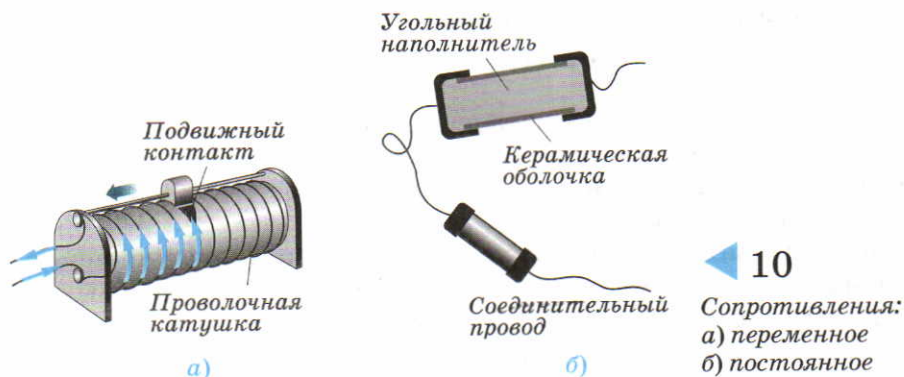
Единица удельного сопротивления — *ом-метр* ( $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ).

В таблице 1 приведены значения удельного сопротивления различных материалов при температуре  $t_0 = 20^\circ \text{C}$ . Качественное деление всех веществ по степени подвижности заряженных частиц на проводники, полупроводники и изоляторы определяется значением удельного сопротивления вещества.

К проводникам относят вещества, имеющие удельное сопротивление  $\rho < 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . У полупроводников  $10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м} < \rho < 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Изоляторы (диэлектрики) имеют  $\rho > 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**Таблица 1.** Удельное сопротивление веществ при  $20^\circ \text{C}$

Вещество	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Вещество	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Углерод	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Поваренная соль (насыщ. р-р)	0,044
Золото	$2,4 \cdot 10^{-8}$	Германий	0,5
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Кровь	1,5
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$	Жир	25
Платина	$10^{-7}$	Кремний	2300
Сталь	$2 \cdot 10^{-7}$		
Манганин (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	$4,4 \cdot 10^{-7}$	Полиэтилен	$10^8 + 10^9$
Константан (60% Cu, 40% Ni)	$4,9 \cdot 10^{-7}$	Дерево	$10^8 + 10^{11}$
Ртуть	$9,6 \cdot 10^{-7}$	Стекло	$10^{10} + 10^{14}$
Нихром (58% Ni, 25% Cu, 16% Cr)	$10^{-6}$	Янтарть	$5 \cdot 10^{14}$
		Кварц	$7,5 \cdot 10^{17}$



Изменение сопротивления проводника в соответствии с формулой (8) возможно либо при изменении его длины (как в реостате — проводнике с переменным сопротивлением) (рис. 10, а), либо при различном составе и объёме наполнителя (как в резисторе — проводнике с постоянным сопротивлением) (рис. 10, б).

Резисторы широко используются в электрических приборах и микроэлектронике.

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте закон Ома для однородного проводника.
2. Опишите механическую аналогию движения заряженных частиц в проводнике и гидродинамическую аналогию сопротивления.
3. Во сколько раз изменится сила тока в проводнике при увеличении приложенного к нему напряжения вдвое?
4. Что такое вольт-амперная характеристика проводника?
5. Что такое удельное сопротивление проводника? При каких значениях удельного сопротивления вещество можно считать проводником, полупроводником, диэлектриком?

### З А Д А Ч И

1. Электрический обогреватель, имеющий сопротивление 44 Ом, включён в сеть с напряжением 220 В. Найдите силу тока, протекающего через обогреватель.
2. Определите разность потенциалов на концах проводника сопротивлением 5 Ом, если за минуту через его поперечное сечение пройдёт заряд 2,88 кКл.
3. Сопротивление цилиндрического алюминиевого провода диаметром 1 мм равно 4 Ом. Найдите его длину.



## § 5. Зависимость удельного сопротивления проводников и полупроводников от температуры

**Проводники.** Удельное сопротивление проводника тем больше, чем чаще сталкиваются электроны. В свою очередь, частота столкновений тем больше, чем больше поперечное сечение атомов и ионов, с которыми сталкивается электрон.

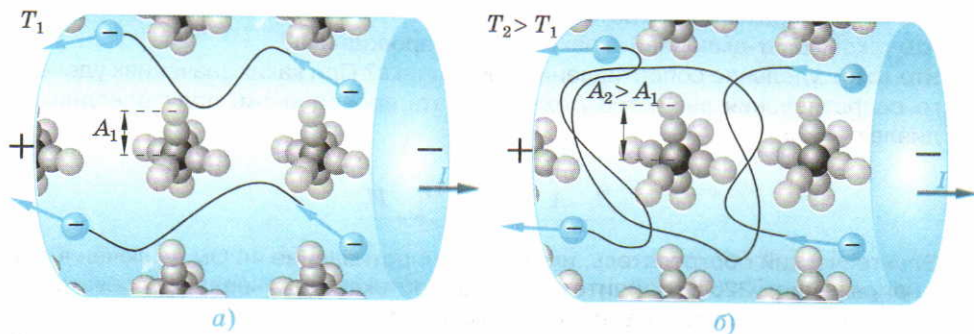
На характер движения электронов в проводнике влияет температура проводника. При малой температуре  $T_1$  амплитуда  $A_1$  тепловых колебаний атомов и ионов около положения равновесия невелика, и электроны почти беспрепятственно движутся в кристаллической решётке металлического проводника под действием электрического поля (рис. 11, а).

С увеличением температуры ( $T_2 > T_1$ ) амплитуда колебаний возрастает (рис. 11, б). Движение электронов в кристаллической решётке затрудняется: сопротивление их упорядоченному движению возрастает.

*Удельное сопротивление металлического проводника линейно возрастает с температурой:*

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (13)$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 293\text{ K}$ );  $\Delta T = T - T_0$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.



### ▲ 11

*Траектория электронов в металлическом проводнике под действием электрического поля:*

- а) при малой температуре;  
б) при увеличении температуры

Единица температурного коэффициента сопротивления — *кельвин в минус первой степени* ( $1 \text{ K}^{-1}$ ).

Линейная зависимость (13) удельного сопротивления от температуры справедлива в сравнительно небольшом интервале температур ( $\alpha \Delta T < 1$ ).

Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления лежит в диапазоне от 0,002 до  $0,006 \text{ K}^{-1}$ .

По изменению сопротивления металлов можно определить температуру, что используется при измерении температуры в диапазоне, недоступном жидкостным термометрам.

**Сверхпроводимость.** При охлаждении проводника его удельное сопротивление уменьшается достаточно плавно по линейному закону. Однако при снижении температуры ниже некоторой критической величины  $T_{\text{кр}}$ , близкой к абсолютному нулю, удельное сопротивление некоторых веществ скачкообразно падает практически до нуля. Это явление, наблюдавшееся впервые при охлаждении ртути в 1911 г. голландским учёным *Гейке Каммерлинг-Оннесом*, назвали *сверхпроводимостью*.

**Сверхпроводимость — физическое явление, заключающееся в скачкообразном падении сопротивления вещества до нуля при некотором критическом значении температуры  $T_{\text{кр}}$ .**

*Критическая температура* — температура скачкообразного перехода вещества из нормального состояния ( $T > T_{\text{кр}}$ ) в сверхпроводящее ( $T < T_{\text{кр}}$ ).

*Сверхпроводник* — вещество, которое может переходить в сверхпроводящее состояние. Свойством сверхпроводимости обладают около половины металлов и свыше тысячи сплавов и соединений металлов. Ток в сверхпроводнике может протекать неограниченно долгое время из-за отсутствия сопротивления.

Основным препятствием для широкого применения металлических сверхпроводников является необходимость их эксплуатации при очень низкой температуре ( $\sim 4 \text{ K}$ ). Поиск сверхпроводников с большой критической температурой привёл к получению в 1988—1989 гг. высокотемпературных металлокерамических сплавов с большой критической температурой. Получение сверхпроводящих состояний для этих сплавов возможно с помощью недорогого и безопасного в эксплуатации жидкого азота, имеющего температуру кипения  $77 \text{ K}$ .

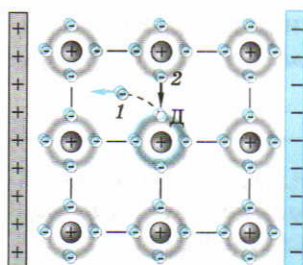


В настоящее время усилия физиков направлены на получение сверхпроводников с критической температурой, близкой к комнатной.

Техническое использование таких сверхпроводников позволяет уменьшить потери энергии в линиях электропередачи, совершенствует электронику, увеличивает быстродействие компьютеров, существенно удешевляет электроэнергию.

**Полупроводники.** Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры принципиально другая, чем у проводников.

*Удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры.*



### ▲ 12

*Возникновение носителей электрического тока в полупроводнике*

С увеличением температуры возрастает число свободных зарядов, создающих электрический ток, и соответственно уменьшается сопротивление полупроводника.

В качестве примера рассмотрим кристалл кремния, атомы которого имеют на внешней оболочке по четыре электрона (рис. 12). При низких температурах электроны прочно связаны в атомах, свободных электронов нет, кремний не проводит электрический ток, т. е. ведёт себя как диэлектрик. При нагревании кристалла возникает разрыв связей некоторых электронов с ионами кристаллической решётки. Электронейтральный атом, потерявший электрон 1, становится заряженным положительно. В электронной оболочке образуется вакансия, или дырка.

*Дырка — вакантное электронное состояние в кристаллической решётке, имеющее избыточный положительный заряд.*

Дырку Д в электронной оболочке атома может заполнить валентный электрон 2 соседнего атома.

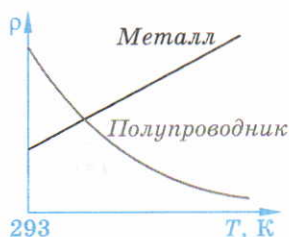
При увеличении температуры электроны, становясь свободными, начинают перемещаться по кристаллу. При этом число носителей заряда



резко возрастает, что приводит к уменьшению сопротивления полупроводника.

При нагревании от 300 до 700 К число свободных носителей заряда может увеличиться от  $10^{17}$  до  $10^{24}$  на  $1 \text{ м}^3$ . Рассмотренный нами процесс электропроводности характерен для *собственной проводимости полупроводников*.

Зависимость удельного сопротивления проводника и полупроводника от температуры показана на рисунке 13.



### ▲ 13

*Зависимость удельного сопротивления металла и полупроводника от температуры*

## В О П Р О С Ы

1. Почему при увеличении температуры увеличивается число столкновений электронов с атомами кристаллической решётки проводника?
2. Как зависит удельное сопротивление проводника от его температуры? В каких единицах измеряется температурный коэффициент сопротивления?
3. Почему удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры?
4. Опишите процесс собственной проводимости в полупроводниках.
5. Какое физическое явление называют сверхпроводимостью?

## З А Д А Ч И

1. Сопротивление медного провода при  $0^\circ\text{C}$  равно 4 Ом. Найдите его сопротивление при  $50^\circ\text{C}$ , если температурный коэффициент сопротивления меди  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .
2. Сопротивление проводника при  $20^\circ\text{C}$  равно 25 Ом, а при  $35^\circ\text{C}$  — 25,17 Ом. Найдите температурный коэффициент сопротивления.
3. Сопротивление стального проводника при температуре  $t_1 = 10^\circ\text{C}$   $R_1 = 10$  Ом. Найдите, при какой температуре его сопротивление увеличится на 1%. Температурный коэффициент сопротивления стали  $6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

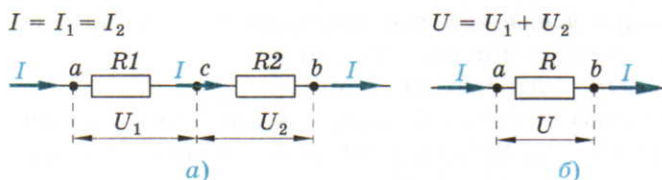
## § 6. Соединения проводников

**Последовательное соединение.** В реальной электрической цепи к зажимам источника тока может быть подключено несколько соединительных проводов, а также лампы, нагревательные и измерительные приборы, обладающие определённым сопротивлением.

Основными типами соединений элементов электрической цепи являются последовательное и параллельное соединения.

## 14

Последовательное соединение проводников:  
а) схема соединения;  
б) эквивалентная схема



Последовательное соединение проводников — соединение, при котором конец предыдущего проводника соединяется с началом только одного — последующего.

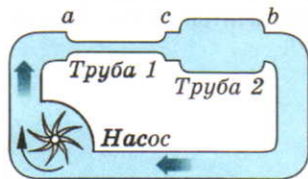
На рисунке 14, а резистор  $R1$ , подключённый между точками  $a$  и  $c$ , соединён последовательно с резистором  $R2$ , включённым между точками  $c$  и  $b$ . Найдём результирующее сопротивление  $R$  между точками  $a$  и  $b$  (рис. 14, б).

При последовательном соединении проводников сила тока, протекающего через оба резистора, остаётся постоянной:

$$I_1 = I_2 = I. \quad (10)$$

Это следует из закона сохранения заряда. Если бы заряд, протекающий в единицу времени через второй резистор, оказался бы меньше соответствующего заряда, протекающего через первый резистор, то это означало бы, что заряд куда-то пропал. Соответственно, если бы сила тока через второй резистор превосходила бы силу тока через первый, то где-то между сопротивлениями должна была бы происходить генерация зарядов, чего нет на самом деле.

Для более глубокого понимания сути данного физического явления воспользуемся методом физических аналогий. Гидродинамическим аналогом силы тока, протекающего через последовательно соединённые резисторы, является масса жидкости, протекающей в единицу времени по последовательно соединённым трубам (рис. 15).



## 15

Гидродинамическая аналогия последовательного соединения проводников

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении единичного положительного заряда из точки  $a$  в точку  $b$ , т. е. напряжение  $U$ , складывается из напряжения  $U_1$  на участке  $a—c$  и напряжения  $U_2$  на участке  $c—b$ :

$$U = U_1 + U_2.$$

При последовательном соединении проводников общее напряжение цепи равно сумме напряжений на каждом проводнике.

Выразим напряжение из закона Ома с учётом условия (10):

$$IR = IR_1 + IR_2.$$

При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2.$$

Если электрическая цепь содержит  $n$  последовательно соединённых проводников с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , то

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Сопротивление последовательного соединения проводников больше сопротивления любого из этих проводников.

**Параллельное соединение.** Параллельное соединение проводников — соединение, при котором проводники подключены между одной и той же парой точек (узлами).

Точку разветвления цепи, в которой соединяются не менее трёх проводников, называют узлом электрической цепи.

Найдём результирующее сопротивление цепи  $R$ , образованной двумя резисторами с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 16), параллельно соединёнными между узлами  $a$  и  $b$ .

В соответствии с законом сохранения электрического заряда заряд, поступающий в единицу времени в точку разветвления  $a$ , равен сумме зарядов, уходящих из этой точки за это же время, поэтому

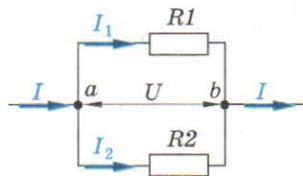
$$I = I_1 + I_2.$$

Суммарная сила тока, втекающего в узел, равна сумме сил токов, вытекающих из узла. Подобным образом вода растекается по трубам (рис. 17). Если за 1 с из 10 кг воды, поступающей в точку  $a$ , 2 кг воды попадает в трубу 1, то в трубу 2 за это же время пройдёт 8 кг воды.

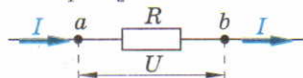
Так как работа электрических потенциальных сил не зависит от формы пути единичного положительного заряда между двумя точками, напряжение на каждом из параллельно соединённых проводников одно и то же:

$$U = U_1 = U_2. \quad (12)$$

$$U = U_1 = U_2$$



$$I = I_1 + I_2$$

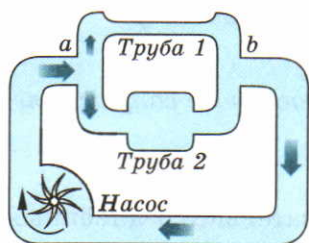


## ▲ 16

Параллельное соединение проводников:

а) схема соединения;  
б) эквивалентная схема





### ▲ 17

*Гидродинамическая аналогия параллельного соединения проводников*

Выразим силу тока для каждого проводника в формуле (11) из закона Ома с учётом равенства (12):

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2},$$

тогда

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (13)$$

Следовательно,

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (14)$$

Сопротивление параллельного соединения проводников меньше сопротивления любого из этих проводников.

Как следует из равенства (12),

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Сила тока в каждом из двух проводников, соединённых параллельно, обратно пропорциональна сопротивлению соответствующего проводника.

Параллельное соединение труб (см. рис. 17) подобно параллельному соединению сопротивлений. Короткая труба с большим сечением имитирует малое сопротивление, а длинная узкая труба — большое сопротивление. Масса жидкости, протекающей через короткую трубу за 1 с, больше, чем через длинную.

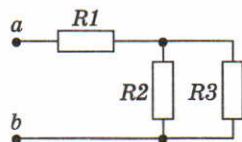
*Смешанное соединение проводников — соединение, сводящееся к последовательному и параллельному соединениям проводников. Существуют более сложные соединения проводников, которые не сводятся к смешанному соединению.*

## В О П Р О С Ы

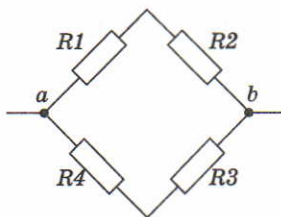
1. Какое соединение проводников называют последовательным?
2. Какие физические величины сохраняются при последовательном соединении проводников? Чему равно общее сопротивление при последовательном соединении проводников?
3. Какое соединение проводников называют параллельным?
4. Какие физические величины сохраняются при параллельном соединении проводников? Чему равна проводимость цепи при параллельном соединении проводников?
5. Какую гидродинамическую аналогию можно использовать для моделирования последовательного и параллельного соединений проводников?

З А Д А Ч И

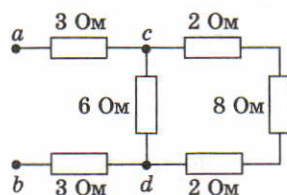
1. Найдите сопротивление  $R_{ab}$ , если  $R_1 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 30 \text{ Ом}$  (рис. 18).
2. Найдите  $R_{ab}$ , если  $R_1 = 12 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 18 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 10 \text{ Ом}$  (рис. 19).
3. Найдите  $R_{ab}$  (рис. 20).



▲ 18



▲ 19

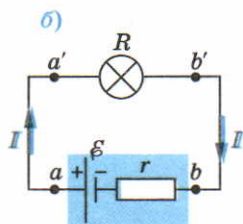
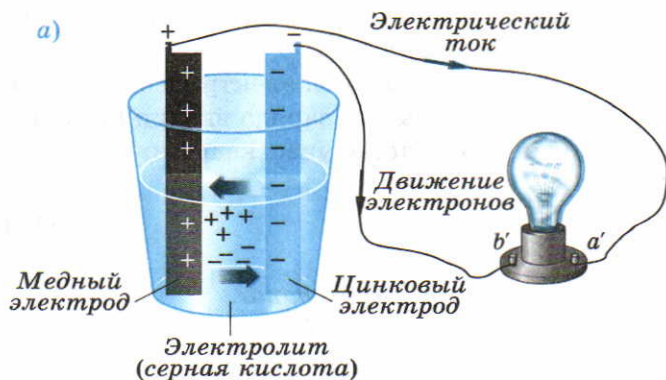


▲ 20

## § 7. Закон Ома для замкнутой цепи

**Замкнутая цепь с источником тока.** Рассмотрим простейшую замкнутую (полную) цепь, состоящую из источника тока (например, гальванического элемента) с ЭДС  $\mathcal{E}$  и лампы сопротивлением  $R$  (рис. 21, а). Найдём направление тока и силу тока в этой цепи.

В рассматриваемой цепи (рис. 21, б) лампа вместе с подводящими проводами ( $aa'$  и  $bb'$ ) образует внешнюю цепь — участок цепи ( $aa'b'b$ ) вне источника тока.



▲ 21

Простейшая замкнутая цепь:

- а) лампа, подключённая к гальваническому элементу;  
б) эквивалентная схема

Направление тока в цепи определяется направлением движения положительных зарядов. Положительные заряды во внешней цепи движутся от положительного полюса источника к отрицательному. Таким же является и направление тока во внешней цепи.

Согласно формуле (6) разность потенциалов между полюсами источника зависит от его ЭДС и работы силы сопротивления по перемещению единичного положительного заряда внутри источника между его полюсами:

$$U_{ab} = \mathcal{E} - \frac{|A_c|}{q}. \quad (15)$$

Напомним, что сила сопротивления характеризует противодействие движению заряженной частицы (иона) со стороны молекул и ионов, с которыми она сталкивается в процессе движения в электролите.

**Закон Ома для замкнутой цепи.** Пренебрегая сопротивлением проводящих проводов, можно сказать, что

$$\Phi_{a'} = \Phi_a, \Phi_{b'} = \Phi_b,$$

поэтому

$$U_{ab} = U_{a'b'} = IR, \quad (16)$$

где  $I$  — сила тока, протекающего через лампу, или, как говорят, во внешней цепи.

*Полное сопротивление проводников, подключённых к источнику тока, называют сопротивлением внешней цепи или внешним сопротивлением ( $R$  — внешнее сопротивление).*

По определению (см. Ф-10, § 62) работа силы электрического поля по перемещению единичного положительного заряда внутри источника равна разности потенциалов на внутреннем участке цепи:

$$\frac{|A_c|}{q} = Ir, \quad (17)$$

где  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока.

Подставляя выражение (17) в уравнение (15), получаем *напряжение на зажимах источника тока*:

$$U_{ab} = \mathcal{E} - Ir, \quad (18)$$

или, с учётом (16),

$$IR = \mathcal{E} - Ir.$$



**Закон Ома для замкнутой цепи**

**Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:**

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}. \quad (19)$$

Внешнее и внутреннее сопротивления цепи соединены последовательно, поэтому полное сопротивление цепи равно их сумме.

Обычно внешнее сопротивление значительно превосходит внутреннее ( $R \gg r$ ), так что

$$I \approx \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (20)$$

При коротком замыкании, когда  $R \rightarrow 0$ , сила тока увеличивается до

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

возрастая по сравнению с обычным значением (20) в  $R/r$  раз.

Например, если лампочка фары автомобиля имеет сопротивление  $R = 10$  Ом, а внутреннее сопротивление аккумулятора  $r = 0,01$  Ом, то сила тока может возрасти в 1000 раз. Такое возрастание силы тока может привести к выделению большого количества теплоты и стать причиной пожара. Чтобы избежать этого, в цепь последовательно включают предохранители, которые плавятся при увеличении силы тока сверх нормы и размыкают электрическую цепь.

**В О П Р О С Ы**

1. Как определить направление тока в замкнутой цепи?
2. От чего зависит разность потенциалов между полюсами источника тока?
3. Что такое внешнее сопротивление цепи?
4. Чему равно напряжение на зажимах источника тока?
5. Сформулируйте и запишите закон Ома для замкнутой цепи.

**З А Д А Ч И**

1. В замкнутой цепи, содержащей источник тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 12$  В, сила тока  $I = 2$  А. Напряжение на зажимах источника  $U = 10$  В. Найдите внутреннее сопротивление источника  $r$  и сопротивление нагрузки.
2. При замыкании источника тока на резистор сопротивлением  $R_1 = 10$  Ом сила тока в цепи  $I_1 = 1$  А, а при замыкании на резистор сопротивлением  $R_2 = 4$  Ом сила тока  $I_2 = 2$  А. Найдите ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

3. В цепи, содержащей источник с ЭДС  $\mathcal{E} = 6$  В, замкнутый на внешнее сопротивление  $R = 9$  Ом, сила тока  $I = 0,6$  А. Найдите внутреннее сопротивление источника тока и силу тока короткого замыкания.

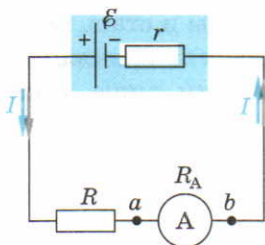
## § 8. Измерение силы тока и напряжения

**Амперметр.** Электрические приборы для измерения силы тока и напряжения бывают *цифровые* и *аналоговые*.

В качестве цифровых проборов используют электронные устройства, усиливающие электрический сигнал, количественно оценивающие (оцифровывающие) его и выводящие информацию на дисплей.

В наиболее часто встречающихся в школе аналоговых приборах используется поворот катушки в магнитном поле при протекании по ней электрического тока. Количественное измерение силы тока оказывается возможным, так как угол поворота рамки пропорционален силе тока, протекающего через неё (см. § 14).

**Амперметр — прибор для измерения силы электрического тока.**



### 22

Включение в цепь амперметра

Амперметр включается в цепь последовательно. Включение амперметра увеличивает сопротивление цепи (рис. 22), которое становится равным

$$R_{\text{ц}} = r + R + R_A.$$

Следовательно, амперметр покажет силу тока, меньшую, чем та, которая была до его включения. Для того чтобы включение амперметра не влияло на работу цепи, сопротивление амперметра должно быть малым по сравнению с сопротивлением цепи:  $R_A \ll (r + R)$ .

**Вольтметр.** Измерение разности потенциалов оказывается возможным, так как угол поворота катушки в магнитном поле пропорционален приложенному к ней напряжению.

**Вольтметр — прибор для измерения электрического напряжения.**

Принцип действия вольтметра такой же, как и у амперметра. При силе тока  $I$ , протекающего через вольтметр, он показывает напряжение  $U = IR_V$ . Вольтметр включается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором измеряется (рис. 23).

Включение вольтметра уменьшает сопротивление участка цепи, которое становится равным

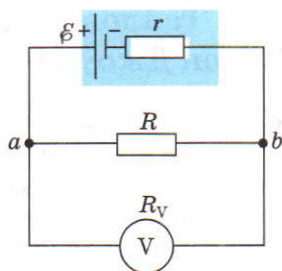
$$R_{ab} = \frac{R_V R}{R_V + R} = \frac{R}{1 + R/R_V}.$$

Следовательно, вольтметр покажет напряжение  $U_{ab}$ , меньше того, что было до его включения.

Для того чтобы включение вольтметра не искажало напряжение в цепи, сопротивление вольтметра должно значительно превосходить сопротивление цепи:  $R_V \gg R$ . В этом случае  $R_{ab} \approx R$ .

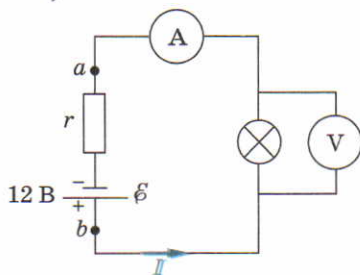
Обычно сопротивление вольтметра  $R_V \geq 1 \text{ МОм}$ .

Пример включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь показан на рисунке 24.



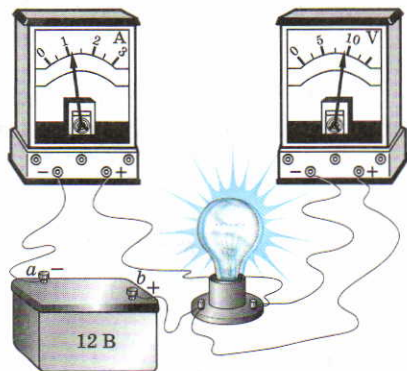
## 23

Включение в цепь вольтметра



## 24

Амперметр и вольтметр в электрической цепи



## В О П Р О С Ы

1. В чём отличие цифровых и аналоговых электрических приборов?
2. Для измерения какой физической величины используется амперметр?
3. Почему сопротивление амперметра должно быть малым? Насколько малым?
4. Для измерения какой физической величины используется вольтметр?
5. Почему сопротивление вольтметра должно быть большим? Насколько большим?



## § 9. Тепловое действие электрического тока.

### Закон Джоуля—Ленца

**Работа электрического тока.** Под действием электрического поля источника тока электроны в проводнике ускоряются в промежутках между столкновениями с ионами кристаллической решётки (рис. 25, а). Энергия направленного движения, приобретаемая электронами под действием электрического поля, тратится на нагревание кристаллической решётки проводника.

При приближении к положительному иону электрон притягивается к нему, изменяя направление движения. Импульс электрона при этом изменяется с  $\vec{p}_0$  на  $\vec{p}$ . Соответственно ион притягивается к электрону, приобретая импульс  $\vec{p}_i$  (рис. 25, б).

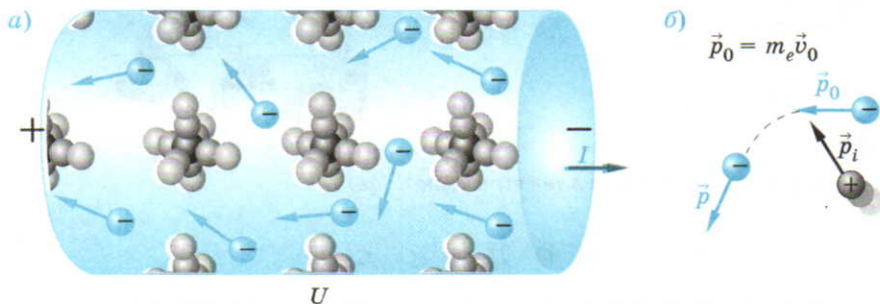
Ион, получив дополнительный импульс от электрона, из-за взаимодействия с ближайшими ионами в кристаллической решётке совершает колебательное движение около положения равновесия. Последующие столкновения иона с другими электронами увеличивают амплитуду колебания иона, среднюю энергию решётки и соответственно температуру проводника.

*Количество теплоты, получаемое кристаллической решёткой, т. е. выделяющееся в проводнике, равно работе электрического поля:*

$$Q = A. \quad (21)$$

Работу по перемещению единичного положительного заряда характеризует разность потенциалов. Для заряда  $q$

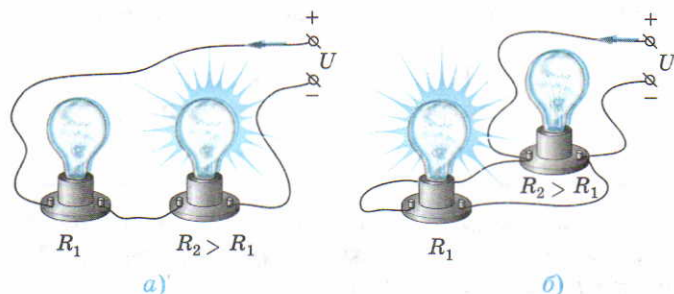
$$A = qU = qIR.$$



#### ▲ 25

*Механизм нагревания кристаллической решётки при протекании электрического тока:*

- а) движение электронов в проводнике;
- б) взаимодействие электрона и иона



26

Зависимость выделения тепла в проводниках от типа соединения:

а) последовательное соединение;  
б) параллельное соединение

При постоянной силе тока  $I$  заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $t$ , равен

$$q = It.$$

Закон (21) в 1831—1842 гг. был получен экспериментально английским учёным *Дж. Джоулем* и российским учёным *Э. Х. Ленцем*.

#### Закон Джоуля—Ленца

**Количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему тока:**

$$Q = I^2 R t. \quad (22)$$

Выделение энергии в проводниках зависит от типа их соединения. Так как сила тока в последовательно соединённых лампах одинакова, то количество теплоты, выделяемое в единицу времени, больше в лампе с большим сопротивлением (рис. 26, а).

Используя закон Ома (7) для однородного участка цепи, закон Джоуля—Ленца можно представить в виде, удобном для сравнения количества теплоты, выделяемого в параллельно соединённых проводниках:

$$Q = \frac{U^2}{R} t, \quad (23)$$

так как напряжение  $U$  на проводниках одинаково.

Из формулы (23) следует, что при параллельном соединении ламп (рис. 26, б) количество теплоты, выделяемое в каждой лампе в единицу времени, обратно пропорционально её сопротивлению.

Электрический чайник, кофеварка, тостер, калорифер, сварочный аппарат, лампа накаливания, электрическая пробка (предохранитель) —

вот лишь небольшой перечень приборов, в которых используется тепловое действие тока.

**Мощность электрического тока.** Важной характеристикой любого электроприбора является энергия, потребляемая им в единицу времени, или *мощность тока*.

**Мощность электрического тока — работа, совершаемая в единицу времени электрическим полем при упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике.**

По определению (см. Ф-10, § 25) средняя мощность тока равна

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t}.$$

С учётом формул (22), (23) получаем

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU. \quad (24)$$

При последовательном соединении проводников ( $I = \text{const}$ ) мощность, выделяемая в проводниках, пропорциональна их сопротивлению.

При параллельном соединении проводников ( $U = \text{const}$ ) мощность, выделяемая в проводниках, обратно пропорциональна их сопротивлению.

### В О П Р О С Ы

1. На что расходуется энергия направленного движения заряженных частиц в проводнике?
2. Чему равно количество теплоты, получаемое кристаллической решёткой проводника от направленно движущихся заряженных частиц?
3. Сформулируйте закон Джоуля—Ленца. Запишите его математическое выражение.
4. Дайте определение мощности электрического тока. Приведите формулу для расчёта этой мощности.
5. Как зависит мощность, выделяемая в проводниках с током, от типа их соединения?

### З А Д А Ч И

1. Найдите работу, совершённую силами электрического поля при прохождении зарядом 3 мКл разности потенциалов 220 В.
2. В проводнике сопротивлением 20 Ом сила тока 15 А. Найдите количество теплоты, выделяемое в проводнике за минуту.



3. Найдите сопротивление  $R$  двух одинаковых резисторов, если известно, что при подключении их к источнику тока с внутренним сопротивлением  $r$  мощность, выделяемая при их последовательном и параллельном соединении, одинакова.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В электрической схеме, изображённой на рисунке 27, найдите разность потенциалов  $U_2$  на резисторе с сопротивлением 2 Ом.

#### Решение

Для того чтобы найти разность потенциалов  $U_2$ , необходимо знать силу тока через сопротивление 2 Ом. Обозначим силу тока  $I$ ,  $I_1$  и  $I_2$  в каждом ответвлении цепи. Сила тока  $I_1$  протекает через последовательно соединённые сопротивления 2 Ом и 22 Ом, т. е. через результирующее сопротивление

$$R_1 = 2 \text{ Ом} + 22 \text{ Ом} = 24 \text{ Ом}.$$

Сила тока  $I_2$  протекает через последовательно соединённые сопротивления 8 Ом и 4 Ом, т. е. через результирующее сопротивление

$$R_2 = 8 \text{ Ом} + 4 \text{ Ом} = 12 \text{ Ом}.$$

Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  соединены параллельно. Следовательно, сопротивление  $R_{ab}$  между точками  $a$  и  $b$  равно

$$R_{ab} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{24 \cdot 12}{24 + 12} = 8 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление цепи  $R$  складывается из последовательно соединённых сопротивлений 1 Ом и  $R_{ab}$ :  $R = 9 \text{ Ом}$ . Из закона Ома можно найти силу тока  $I$ :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = 3 \text{ А}.$$

Напряжение  $U_{ab}$  между точками  $a$  и  $b$

$$U_{ab} = I R_{ab} = 24 \text{ В},$$

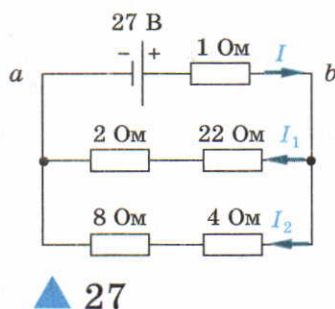
а сила тока

$$I_1 = U_{ab} / R_1 = 1 \text{ А}.$$

Зная  $I_1$ , можно найти разность потенциалов на резисторе с сопротивлением 2 Ом:

$$U_2 = I_1 r_2 = 2 \text{ В}.$$

**Ответ:**  $U_2 = 2 \text{ В}$ .



## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Электрический ток** — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц. Направленное движение свободных зарядов (носителей заряда) в проводнике возможно под действием внешнего электрического поля.

- За направление тока принимается направление движения положительно заряженных частиц.

- Единица силы тока (основная единица СИ) — *ампер* (1 А): 1 А = 1 Кл/с.

- **Постоянный электрический ток** — ток, сила которого не изменяется с течением времени.

- **Сторонние силы** — силы неэлектростатического происхождения, вызывающие разделение зарядов.

**ЭДС** — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

ЭДС равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока.

- **Закон Ома для однородного проводника (участка цепи):** сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R}.$$

- Сопротивление проводника прямо пропорционально его удельному сопротивлению и длине и обратно

пропорционально площади его поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Единица сопротивления — *ом* (1 Ом):

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}.$$

- **Резистор** — проводник с определённым постоянным сопротивлением.

- **Удельное сопротивление** — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади.

Единица удельного сопротивления — *ом-метр* (1 Ом·м).

Удельное сопротивление металлического проводника линейно возрастает с температурой:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha \Delta T),$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление при  $T_0 = 293 \text{ К}$ ,  $\Delta T = T - T_0$ ,  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Единица температурного коэффициента сопротивления  $\text{К}^{-1}$ .

Удельное сопротивление полупроводника уменьшается при увеличении температуры из-за увеличения числа свободных зарядов, способных переносить электрический ток.

- **Дырка** — вакантное электронное состояние в кристаллической решётке, имеющее избыточный положительный заряд.

- **Сверхпроводимость** — физическое явление, заключающееся в скачкообразном падении до нуля сопротивления вещества.

- **Критическая температура** — температура скачкообразного перехода вещества из нормального состояния в сверхпроводящее.
- При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений.
- **Закон Ома для замкнутой цепи:** сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

где  $R$  и  $r$  — внешнее и внутреннее сопротивления цепи.

- **Амперметр** измеряет силу электрического тока, включается в цепь последовательно.

- **Вольтметр** измеряет электрическое напряжение. Включается в цепь параллельно.
- Количество теплоты, выделяющееся в проводнике, равно работе электрического поля.
- **Закон Джоуля—Ленца:** количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему тока:

$$Q = I^2 R t.$$

- **Мощность электрического тока** — работа, совершаемая в единицу времени электрическим полем при упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU.$$



## § 10. Магнитное взаимодействие

**Постоянные магниты.** Свойство магнетита (или магнитного железняка) притягивать железные предметы было известно уже в глубокой древности. Слово «магнит» (от греч. *magnes*) означает название руды, добывавшейся в местности Магнезия ещё 2500 лет назад. Магнетит — минерал (рис. 28), состоящий из  $\text{FeO}$  (31%) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (69%).

Согласно китайской легенде император Хванг Ти (около 2600 лет до н. э.) вёл войско в сплошном тумане с помощью поворачивающейся вокруг оси магнитной фигурки, всегда смотрящей на юг. Начиная со II в. н. э. в Китае изготавливались *постоянные магниты*, надолго сохраняющие магнитные свойства. В XI в. магнитный компас стал использоваться в Европе.

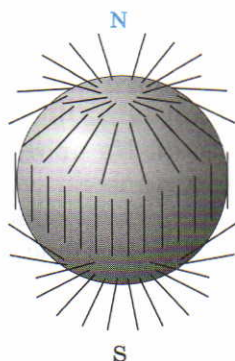
В 1269 г. французский исследователь **П. Марикур** (псевдоним П. Перегрин) ввёл понятие *магнитного полюса*. Помещая стальные иголки вблизи шара из магнетита, Перегрин заметил, что они испытывают наибольшее притяжение вблизи двух диаметрально противоположных точек (рис. 29). Только вблизи полюсов иголка ориентируется радиально. Магнит, изготовленный Перегрином в виде стержня, ориентировался в направлении юг—север подобно стрелке компаса. Полюс, указывающий направление на север, называли северным (N), а на юг — южным (S). Опыты Перегрин показали, что *одноимённые магнитные полюса отталкивают друг друга, а разноимённые притягивают* (рис. 30).



### ▲ 28

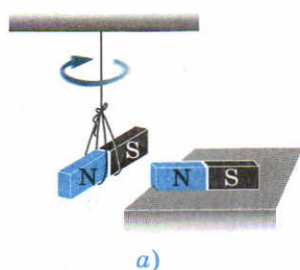
Притяжение стальных предметов магнитом

Предполагая, что взаимодействие магнитов обуславливается магнитными зарядами, находящимися на полюсах, Перегрин пытался их разделить. Однако все его попытки получить *магнитный монополюс* (магнитный заряд) не

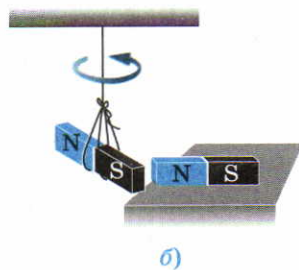


▲ 29

Иголки вблизи поверхности намагниченного шара



а)



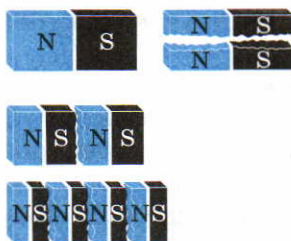
б)

30 ▲

Взаимодействие полюсов магнитов:  
а) отталкивание одноимённых полюсов;  
б) притяжение разноимённых полюсов

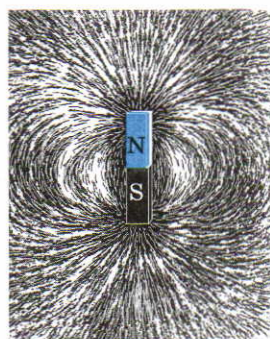
увенчались успехом. Каждый фрагмент разделённого магнита имел два полюса: северный и южный (рис. 31).

**Магнитное поле.** В 1600 г. **Уильям Гильберт**, врач английской королевы Елизаветы I, предположил, что Земля является большим естественным магнитом, а стрелки компаса (подобно иголкам в опыте Перегрини) указывают направление к его полюсам. Почти через 50 лет **Рене Декарт** обнаружил, что постоянный магнит действует на мельчайшие железные опилки, насыпанные вокруг него, подобно Земле, ориентирующей магнитную стрелку компаса (рис. 32, а). Тем самым

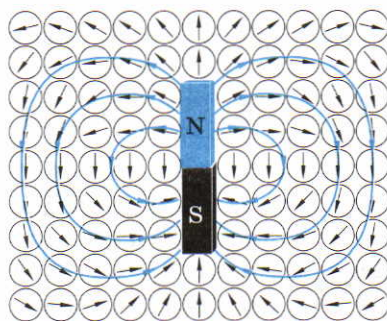


▲ 31

Возникновение двух полюсов в любых фрагментах магнита



а)



б)

32 ▲

Магнитное поле постоянного магнита:  
а) железные опилки в поле постоянного магнита;  
б) магнитные стрелки в поле постоянного магнита



он показал, что в пространстве существует магнитное взаимодействие (поле).

Линии, образуемые магнитными стрелками или железными опилками в магнитном поле, стали называть *силовыми линиями магнитного поля* или *линиями магнитной индукции* (рис. 32, б). На протяжении более четырёх тысячелетий единственным практически используемым источником магнетизма был магнитный железняк. Вплоть до начала XIX в. электричество и магнетизм считались физическими взаимодействиями, не связанными друг с другом.

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте основные результаты опытов Перегрини.
2. Приведите пример опыта, подтверждающего взаимодействие магнитов.
3. Какие опытные факты подтверждают существование магнитного поля Земли?
4. Почему железные опилки упорядоченно располагаются вблизи постоянного магнита?
5. Какие линии называют силовыми линиями магнитного поля?

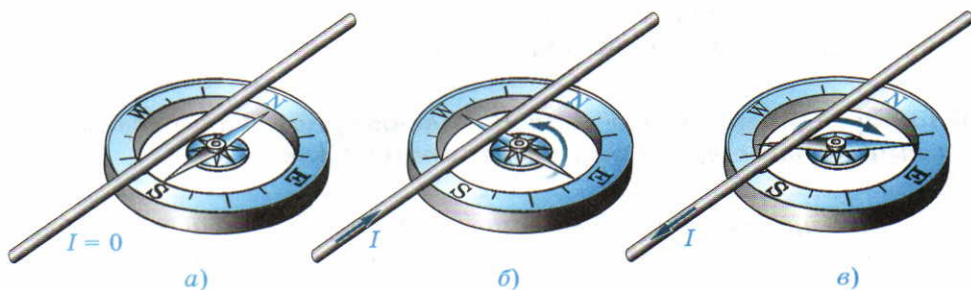
## § 11. Магнитное поле электрического тока

**Опыт Эрстеда.** Впервые взаимосвязь электричества и магнетизма зафиксирована в 1735 г. в одном из научных лондонских журналов. В статье отмечалось, что в результате удара молнии в комнате были разбросаны в разные стороны и сильно намагничены ножи и вилки. Это сообщение свидетельствовало о магнитном воздействии электрического разряда или тока на металлические предметы.

Однако разгадка взаимосвязи электричества и магнетизма пришла лишь после того, как исследователи научились получать электрический ток.

В 1820 г. было сделано одно из важнейших открытий в истории физики, когда *Ханс Эрстед*, профессор Копенгагенского университета, демонстрировал на лекции студентам нагревание проводника электрическим током. Эрстед обратил внимание на то, что стрелка компаса, случайно оказавшегося на столе под проводником, располагается в отсутствие тока параллельно проводнику (рис. 33, а), а при включении тока отклоняется почти перпендикулярно проводнику (рис. 33, б). Изменение направления тока сопровождалось аналогичным отклонением, но только в противоположную сторону (рис. 33, в). Таким образом, было показано, что электрический ток воздействует на магнитную стрелку.





### ▲ 33

#### Опыт Эрстеда

Опыт Эрстеда явился прямым доказательством взаимосвязи электричества и магнетизма: *электрический ток оказывает магнитное действие*. Покоящиеся заряды на магнитную стрелку не действуют. Следовательно, магнитное поле порождается движущимися зарядами.

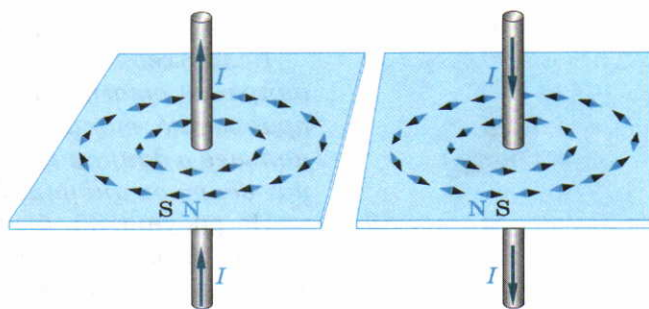
В плоскости, перпендикулярной проводнику с током, железные опилки и магнитные стрелки располагаются по касательным к концентрическим окружностям (рис. 34, а). Пространственная ориентация опилок и стрелок изменяется на противоположную (на  $180^\circ$ ) при изменении направления тока в проводнике (рис. 34, б).

Следовательно, в пространстве, окружающем проводник с электрическим током, возникает поле, называемое магнитным.

**Вектор магнитной индукции.** В магнитном поле тока магнитная стрелка устанавливается в определённом направлении. Это свидетель-



а)



б)

### ▲ 34

Магнитное действие проводника с током в перпендикулярной плоскости:

- а) на железные опилки;  
б) на магнитные стрелки

ствуется о том, что величина, характеризующая магнитное поле, должна быть векторной и связанной с ориентацией магнитной стрелки.

**Индукция магнитного поля  $\vec{B}$  — векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле.**

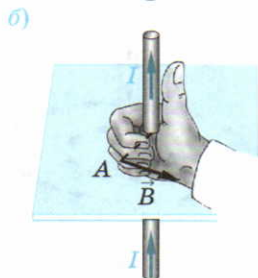
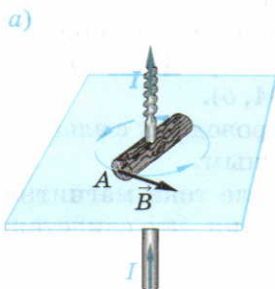
Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением северного полюса свободной магнитной стрелки в данной точке.

Модуль вектора  $\vec{B}$  будет определён нами в § 13.

Анализ многочисленных экспериментов показал, что направление вектора магнитной индукции можно найти, не используя магнитную стрелку.

Для определения направления вектора магнитной индукции поля, созданного вокруг проводника с током, следует использовать любое из приводимых ниже правил.

- Правило буравчика (правого винта, штопора) для прямого тока



Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление скорости вращательного движения конца его рукоятки в данной точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в этой точке.

На рисунке 35, а с помощью правила буравчика определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в точке А.

- Правило правой руки для прямого тока

Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление вектора индукции в этой точке.

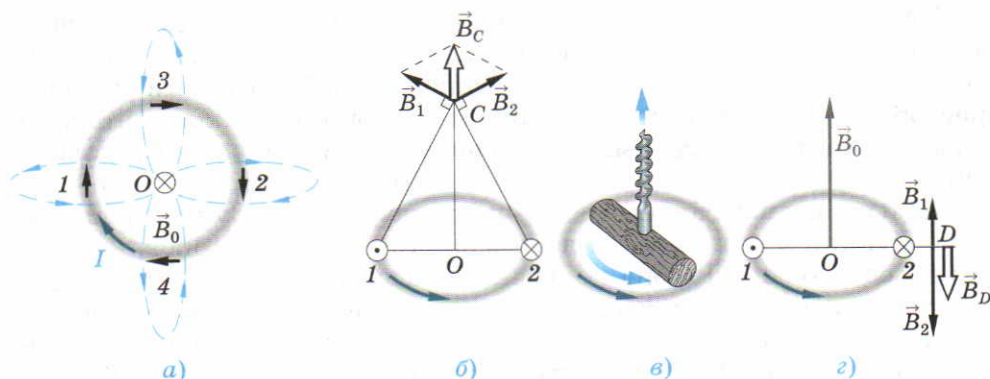
На рисунке 35, б с помощью правила правой руки определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в точке А (сравните с рис. 35, а). Воспользовавшись правилом буравчика, определим направление вектора магнитной индукции вблизи кольцевого тока. Сначала найдём направление вектора магнитной ин-

### ▲ 35

Определение направления вектора индукции:

- а) по правилу буравчика;  
б) по правилу правой руки





### ▲ 36

Магнитное поле кольцевого тока:

- а) в точке  $O$ ;
- б) в точке  $C$ ;
- в) на оси кольцевого тока;
- г) в точке  $D$

дукции в центре кольцевого тока, находящегося в плоскости чертежа и протекающего по часовой стрелке (рис. 36, а).

Правило буравчика, как и правило правой руки, позволяет находить направление вектора индукции магнитного поля, созданного только прямым током. Однако мысленно разделив криволинейный проводник на прямолинейные участки, можно найти направление вектора магнитной индукции от каждого участка, а затем сложить эти векторы.

Для магнитного поля, как и для электрического, выполняется принцип суперпозиции.

#### Принцип суперпозиции

**Результирующий вектор индукции магнитного поля в данной точке складывается из векторов индукции магнитного поля, созданного различными токами в этой точке:**

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n. \quad (25)$$

По правилу буравчика все прямолинейные участки (1, 2, 3, 4 (см. рис. 36, а)) кольцевого тока создают в его центре магнитное поле, индукция которого направлена от нас (перпендикулярно плоскости кольца). Этому направлению соответствует обозначение  $\otimes$  — вид стрелы со стороны её оперения. Так будет направлен вектор результирующей магнитной индукции в центре кольца.



Найдём теперь направление вектора магнитной индукции в произвольной точке  $C$  на оси кольцевого тока. Будем считать, что кольцевой ток находится в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа (рис. 36, б). Воспользуемся принципом суперпозиции. Элементарные прямые токи в диаметрально противоположных точках 1 и 2 кольца направлены соответственно к нам  $\odot$  и от нас  $\otimes$ . По правилу буравчика эти токи создают магнитные поля индукцией  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ . Суммарный вектор индукции магнитного поля, созданного этой парой токов, направлен по оси кольца. Разбив кольцевой ток на такие пары, можно утверждать, что результирующая индукция в точке  $C$  направлена по оси кольца. Направление вектора магнитной индукции на оси кольцевого тока (витка с током) можно найти по правилу буравчика (рис. 36, в).

- Правило буравчика для витка с током (контурного тока)

*Если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в витке, то поступательное перемещение буравчика совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля, созданного током в витке на своей оси.*

Определим направление вектора индукции магнитного поля, созданного кольцевым током в точке  $D$  (рис. 36, г).

Вектор магнитной индукции от элемента тока 1, протекающего к нам, будет направлен вверх, а от элемента тока 2, протекающего от нас, вниз. Учитывая, что индукция магнитного поля убывает с увеличением расстояния от проводника, элемент 2 создаёт большую индукцию, чем элемент тока 1. Поэтому результирующий вектор магнитной индукции снаружи от кольцевого тока направлен противоположно вектору магнитной индукции внутри кольцевого тока.

### В О П Р О С Ы

1. В чём состоит и что доказывает опыт Эрстеда?
2. Какая векторная физическая величина характеризует магнитное поле?
3. Сформулируйте правило буравчика и правило правой руки, определяющее направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного и электрического полей.
5. Как определить направление вектора магнитной индукции на оси витка с током? Как направлен вектор магнитной индукции снаружи от кольцевого тока?

## § 12. Магнитное поле

**Линии магнитной индукции.** Подобно линиям напряжённости электрического поля, вводятся *линии магнитной индукции*, дающие наглядную картину магнитного поля.

**Линии магнитной индукции** — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.

Линии индукции магнитного поля прямого проводника с током являются концентрическими окружностями с центром на оси проводника, лежащими в плоскостях, перпендикулярных проводнику (сравните рис. 37, а и 34, 35). Для поля, созданного витком с током, линии магнитной индукции изображены на рисунке 37, б. На этом же рисунке показаны векторы индукции в точках  $O$ ,  $C$  и  $D$ .

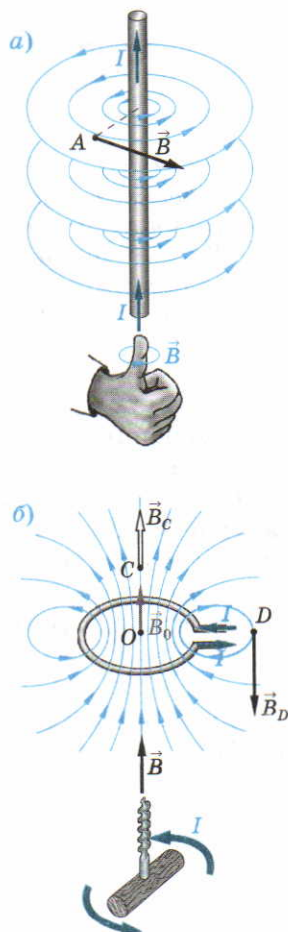
Витком тока является орбита электрона в атоме. Вращению электрона вокруг ядра со скоростью  $\vec{v}_e$  соответствует ток  $I$ , протекающий в противоположную сторону (рис. 38). В области ядра орбитальный ток создаёт собственную индукцию  $\vec{B}_0$ , перпендикулярную плоскости орбиты.

Уже на примере этих двух простейших конфигураций тока видна общая особенность линий индукции магнитного поля.

*Линии магнитной индукции замкнуты: они не имеют начала и конца, т. е. магнитное поле является вихревым.*

Это означает, что магнитное поле (в отличие от электрического) не имеет источников: магнитных зарядов (подобных электрическим) не существует.

Зная, как выглядят линии индукции магнитных полей для основных конфигураций тока, можно составить представление о магнитном поле более сложных конфигураций тока с помощью принципа суперпозиции для вектора магнитной индукции. Для двух одинаковых витков, находящихся в параллельных плоскостях (один под другим), по которым ток протекает в одном направлении, линии индукции магнитного поля приведены на рисунке 39.

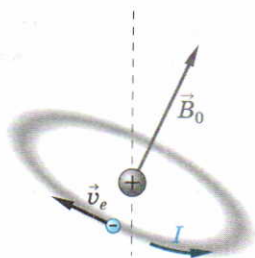


### ▲ 37

Линии магнитной индукции для основных конфигураций тока:

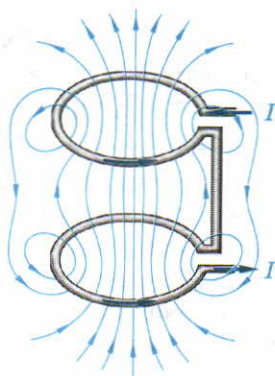
- а) прямой ток;
- б) виток с током





### ▲ 38

Плоскость орбиты электрона в атоме.  $B_0$  — индукция собственного магнитного поля, созданного орбитальным током  $I$



### ▲ 39

Линии индукции магнитного поля для двух витков

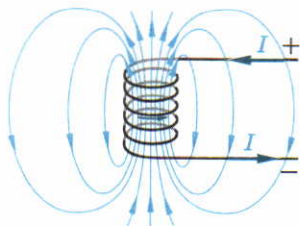
Для усиления магнитного поля используют не один виток, а катушку, содержащую несколько витков с током, соединённых последовательно и расположенных параллельно друг другу. Линии магнитной индукции поля, создаваемого катушкой с током (рис. 40, а), имеют практически ту же конфигурацию, что и линии индукции магнитного поля полосового постоянного магнита (рис. 40, б).

Северный полюс магнита — полюс, из которого выходят линии магнитной индукции.

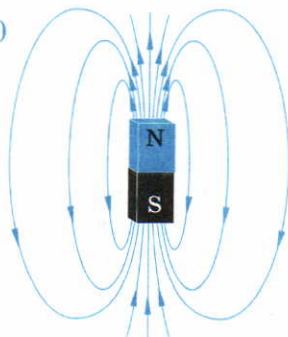
Южный полюс магнита — полюс, в который входят линии магнитной индукции.

**Земной магнетизм.** Большой вклад в изучение природы магнетизма внёс французский учёный **Андре Ампер**. Ампер выдвинул гипотезу, что магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Подобие линий индукции постоянного

а)



б)



### 40 ▶

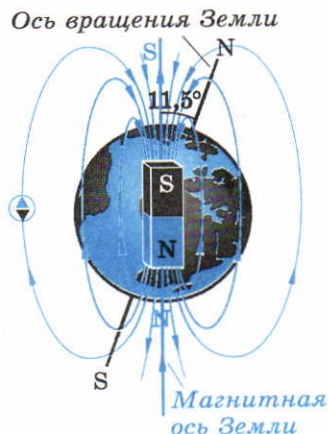
Линии индукции магнитного поля:

а) катушки с током;  
б) постоянного полосового магнита



полосового магнита и катушки с током (см. рис. 40) наглядно подтверждает эту гипотезу. Магнетизм Земли, согласно гипотезе Ампера, вызывается токами, обтекающими Землю с запада на восток. В то же время линии индукции магнитного поля Земли подобны линиям индукции полосового магнита (рис. 41). Правда, северный полюс этого магнита N близок к Южному полюсу Земли, а южный S — к её Северному полюсу. Магнитные полюса Земли отстоят от ближайших геофизических полюсов примерно на 800 км, а ось магнита составляет с земной осью угол  $11,5^\circ$ .

Северный полюс магнитной стрелки ориентируется по линии индукции магнитного поля Земли и поэтому показывает направление на южный магнитный полюс (или почти на Северный географический полюс). Реально природа земного магнетизма существенно сложнее, чем предполагал Ампер. Есть достаточно убедительные аргументы в пользу того, что за последние 170 млн лет 300 раз происходил обмен местами полюсов Земли. Последний раз такой обмен произошёл около 30 000 лет назад.



#### ▲ 41

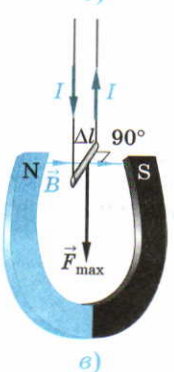
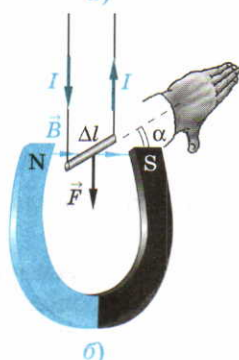
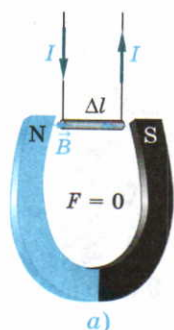
Магнитное поле Земли

### В О П Р О С Ы

1. Дайте определение понятия линий магнитной индукции.
2. В чём состоит характерная особенность линий магнитной индукции?
3. Почему линии индукции магнитного поля, создаваемого катушкой с током, имеют практически такую же конфигурацию, как и линии индукции полосового постоянного магнита?
4. Какой полюс магнита называют северным; южным?
5. Чем, согласно гипотезе Ампера, вызван земной магнетизм?

## § 13. Действие магнитного поля на проводник с током

**Закон Ампера.** Согласно гипотезе Ампера внутри молекул вещества циркулируют элементарные электрические токи. В намагниченном состоянии эти токи ориентированы согласованно, так, что их действия складываются. Воздействуя на магнитную стрелку, магнитное поле действует на токи, циркулирующие в ней. Поэтому для дальнейшего изучения свойств магнитного поля целесообразно изучить его действие на проводник с током.



## ▲ 42

Сила Ампера, действующая на проводник с током в магнитном поле:

а)  $\alpha = 0$ ;

б) произвольный угол  $\alpha$ ;

в)  $\alpha = 90^\circ$

Магнитное поле действует на все участки проводника с током. Зная направление и величину силы, действующей на каждый малый отрезок проводника (элемент тока), можно найти силу, действующую на весь проводник.

В 1820 г. Ампер экспериментально установил, от каких физических величин зависит сила, действующая на элемент тока, и куда она направлена.

Рассмотрим действие подковообразного магнита на отрезок проводника длиной  $l$ , который свободно подвешен в горизонтальной плоскости (рис. 42).

Вектор магнитной индукции в области, где находится отрезок проводника, направлен горизонтально от северного полюса магнита к южному.

Опыт показывает, что если тока в проводнике нет ( $I = 0$ ), то сила Ампера на проводник не действует. Она также отсутствует, если направление тока совпадает с вектором  $\vec{B}$  (рис. 42, а) или противоположно ему.

Если направление тока в проводнике составляет угол  $\alpha$  с вектором магнитной индукции (рис. 42, б), то сила Ампера, действующая на элемент тока длиной  $\Delta l$ , определяется законом Ампера.

### Закон Ампера

*Сила, с которой магнитное поле действует на помещённый в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями тока и магнитной индукции:*

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha. \quad (26)$$

Направление силы Ампера определяется правилом левой руки.

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная проводнику, входит в ладонь, то ото-



гнутой (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника (см. рис. 42, б).

Таким образом, сила Ампера перпендикулярна как направлению тока, так и вектору магнитной индукции.

**Модуль вектора магнитной индукции.** Максимальная сила  $F_{\max}$  действует на отрезок проводника, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, так как при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$  (рис. 42, в)

$$F_{A \max} = IB\Delta l. \quad (27)$$

Из этой формулы можно найти модуль вектора магнитной индукции.

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину отрезка проводника:

$$B = \frac{F_{A \max}}{I\Delta l}. \quad (28)$$

Модуль вектора магнитной индукции численно равен максимальной силе, действующей на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А.

Единица магнитной индукции — тесла (1 Тл):

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м}).$$

Магнитная индукция однородного поля равна 1 Тл, если на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует со стороны поля максимальная сила 1 Н.

**Таблица 2. Индукция магнитного поля**

Источник	Индукция, Тл	Источник	Индукция, Тл
Межзвёздное пространство	$10^{-10}$	Керамический магнит	$2 \cdot 10^{-2}$
Тело человека	$3 \cdot 10^{-10}$	Предельное магнитное поле при длительном воздействии на человека	0,2
Холодильник (50 Гц)	$10^{-6}$	Солнечное пятно	0,3
Солнечный свет	$3 \cdot 10^{-6}$	Электромагнит (лабораторный)	5
Тостер (50 Гц)	$3 \cdot 10^{-5}$	Щадящее магнитное воздействие на бактерии и мышей	14
Линия электропередачи, поле Земли	$5 \cdot 10^{-5}$	Сверхпроводник	40
Телевизор (50 Гц)	$10^{-4}$	Нейтронная звезда (на поверхности)	$10^8$
Миксер	$3 \cdot 10^{-4}$	Атомное ядро (на поверхности)	$10^{12}$
Юпитер (у полюсов)	$8 \cdot 10^{-4}$		
Фен (50 Гц)	$10^{-3}$		
Солнце (на поверхности)	$10^{-2}$		
Полосовой магнит (вблизи полюсов)	$10^{-2}$		



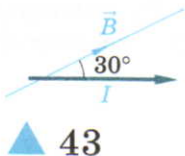
В таблице 2 приводятся значения магнитной индукции полей, созданных различными источниками.

### В О П Р О С Ы

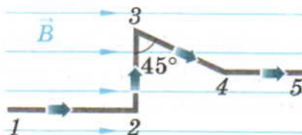
1. Почему магнитное поле действует на магнитную стрелку?
2. Сформулируйте закон Ампера. Запишите его математическое выражение.
3. Как ориентирована сила Ампера относительно направления тока и вектора магнитной индукции?
4. Как определяется направление силы Ампера? Сформулируйте правило левой руки.
5. Чему равен модуль вектора магнитной индукции? В каких единицах измеряется магнитная индукция?

### З А Д А Ч И

1. Прямой проводник длиной 15 см помещён в однородное магнитное поле с индукцией 0,4 Тл, направленной перпендикулярно направлению тока. Сила тока, протекающего по проводнику, равна 6 А. Найдите силу Ампера, действующую на проводник.
2. Проводник длиной  $l = 20$  см расположен горизонтально (рис. 43). Сила тока в проводнике  $I = 1$  А. С какой силой и в каком направлении действует на проводник однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл, направленной под углом  $30^\circ$  к горизонту?



43



44

3. Найдите силу, действующую на каждый отрезок проводника с током (рис. 44), находящегося в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл, если  $I = 0,5$  А,  $l_{12} = 20$  см;  $l_{23} = 15$  см;  $l_{34} = 12$  см;  $l_{45} = 15$  см.

## § 14. Рамка с током в однородном магнитном поле

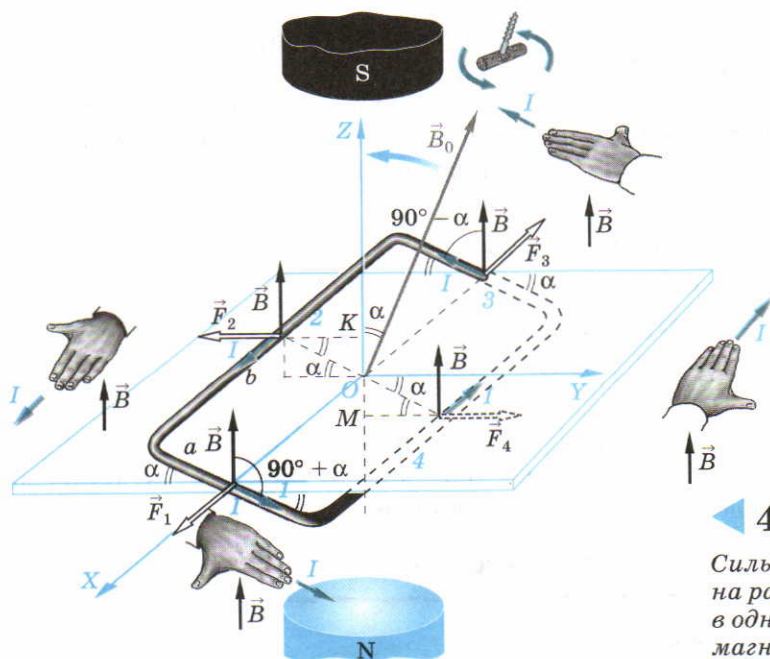
**Силы, действующие на стороны рамки.** Сила Ампера определяет действие магнитного поля на отрезок проводника с током. Силу, действующую на замкнутый проводник в целом, можно найти, суммируя силы, действующие на каждый малый отрезок проводника. Выясним, как действует магнитное поле на прямоугольную проволочную рамку, по которой протекает ток  $I$ . Магнитное поле в пределах рамки будем считать *однородным*.

**Однородное магнитное поле** — поле, во всех точках которого вектор магнитной индукции имеет одно и то же значение.

Линии индукции однородного магнитного поля, так же как и линии напряжённости однородного электростатического поля, — параллельные прямые. Число линий магнитной индукции, проходящих через единичную площадку, перпендикулярную им, пропорционально модулю вектора магнитной индукции.

Выбрав декартову систему координат  $X, Y, Z$ , предположим, что индукция внешнего магнитного поля, действующего на рамку, направлена по оси  $Z$  (рис. 45). Ось  $X$  проходит через середины сторон 1 и 3 рамки (длина сторон  $a$ ) параллельно сторонам 2 и 4 (длины  $b$ ). В результате поворота рамки вокруг оси  $X$  плоскость рамки составляет с плоскостью  $XY$  некоторый угол  $\alpha$ .

**Собственная индукция** — индукция магнитного поля, созданного током, протекающим по рамке.



◀ 45

Силы, действующие на рамку с током в однородном магнитном поле

Согласно правилу буравчика для контурного тока собственная индукция  $\vec{B}_0$  в центре рамки (в точке  $O$ ) перпендикулярна плоскости рамки и составляет с индукцией внешнего магнитного поля угол  $\alpha$ .

Найдём направления и величины сил, действующих на каждую из сторон рамки. Согласно правилу левой руки сила  $\vec{F}_1$ , действующая на сторону 1 рамки, направлена в положительном направлении оси  $X$ . Сила  $\vec{F}_3$  действует на сторону 3 в противоположном направлении. Силы  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_4$  направлены противоположно оси  $Y$  и вдоль неё соответственно.

Величина этих сил определяется с помощью закона Ампера. Как видно из рисунка 45, вектор  $\vec{B}$  образует с направлением тока, протекающего по сторонам рамки, следующие углы:

сторона 1 —  $\angle 90^\circ + \alpha$ ;

сторона 3 —  $\angle 90^\circ - \alpha$ ;

стороны 2, 4 —  $\angle 90^\circ$ .

С помощью закона Ампера получаем

$$F_1 = IBa \sin(90^\circ + \alpha) = IBa \cos \alpha,$$

$$F_3 = IBa \sin(90^\circ - \alpha) = IBa \cos \alpha,$$

$$F_2 = F_4 = IBb \sin 90^\circ = IBb.$$

Силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_3$  лишь растягивают рамку и компенсируют друг друга, не вызывая движение рамки.

Пара сил  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_4$  стремится повернуть рамку вокруг оси  $X$  в направлении, показанном голубой стрелкой.

**Вращающий момент.** Найдём момент сил, действующих на рамку. По определению *момент силы равен произведению силы на её плечо. Плечо силы — длина перпендикуляра, опущенного из точки на оси вращения на направление действия силы.*

Плечи сил  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_4$  равны друг другу ( $OK = OM = \frac{a}{2} \sin \alpha$ ), поэтому равны и моменты этих сил относительно точки  $O$ :

$$M_2 = F_2 \cdot OK; \quad M_4 = F_4 \cdot OM;$$

$$M_2 = M_4 = IbB \frac{a}{2} \sin \alpha.$$

Силы  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_4$  поворачивают рамку в одном направлении вокруг оси  $X$ , значит, их моменты складываются. Момент сил, действующих на рамку с током, помещённую в однородное магнитное поле, равен

$$M = ISB \sin \alpha, \quad (29)$$

где  $S$  — площадь рамки ( $S = ab$ ).



Как следует из формулы (29), вращающий момент сил, действующих на рамку, равен нулю в двух случаях: когда угол между собственной и внешней индукцией  $\alpha = 0$  и когда  $\alpha = 180^\circ$ .

Покажем эти два положения рамки, наблюдаемые с положительного направления оси  $X$  (см. рис. 45). При таком рассмотрении рамки (рис. 46) сторона 2 вырождается в точку с током, направленным к нам. Сторона 4 также видна как точка с током, протекающим от нас.

Чтобы выяснить, какое из двух положений рамки является устойчивым, а какое неустойчивым, выведем рамку из положения равновесия. Если при освобождении рамка вернётся в начальное положение, её равновесие устойчиво, а если не вернётся, то неустойчиво.

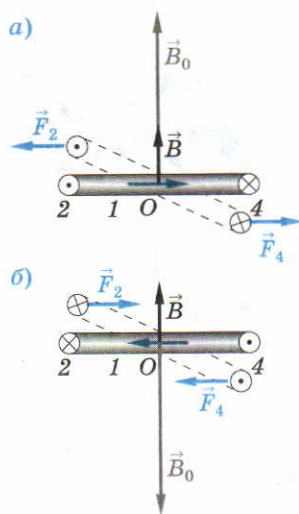
При небольшом повороте рамки относительно оси  $X$  по часовой стрелке на стороны рамки действует сила Ампера.

В первом случае (рис. 46, а) эти силы стремятся вернуть рамку в первоначальное положение, когда  $\alpha = 0$ . Во втором случае (рис. 46, б) силы выводят рамку из положения равновесия, переводя её в новое положение. Таким образом, положение рамки с током в магнитном поле является устойчивым, когда направление собственной индукции совпадает с направлением индукции внешнего магнитного поля.

В однородном магнитном поле замкнутый контур стремится установиться так, чтобы направление его собственной магнитной индукции совпало с направлением индукции внешнего магнитного поля.

**Принципиальное устройство электроизмерительного прибора и электродвигателя.** Поворот рамки с током в магнитном поле используют в электроизмерительных приборах (амперметрах, вольтметрах) магнитоэлектрической системы. В магнитном поле между постоянным магнитом и цилиндром из мягкого железа располагается катушка, способная вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 47). При такой конструкции угол  $\alpha$  между собственной и внешней индукцией равен  $90^\circ$ , так что вращательный момент сил, действующих на катушку, максимален.

Вращательный момент пропорционален силе тока  $I$  (см. формулу (29)) и числу витков  $N$ . Катушка поворачивается до тех пор, пока мо-

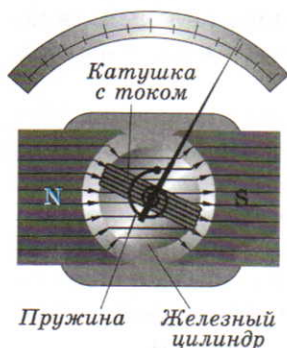


#### ▲ 46

Устойчивое и неустойчивое положение рамки с током в магнитном поле:

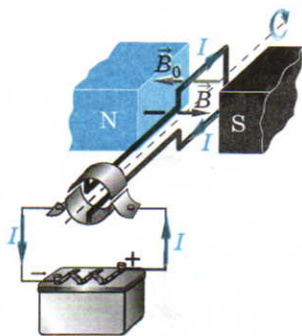
а)  $\alpha = 0$  — устойчивое равновесие;

б)  $\alpha = 180^\circ$  — неустойчивое равновесие



## ▲ 47

Принципиальное устройство электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы



## ▲ 48

Принципиальная схема электродвигателя постоянного тока

мент сил Ампера, действующих на неё со стороны магнитного поля, не уравновесится моментом сил упругости пружины, возвращающих катушку в положение равновесия. Можно считать, что момент сил упругости пружины пропорционален углу поворота  $\alpha$  катушки:

$$M_{\text{упр}} = C\alpha,$$

где  $C$  — постоянный коэффициент пропорциональности.

Равенство моментов  $C\phi = NISB$  позволяет найти измеряемую силу тока:

$$I = \frac{C}{NSB} \alpha.$$

Измеряемая сила тока прямо пропорциональна углу отклонения стрелки.

Вращение рамки с током в магнитном поле используется в электродвигателях постоянного тока, преобразующих электрическую энергию в механическую. Схематически устройство электродвигателя приведено на рисунке 48. Рамка с током, находящаяся в положении неустойчивого равновесия, поворачивается на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси. В момент, когда рамка проходит положение устойчивого равновесия, коллектор изменяет направление тока в рамке на противоположное. В результате рамка вновь оказывается в положении неустойчивого равновесия и, пройдя по инерции это положение, продолжает вращение в прежнем направлении. Коллектор — устройство для изменения направления тока, состоящее из двух полуколец, к которым прижимаются скользящие по ним контакты (*щётки*) для подведения тока к рамке.

## В О П Р О С Ы

1. Какое магнитное поле называют однородным?
2. Дайте определение собственной индукции.
3. Чему равен вращающий момент сил, действующих на рамку с током, помещённую в однородное магнитное поле? Как ориентируется виток с током в однородном магнитном поле?



4. Как используется воздействие магнитного поля на рамку с током в электроизмерительных приборах?
5. Объясните принцип работы электродвигателя постоянного тока.

### З А Д А Ч И

1. Круговой виток с током, протекающим против часовой стрелки в плоскости чертежа, помещают в магнитное поле, индукция которого направлена перпендикулярно плоскости чертежа (от нас). Отметьте направление собственной индукции витка. Будет ли действовать на виток вращающий момент? В каком положении виток будет находиться в состоянии устойчивого равновесия?
2. Квадратная рамка со стороной 10 см находится в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Плоскость рамки параллельна вектору магнитной индукции. Сила тока в рамке равна 5 А. Чему равен вращающий момент сил, действующих на рамку?
3. В однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл находится прямоугольная рамка со сторонами 4 и 5 см. Сила тока в рамке равна 5 А. Вектор магнитной индукции перпендикулярен одной из сторон рамки (длиной 5 см) и составляет с нормалью к плоскости рамки угол  $60^\circ$ . Найдите модули и направление сил, действующих на каждую сторону рамки.

## § 15. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы

**Сила Лоренца.** Как известно, магнитное поле оказывает силовое воздействие на проводник с током. Так как электрический ток — это направленное движение заряженных частиц, то магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы внутри проводника, например медного.

Найдём силу, действующую со стороны магнитного поля на одну движущуюся заряженную частицу.

На все направленно движущиеся частицы проводника, в котором сила тока  $I$ , а длина  $\Delta l$ , в однородном магнитном поле действует сила Ампера (рис. 49, а):

$$F_A = I \Delta l B \sin \alpha,$$

где  $B$  — модуль вектора индукции магнитного поля,  $\alpha$  — угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

В объёме проводника площадью поперечного сечения  $S$  находится число частиц

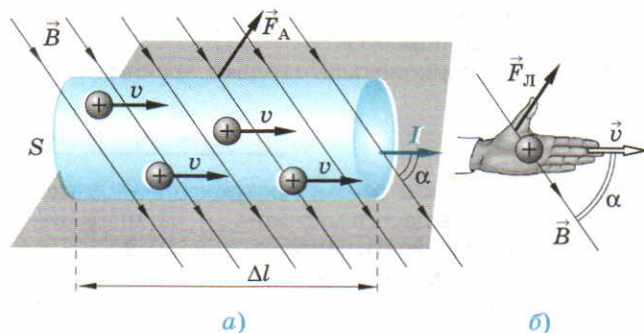
$$N = n S \Delta l,$$

где  $n$  — концентрация заряженных частиц (число зарядов в единице объёма).



49

Силы, действующие  
в магнитном поле  
на ток и заряд:  
а) сила Ампера  $\vec{F}_A$ ;  
б) сила Лоренца  $\vec{F}_L$



**Сила Лоренца — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.**

**Хендрик Лоренц** (1853—1928) — голландский физик, основатель электронной теории строения вещества.

При получении выражения для силы Лоренца учтём, что сила тока в проводнике связана с зарядом  $q$  одной частицы формулой

$$I = qnvS.$$

Тогда  $F_L = \frac{F_A}{N},$

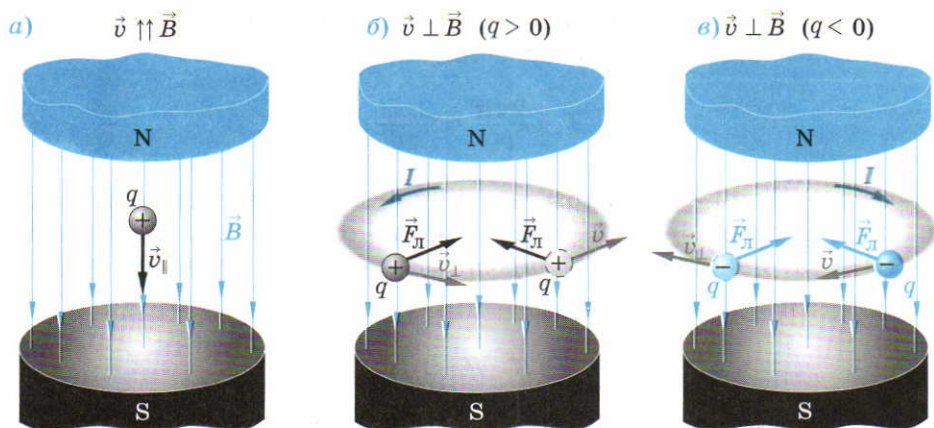
$$F_L = qvB \sin \alpha, \quad (30)$$

где  $\alpha$  — угол между скоростью заряженной частицы и вектором магнитной индукции.

Сила Лоренца перпендикулярна векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Направление силы Лоренца определяют по *правилу левой руки*.

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление скорости положительного заряда (или противоположное скорости отрицательного заряда), а составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная скорости частицы, входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на данный заряд (рис. 53, б).

**Плоские траектории движения заряженных частиц в однородном магнитном поле.** Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле зависит от угла  $\alpha$  между скоростью заряженной частицы и вектором магнитной индукции. Рассмотрим сначала два важных частных случая.



### ▲ 50

*Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле*

- Заряженная частица влетает в магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции:  $\vec{v}_{\parallel} \uparrow \vec{B}$ .

В этом случае  $\alpha = 0$ ,  $\sin \alpha = 0$ ,  $F_L = 0$ . В отсутствие силы Лоренца частица по инерции будет продолжать двигаться равномерно и прямолинейно с начальной скоростью вдоль линий магнитной индукции (рис. 50, а).

*Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, движется равномерно вдоль этих линий.*

- Заряженная частица влетает в магнитное поле со скоростью  $\vec{v}_{\perp}$  перпендикулярно линиям магнитной индукции.

В этом случае  $\alpha = 90^\circ$ ;  $\sin \alpha = 1$ ;  $F_A = qv_{\perp}B$ . Сила Лоренца перпендикулярна скорости, поэтому модуль скорости частицы не изменяется, но изменяется её направление. Сообщая частице постоянное центростремительное ускорение, сила Лоренца заставляет частицу массой  $m$ , имеющую скорость  $v_{\perp}$ , двигаться по окружности (рис. 50, б).

Найдём радиус этой окружности. Из второго закона Ньютона  $ma_n = F_L$  или  $m \frac{v_{\perp}^2}{R} = qv_{\perp}B$  следует, что

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}. \quad (31)$$

*Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности.*

Период обращения частицы по окружности в однородном магнитном поле не зависит от её скорости:

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (32)$$

В соответствии с правилом левой руки для определения направления силы Лоренца *вращение отрицательного заряда по окружности происходит в направлении, противоположном вращению положительного заряда* (рис. 50, в).

### В О П Р О С Ы

1. Каким образом, зная силу Ампера, можно найти силу Лоренца?
2. Дайте определение силы Лоренца. Чему равен её модуль?
3. Как определяется направление силы Лоренца с помощью правила левой руки?
4. Почему заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется по окружности? В каком случае частица движется в магнитном поле прямолинейно?
5. Почему разноимённые заряды, влетающие в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, вращаются по окружности в противоположных направлениях?

### З А Д А Ч И

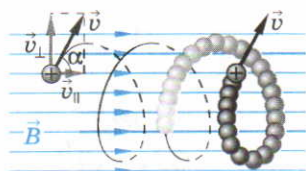
1. Индукция однородного магнитного поля  $B = 0,3$  Тл совпадает по направлению с осью  $X$ . Найдите модуль и направление силы Лоренца, действующей на протон, движущийся в направлении оси  $Y$  со скоростью  $v = 5 \cdot 10^6$  м/с (заряд протона  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).
2. Используя данные задачи 1, найдите радиус окружности, по которой движется протон, а также его период обращения по этой окружности (масса протона  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг).
3. Покоящаяся сначала  $\alpha$ -частица ( $m_{\alpha} = 6,68 \cdot 10^{-27}$  кг,  $q = +2e$ ), пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U = 1$  кВ, влетает в однородное магнитное поле. Диаметр окружности, по которой начинает вращаться  $\alpha$ -частица, равен  $D = 6,4$  см. Найдите модуль индукции магнитного поля.

## § 16. Пространственные траектории заряженных частиц в магнитном поле

**Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле.** Наиболее общий случай, когда заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под произвольным углом к линиям индукции, являет-



ся комбинацией рассмотренных выше частных случаев. Действительно, скорость частицы можно разложить на две составляющие — параллельную линиям индукции  $\vec{v}_{\parallel}$  и перпендикулярную им  $\vec{v}_{\perp}$  (рис. 51). Параллельная компонента скорости вызывает снос частицы в направлении линий магнитной индукции, а перпендикулярная определяет вращение частицы вокруг этих линий в перпендикулярной им плоскости. Результирующая траектория движения заряженной частицы — *винтовая линия*.



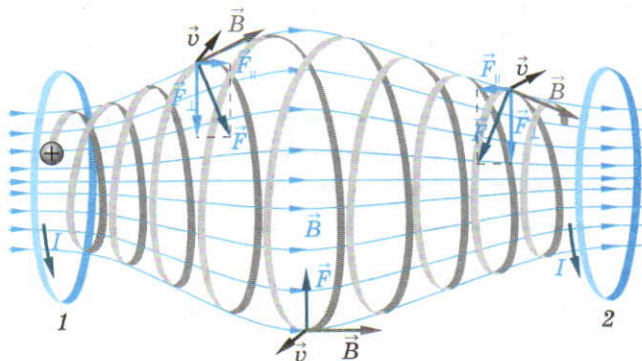
### 51

*Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле*

**Особенности движения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле.** В неоднородном магнитном поле индукция магнитного поля изменяется в пространстве как по величине, так и по направлению. В качестве примера неоднородного магнитного поля рассмотрим магнитное поле, созданное двумя витками с токами, протекающими в одном направлении (рис. 52).

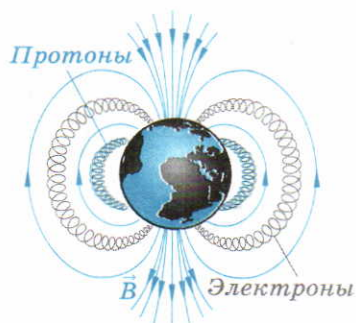
Сгущение линий индукции в какой-либо пространственной области (как и для линий напряжённости электрического поля) означает большее значение индукции магнитного поля в этой области. Индукция магнитного поля вблизи витков с током (см. рис. 52) больше, чем в пространстве между ними.

Изменение радиусов винтовой линии объясняется различием индукции в разных точках пространства. Согласно формуле (31) радиус винтовой линии обратно пропорционален индукции магнитного поля. Поэтому между витками, где индукция меньше, больше радиус винтовой линии. Вблизи витков радиус уменьшается из-за увеличения индукции в этой области. Заряженная частица движется вправо по винто-



### 52

*Движение заряженных частиц в магнитной ловушке*



### ▲ 53

#### Радиационные пояса Земли

странства высокотемпературной плазмы ( $T \approx 10^6$  К) при управляемом термоядерном синтезе.

В околоземном пространстве подобным образом движутся заряженные частицы космических лучей, летящие с большой скоростью в сторону Земли из космического пространства (главным образом, от Солнца). Магнитное поле Земли как защитный пояс предохраняет поверхность Земли от попадания на неё частиц высокой энергии, изменяя их траектории. Магнитное поле рассеивает наиболее быстрые частицы. Частицы с меньшей энергией попадают в магнитные ловушки, образуемые линиями индукции магнитного поля Земли, перемещаясь по винтовой линии между полюсами Земли за время порядка 1 с. В результате торможения заряженных частиц вблизи полюсов, а также их столкновений с молекулами атмосферного воздуха возникает электромагнитное излучение (радиация), наблюдаемое, в частности, в виде полярных сияний. Фотография полярного сияния, наблюдавшегося в 2000 г. на Аляске, представлена на обложке учебника. Спектральный состав излучения зависит от энергий заряженных частиц.

**Радиационные пояса — области в атмосфере Земли с повышенной концентрацией заряженных частиц.**

Различают внутренний радиационный пояс (рис. 53), располагающийся на высоте от 2400 до 6000 км, и внешний, находящийся на высоте от 12 000 до 20 000 км.

вой линии с изменяющимся радиусом (см. рис. 52). После того как частица пройдёт среднюю точку, сила, действующая на частицу, имеет компоненту  $\vec{F}_{\parallel}$ , тормозящую её движение вправо. В определённый момент эта сила останавливает движение частицы в этом направлении и начинает отталкивать её влево к витку 1. При приближении заряженной частицы к витку 1 она также тормозится и начинает циркулировать между витками, оказавшись в магнитной ловушке, или между «магнитными зеркалами».

Магнитные ловушки используются для удержания в определённой области про-



Во внешнем радиационном поясе Земли большинство заряженных частиц составляют электроны. Протоны, обладающие массой в 1836 раз большей, чем электроны, задерживаются лишь более сильным магнитным полем во внутреннем радиационном поясе.

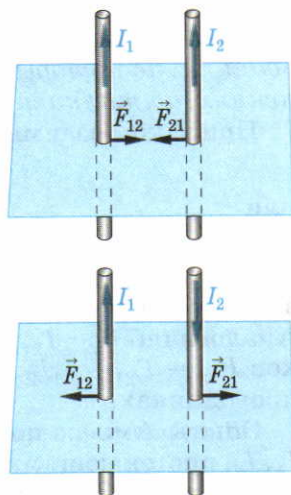
### В О П Р О С Ы

1. При каких условиях заряженная частица в однородном магнитном поле движется по винтовой линии?
2. Почему в неоднородном магнитном поле изменяется радиус винтовой линии, по которой движется заряженная частица?
3. Почему заряженная частица тормозится в области сильного магнитного поля?
4. Каким образом магнитное поле Земли предохраняет её поверхность от действия заряженных частиц высоких энергий?
5. Что такое радиационные пояса Земли? Почему электронный пояс Земли является внешним, а протонный — внутренним?

## § 17. Взаимодействие электрических токов

**Опыт Ампера с параллельными проводниками.** Как показал Эрстед, электрический ток действует на магнитную стрелку, т. е. создаёт магнитное поле. Ампер доказал, что магнитное поле воздействует на проводник с током. Он предположил также, что магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Поэтому *магнитное взаимодействие тел — результат взаимодействия электрических токов, протекающих в этих телах.*

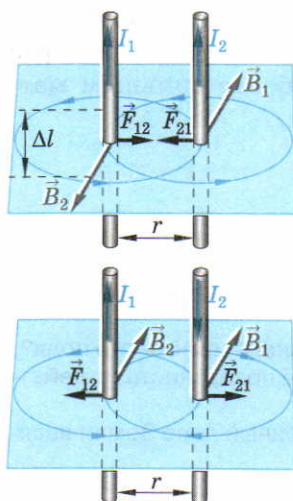
Считая, что «магнитные явления вызываются исключительно электричеством», Ампер продемонстрировал экспериментально, что проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются, а проводники с противоположно направленными токами отталкиваются (рис. 54). Взаимодействие проводников с током является как бы вторичным эффектом. Первичный эффект состоит в том, что ток, протекающий в одном из проводников, создаёт магнитное поле, которое с силой Ампера действует на ток в другом проводнике. Найдём сначала силу  $\vec{F}_{21}$ , действующую на второй проводник с током со стороны первого в случае параллельных токов. Первый ток во вто-



### ▲ 54

*Взаимодействие параллельных и антипараллельных токов*





### ▲ 55

Физика магнитного  
взаимодействия токов

Таким образом, мы доказали, что *параллельно расположенные проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются.*

Аналогично можно показать, что *параллельно расположенные проводники, по которым протекают токи в противоположных направлениях, отталкиваются.*

При таком взаимном расположении проводников

$$F_{21} = F_{12},$$

или

$$I_2 \Delta l B_1 = I_1 \Delta l B_2. \quad (33)$$

Последнее равенство означает, что индукция магнитного поля, созданного первым током, пропорциональна силе тока  $I_1$ , т. е.  $B_1 \sim I_1$ . Аналогично  $B_2 \sim I_2$ . Это означает, что сила взаимодействия проводников  $F_{12} = F_{21} \sim I_1 I_2$ , т. е. пропорциональна произведению сил тока в проводниках.

Опыты Ампера показали, что магнитные поля, создаваемые токами  $I_1, I_2$ , протекающими по бесконечно длинным параллельным проводникам, находящимся на расстоянии  $r$  друг от друга, приводят к возникновению на каждом отрезке проводников длиной  $\Delta l$  силы взаимодействия

$$F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l. \quad (34)$$

ром проводнике (по правилу буравчика) создаёт магнитное поле индукцией  $\vec{B}_1$  в горизонтальной плоскости, перпендикулярной второму току, направленную от нас (рис. 55). Поэтому на отрезок  $\Delta l$  второго проводника в магнитном поле с индукцией  $B_1$  действует сила Ампера

$$F_{21} = I_2 \Delta l B_1 \sin 90^\circ = I_2 \Delta l B_1.$$

По правилу левой руки она направлена в горизонтальной плоскости влево (в сторону тока  $I_1$ ). Ток  $I_2$  создаёт в первом проводнике магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_2$  в горизонтальной плоскости, перпендикулярной току  $I_1$ , направленную к нам. Сила Ампера  $\vec{F}_{12}$ , действующая на участок длины  $\Delta l$  проводника с током  $I_1$ , в магнитном поле с индукцией  $B_2$  равна

$$F_{12} = I_1 \Delta l B_2 \sin 90^\circ = I_1 \Delta l B_2.$$

По правилу левой руки сила  $\vec{F}_{12}$  направлена в горизонтальной плоскости вправо (в сторону

Коэффициент пропорциональности

$$k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2.$$

**Единица силы тока.** Формула (34) позволяет определить единицу силы тока — *ампер* (1 А). Наряду с килограммом, метром, секундой ампер относится к основным величинам СИ, через которые выражаются другие физические величины.

1 А — сила постоянного тока, который, протекая по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

### В О П Р О С Ы

1. В каком смысле взаимодействие проводников является вторичным эффектом?
2. Как взаимодействуют друг с другом параллельные и антипараллельные токи? Объясните, как теоретически определяются направления сил их взаимодействия.
3. Почему силы взаимодействия параллельных проводников с током равны друг другу?
4. Как сила взаимодействия параллельных токов зависит от расстояния между ними?
5. В каких единицах измеряется сила тока? Дайте определение ампера.

## § 18. Магнитный поток

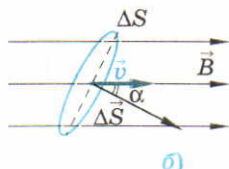
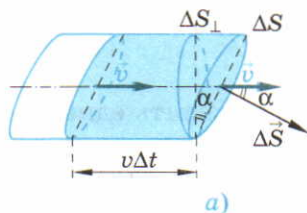
**Поток жидкости.** Вектор магнитной индукции характеризует магнитное поле в каждой точке пространства. Другая физическая величина — *магнитный поток* — является характеристикой магнитного поля в определённой области пространства. Название этой величины и её определение возникли из гидродинамической аналогии.

*Поток жидкости* — объём жидкости, протекающей сквозь поперечное сечение трубы за единицу времени. Найдём поток несжимаемой жидкости, движущейся со скоростью  $v$  вдоль цилиндрической трубы сечением  $\Delta S$  (рис. 56, а). Косое сечение трубы образует угол  $\alpha$  с сечением  $\Delta S_{\perp}$ , перпендикулярным оси цилиндра.

За промежуток времени  $\Delta t$  сквозь поперечное сечение трубы  $\Delta S$  пройдут частицы жидкости, находящиеся от него на расстоянии, меньшем  $v\Delta t$ . Эти частицы находятся в цилиндре объёмом

$$\Delta V = \Delta S_{\perp} v \Delta t; \quad \Delta S_{\perp} = \Delta S \cos \alpha.$$





### ▲ 56

Поток вектора:

- а) скорости жидкости;  
б) магнитной индукции

Следовательно, поток несжимаемой жидкости (или поток вектора скорости)

$$\Phi_v = v \Delta S \cos \alpha. \quad (35)$$

Часто вводится вектор площади контура  $\vec{\Delta S}$ , равный по модулю площади  $\Delta S$  и направленный перпендикулярно плоскости контура. Направление вектора площади определяется по правилу буравчика для витка с током (см. с. 38). Необходимо лишь выбрать направление обхода контура, ограничивающего площадь. Тогда поток вектора скорости определяется как скалярное произведение векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{\Delta S}$ <sup>1</sup>:

$$\Phi_v = (\vec{v} \vec{\Delta S}).$$

**Поток магнитной индукции.** По аналогии с потоком жидкости вводится магнитный поток (или поток магнитной индукции).

**Магнитный поток (поток магнитной индукции) через поверхность площадью  $\Delta S$  — физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади:**

$$\Phi = (\vec{B} \vec{\Delta S}) = B \Delta S \cos \alpha. \quad (36)$$

Магнитный поток равен произведению модуля вектора магнитной индукции  $B$  на площадь  $\Delta S$  и косинус угла между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{\Delta S}$  (рис. 56, б).

Единица магнитного потока — вебер (1 Вб).

1 Вб — магнитный поток, созданный однородным магнитным полем индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции ( $\cos \alpha = 1$ ).

### В О П Р О С Ы

1. Как определяется поток жидкости? Чему он равен?
2. Дайте определение магнитного потока.

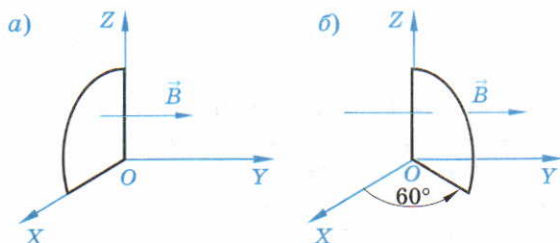
<sup>1</sup> Скалярное произведение двух векторов равно произведению их модулей на косинус угла между ними.



3. Как определяется направление вектора площади контура?
4. В каких единицах измеряется магнитный поток?
5. В каком случае магнитный поток равен 1 Вб?

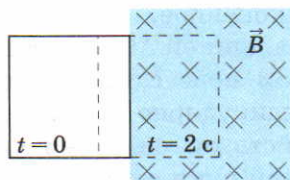
### З А Д А Ч И

1. Индукция однородного магнитного поля  $B = 0,1$  Тл направлена по оси  $Y$ . Найдите магнитный поток сквозь четверть круга радиусом  $R = 10$  см, расположенную в плоскости  $XZ$  (рис. 57, а); под углом  $60^\circ$  к плоскости  $XZ$  (рис. 57, б).

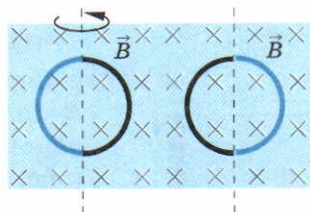


▶ 57

2. Квадратная рамка со стороной  $a = 10$  см движется со скоростью  $v = 3$  см/с в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 10^{-2}$  Тл, направленной перпендикулярно плоскости рамки (рис. 58). Найдите магнитный поток сквозь рамку в момент времени  $t = 2$  с.



▶ 58

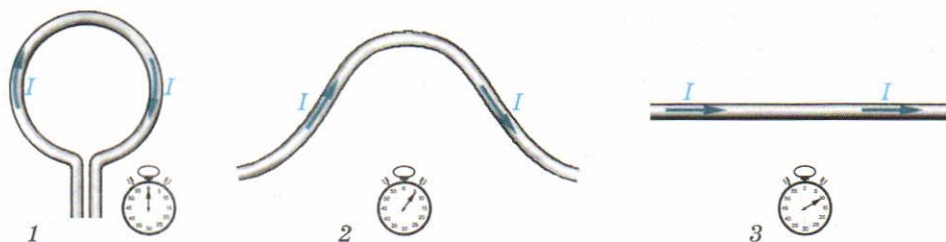


▶ 59

3. Проволочное кольцо радиусом  $R$ , находящееся в плоскости чертежа, поворачивается на  $180^\circ$  относительно вертикальной оси (рис. 59). Индукция магнитного поля  $\vec{B}$  перпендикулярна плоскости чертежа. Найдите изменение магнитного потока сквозь кольцо в результате его поворота.

## § 19. Энергия магнитного поля тока

**Работа силы Ампера при перемещении проводника с током в магнитном поле.** Электрический ток, протекающий по проводнику, создаёт в окружающем его пространстве магнитное поле, обладающее определённой энергией. В том, что магнитное поле, например витка с током, обладает энергией, легко убедиться экспериментально.



### ▲ 60

*Распрямление витка с током в результате действия магнитных сил*

При пропускании тока через гибкий свободный проводник, согнутый в виде кругового витка, проводник распрямляется (рис. 60).

Это происходит в результате действия магнитных сил отталкивания между диаметрально противоположными отрезками проводника, по которым токи протекают в противоположных направлениях. Самопроизвольный переход проводника из начального состояния 1 в конечное 3 (через промежуточное 2) означает, что энергия такого проводника с током в начальном состоянии больше, чем в конечном. Чтобы оценить энергию магнитного поля проводника с током, надо рассчитать работу, совершаемую силами магнитного поля (силами Ампера) при переходе проводника из начального состояния в конечное.

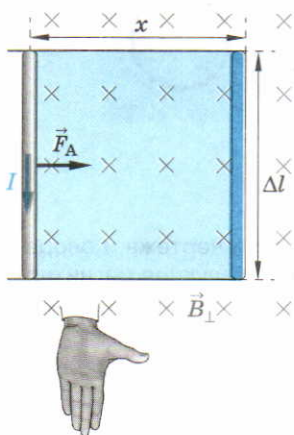
На отрезок проводника длиной  $\Delta l$ , сила тока в котором  $I$ , в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  (направленной перпендикулярно плоскости чертежа — от нас) действует сила Ампера (рис. 61). По правилу левой руки сила Ампера направлена вправо. Под действием силы Ампера покоящийся вначале проводник смещается вправо на расстояние  $x$ . При таком перемещении работа, совершаемая силой Ампера, равна

$$\delta A = F_A x = I B \Delta l x,$$

а отрезок проводника пересекает площадь  $\Delta S = \Delta l x$ , пронизываемую линиями индукции магнитного поля. Тогда

$$\delta A = I \Delta \Phi, \quad (37)$$

где  $\Delta \Phi = B \Delta S$  — магнитный поток через площадь  $\Delta S$ .



### ▲ 61

*Сила Ампера, действующая на движущийся проводник с током*

**Индуктивность контура с током.** Магнитный поток, пронизывающий виток с током, пропорционален магнитной индукции  $\Phi \sim B$ . В то же время значение собственной индукции поля, создаваемого током, протекающим в витке, прямо пропорционально силе тока  $I$ , т. е.  $B \sim I$ . Следовательно,  $\Phi \sim I$ , или

$$\Phi = LI, \quad (38)$$

где  $L$  — индуктивность витка.

**Индуктивность контура (или коэффициент самоиндукции)** — физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника, и силой тока в контуре.

Индуктивность подобно электроёмкости зависит от размеров проводника, его формы, но не зависит от силы тока в проводнике. Индуктивность зависит также от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Единица индуктивности — **генри** (1 Гн).

Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе тока 1 А его пронизывает магнитный поток 1 Вб.

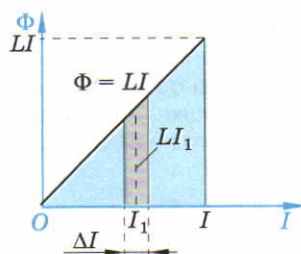
**Энергия магнитного поля.** Формула (37) получена для изменения энергии контура при его движении во внешнем магнитном поле в результате изменения магнитного потока. Подобное изменение происходит и в неподвижном контуре в результате изменения силы тока в нём. Если форма контура остаётся неизменной, то поток изменяется только за счёт изменения силы тока  $\Delta I$ . Тогда

$$\Delta\Phi = L\Delta I. \quad (39)$$

Выражение для элементарной работы  $\delta A$  при таком изменении силы тока согласно формуле (37) имеет вид

$$\delta A = LI_1 \Delta I.$$

Графически элементарная работа определяется площадью трапеции со средней линией  $LI_1$  и высотой  $\Delta I$  (рис. 62).



## 62

Геометрическая интерпретация энергии магнитного поля контура с током: суммарная работа определяется площадью прямоугольного треугольника под прямой  $\Phi = LI$  со сторонами  $LI$  и  $I$



При изменении силы тока в проводнике от нуля до  $I$  суммарная работа равна

$$A = \frac{LI^2}{2}.$$

Такая же энергия магнитного поля  $W_m$  накапливается в катушке с индуктивностью  $L$  при силе тока в ней  $I$ :

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (40)$$

### В О П Р О С Ы

1. Почему энергия прямого проводника с током меньше, чем согнутого в виток?
2. Почему собственный магнитный поток, пронизывающий виток с током, пропорционален силе тока в витке?
3. Дайте определение индуктивности контура. В каких единицах она измеряется?
4. Как определить графически работу сил магнитного поля?
5. Какая энергия накапливается в контуре индуктивностью  $L$  при силе тока в нём  $I$ ?

### З А Д А Ч И

1. В плоскости чертежа перпендикулярно линиям индукции, направленной от нас, расположен виток с током. Каким должно быть направление тока в кольце, чтобы работа внешних сил при повороте кольца вокруг его диаметра на  $180^\circ$  была положительной?
2. При силе тока  $2,5 \text{ А}$  в катушке возникает магнитный поток  $5 \text{ мВб}$ . Найдите индуктивность катушки.
3. В катушке, индуктивность которой  $0,5 \text{ Гн}$ , сила тока  $6 \text{ А}$ . Найдите энергию магнитного поля, запасённую в катушке.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Две частицы, имеющие отношение зарядов  $\frac{q_1}{q_2} = 2$  и отношение масс

$\frac{m_1}{m_2} = 4$ , влетели в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и движутся по окружностям с отношением радиусов  $\frac{R_1}{R_2} = 2$ .

Найдите отношение кинетических энергий  $\frac{W_1}{W_2}$  этих частиц.

**Решение**

В таком однородном магнитном поле заряженные частицы движутся по окружностям радиусов

$$R_1 = \frac{m_1 v_1}{q_1 B} \text{ и } R_2 = \frac{m_2 v_2}{q_2 B}.$$

Отношение этих радиусов  $\frac{R_1}{R_2} = 2 = \frac{(m_1 v_1) q_2}{(m_2 v_2) q_1}$ , поэтому отношение импульсов этих частиц

$$\frac{m_1 v_1}{m_2 v_2} = 2 \frac{q_1}{q_2} = 4.$$

Отношение кинетических энергий частиц представим в виде

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{m_1 v_1^2 \cdot 2}{2 m_2 v_2^2} = \frac{(m_1 v_1)^2}{(m_2 v_2)^2} \frac{m_2}{m_1} = \frac{16}{4} = 4.$$

**Ответ:** отношение кинетических энергий  $\frac{W_1}{W_2} = 4$ .

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Электрический ток оказывает магнитное действие. Таким образом, магнитное поле порождается движущимися зарядами.
- **Вектор индукции магнитного поля** — векторная физическая величина, направление которой в данной точке совпадает с направлением, указываемым в этой точке северным полюсом свободной магнитной стрелки.
- **Модуль вектора магнитной индукции** равен отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока и длины отрезка проводника:

$$B = \frac{F_{\text{Аmax}}}{I \Delta l}.$$

Единица магнитной индукции — тесла (1 Тл).

- **Правило буравчика для прямого тока:** если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление скорости движения конца его рукоятки совпадает с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.
- **Правило правой руки для прямого тока:** если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец вдоль тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление вектора индукции в этой точке.
- **Принцип суперпозиции магнитных полей:** результирующая магнитная индукция в данной точке складывается из векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке:

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

- **Правило буравчика для витка с током (контурного тока):** если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в витке, то поступательное перемещение буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции, созданной током в витке на своей оси.

- **Линии магнитной индукции** — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции. Линии магнитной индукции всегда замкнуты: они не имеют начала и конца. Магнитное поле — вихревое поле, т. е. поле с замкнутыми линиями магнитной индукции.

- **Магнитный поток (поток магнитной индукции)** через поверхность определённой площади — физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади:

$$\Phi = (\vec{B} \Delta \vec{S}).$$

Единица магнитного потока — *вебер* (1 Вб):  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ .

- **Закон Ампера:** сила, с которой магнитное поле действует на помещённый в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока, магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями тока и вектором магнитной индукции:

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha.$$

- В однородном магнитном поле замкнутый контур стремится установиться так, чтобы направление его собственной индукции совпало с направлением внешней индукции.

- **Сила Лоренца** — сила, действующая на движущуюся со скоростью  $v$

заряженную частицу со стороны магнитного поля  $B$ :

$$F_L = qvB \sin \alpha,$$

где  $q$  — заряд частицы,  $\alpha$  — угол между скоростью частицы и индукцией магнитного поля.

Направление силы Лоренца определяет **правило левой руки**: если кисть левой руки расположить так, чтобы четыре вытянутых пальца указывали направление скорости положительного заряда (или противоположного скорости отрицательного заряда), а составляющая вектора магнитной индукции, перпендикулярная скорости частицы, входила в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на данный заряд.

- Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, движется равномерно вдоль этих линий. Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности.
- Параллельно расположенные проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются, а в противоположных — отталкиваются.
- Магнитные поля, создаваемые токами  $I_1$ ,  $I_2$ , протекающими по бесконечно длинным параллельным проводникам, находящимся на расстоянии  $r$  друг от друга, приводят к возникновению на каждом отрезке проводников длиной  $\Delta l$  силы взаимодействия:

$$F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l,$$



где  $k_m$  — коэффициент пропорциональности,  $k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ .

Единица силы тока — *ампер* (1 А).

- Сила постоянного тока равна 1 А, если ток, протекая по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ .

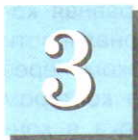
- **Индуктивность контура** (или коэффициент самоиндукции) —

физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника, и силой тока в контуре.

Единица индуктивности — *генри* (1 Гн).

- **Энергия магнитного поля**, созданного при протекании силы тока  $I$  по проводнику с индуктивностью  $L$ , равна

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$



# Электромагнетизм

## § 20. ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле

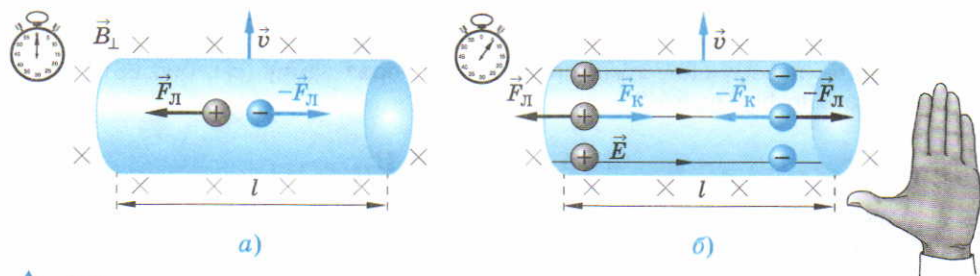
**Разделение разноимённых зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле.** Опыт Эрстеда (см. § 11) показал, что электрический ток оказывает магнитное действие. Таким образом, электрическое поле, вызывающее электрический ток, порождает магнитное поле. В свою очередь, магнитное поле может вызывать перераспределение электрических зарядов в движущемся проводнике, приводя к возникновению электрического поля.

При движении проводника со скоростью  $\vec{v}$  вместе с ним направлены перемещаются положительные и отрицательные заряды, находящиеся в проводнике и взаимно компенсирующие электрическое поле друг друга. В магнитном поле, вектор магнитной индукции  $\vec{B}_\perp$  которого перпендикулярен движению проводника, сила Лоренца действует на положительные и отрицательные заряды в противоположные стороны (рис. 63, а). Это приводит к пространственному разделению положительных и отрицательных зарядов (рис. 63, б). В металлическом проводнике электроны под действием силы Лоренца смещаются вправо (см. рис. 63, б). При этом слева возникает область с положительным зарядом.

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки. Силой, противодействующей разделению зарядов, является кулоновская сила притяжения между ними. Напряжённость  $\vec{E}$  электрического поля в таком проводнике направлена от плюса к минусу. Дальнейшее разделение зарядов заканчивается, когда сила Кулона  $F_K$  становится равной силе Лоренца  $F_L$ .

Учитывая, что  $F_K = qE$ ,  $F_L = qvB_\perp$ , находим

$$E = vB_\perp.$$



### ▲ 63

Разделение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле:

- а) положительные и отрицательные свободные заряды;  
б) равновесие перераспределённых зарядов

Этой напряжённости поля соответствует определённая разность потенциалов между концами проводника.

**ЭДС индукции.** В проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает разность потенциалов, или *ЭДС индукции*:

$$\mathcal{E}_i = U = El = vB_{\perp}l. \quad (41)$$

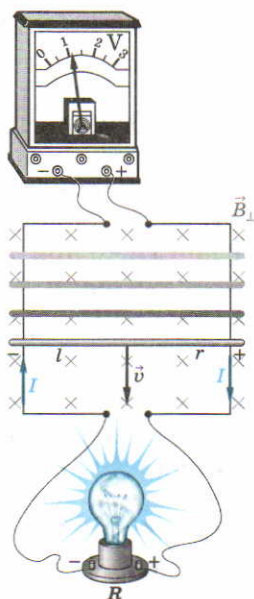
Проводящая перемычка, движущаяся по двум параллельным проводам, замкнутым на лампу и помещённым в магнитное поле, является простейшим генератором постоянного тока (рис. 64). Вольтметр фиксирует заметную разность потенциалов лишь при наличии сильного магнитного поля (см. формулу (41)).

Сила тока, проходящего через лампу (согласно закону Ома для замкнутой цепи), равна

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R + r} = \frac{vB_{\perp}l}{R + r}. \quad (42)$$

### В О П Р О С Ы

1. Какая сила вызывает перераспределение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле?
2. Какая сила препятствует перераспределению зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле?
3. При каком условии заканчивается перераспределение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле?



### ▲ 64

*Возникновение ЭДС на концах проводника, движущегося в магнитном поле*



4. Чему равна ЭДС индукции на концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $\vec{v}$  перпендикулярно линиям индукции  $\vec{B}$  однородного магнитного поля?
5. Объясните, почему силу тока, проходящего через лампу (см. рис. 68), можно рассчитать по формуле (42).

### З А Д А Ч И

1. Самолёт летит горизонтально со скоростью  $v = 1080$  км/ч. Найдите разность потенциалов между концами его крыльев (размах крыльев  $l = 30$  м), если модуль вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли  $B = 5 \cdot 10^{-5}$  Тл.
2. В одной плоскости с прямым длинным проводником с током находится прямоугольная проволочная рамка, две стороны которой параллельны направлению тока в проводнике. Будет ли возникать индукционный ток в рамке и каким будет его направление, если рамка движется в собственной плоскости от провода; к проводу; вдоль провода?
3. Проводящая медная перемычка длиной  $l = 0,2$  м с поперечным сечением  $S = 0,017$  мм<sup>2</sup> равномерно скользит со скоростью  $v = 3,2$  м/с по проводам ( $R_{\text{пр}} = 0$ ), замкнутым на резистор  $R = 0,3$  Ом. Найдите силу тока, протекающего через резистор, если вектор индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости движения перемычки,  $B = 0,1$  Тл.

## § 21. Электромагнитная индукция

**Электромагнитная индукция.** В 1831 г. английский физик *Майкл Фарадей* установил, что электрический ток может возникать в контуре не только при движении проводника в магнитном поле, но и при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Им было открыто явление *электромагнитной индукции*.

**Электромагнитная индукция — физическое явление, заключающееся в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.**

Электрический ток, возникающий при электромагнитной индукции, называется *индукционным*. Изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, возможно (см. формулу (36)) при изменении с течением времени: 1) площади поверхности, ограниченной контуром; 2) модуля вектора магнитной индукции; 3) угла, образуемого вектором магнитной индукции с вектором площади этой поверхности.

Предположим, что прямоугольный контур в плоскости чертежа образован двумя параллельными проводниками, соединёнными подводящими проводами («шинами»), сопротивлением которых можно пренебречь (рис. 65). Линии индукции однородного магнитного поля  $\vec{B}_\perp$  направлены перпендикулярно плоскости чертежа (от нас). Длина проводников  $l$ . Проводник сопротивлением  $R$  неподвижен. Проводник сопротивлением  $r$ , находящийся в начальный момент времени на расстоянии  $a$  от неподвижного проводника, удаляется от него с постоянной скоростью  $\vec{v}$ .

Найдём изменение магнитного потока через контур. Для этого нужно определить направление вектора площади контура. Если выбрать за положительное направление обхода контура направление по часовой стрелке, то по правилу буравчика для контурных токов вектор площади будет направлен от нас (перпендикулярно плоскости чертежа). В этом случае угол между векторами индукции  $\vec{B}_\perp$  и площади контура  $\Delta\vec{S}$  будет равен нулю. В произвольный момент времени  $t$  магнитный поток через контур равен

$$\Phi = B_\perp \Delta S, \\ \Delta S = l(a + vt).$$

Тогда магнитный поток изменяется с течением времени по закону

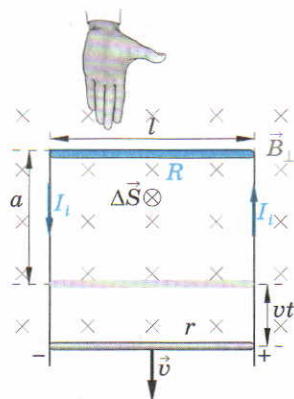
$$\Phi = B_\perp l(a + vt).$$

Изменение любой величины в единицу времени (или скорость изменения величины) характеризует её производная по времени. Найдём производную по времени от магнитного потока:

$$\Phi' = B_\perp lv. \quad (43)$$

При сравнении формул (43) и (41) видно, что по модулю производная от магнитного потока по времени равна ЭДС индукции, возникающей в контуре.

Направление индукционного тока (так же как и величина ЭДС индукции) считается положительным, если оно совпадает с выбранным направлением обхода контура, и отрицательным, если оно противоположно направлению обхода контура.



## 65

Возникновение индукционного тока при изменении площади контура



**Закон Фарадея.** На рисунке 65 показано, что индукционный ток в контуре направлен против часовой стрелки, т. е. сила тока и ЭДС индукции отрицательны. Фарадей учёл это, введя знак «минус» в закон электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'. \quad (44)$$

**Закон электромагнитной индукции,  
или закон Фарадея**

*ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.*

Правило определения направления индукционного тока было установлено российским физиком *Эмилием Христиановичем Ленцем*.

**Правило Ленца**

*Индукционный ток в контуре имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.*

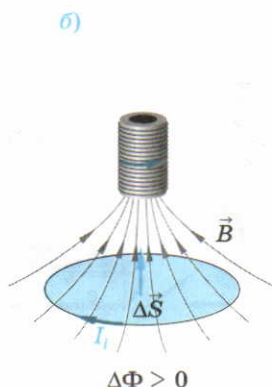
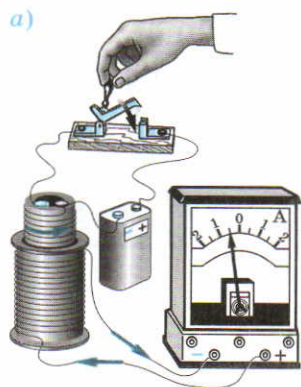
Например, при увеличении магнитного потока через контур (см. рис. 65)  $\Phi' > 0$ . Следовательно, магнитный поток  $\Phi_i$  индукционного тока будет отрицательным  $\Phi_i < 0$ . Это означает, что магнитный поток  $\Phi_i$  будет сдерживать резкое возрастание потока  $\Phi$ .

При уменьшении магнитного потока через контур  $\Phi' < 0$ . В этом случае  $\Phi_i > 0$ , т. е. магнитный поток  $\Phi_i$  индукционного тока не позволит потоку  $\Phi$  резко убывать, поддерживая его.

**Опыты Фарадея с катушками.** Первоначально электромагнитная индукция была открыта Фарадеем в эксперименте с двумя вставленными друг в друга катушками (рис. 66, а). Наружная катушка была присоединена к гальванометру. Внутренняя соединялась через ключ с батареей. Индукционный ток через гальванометр наблюдался только при замыкании или размыкании цепи, т. е. при изменении магнитного потока через наружную катушку. При непрерывном прохождении тока через внутреннюю катушку ток через гальванометр отсутствовал.

При замыкании ключа ток начинает протекать по внутренней катушке в направлении, показанном на рисунке 66, а. Он создаёт поле,



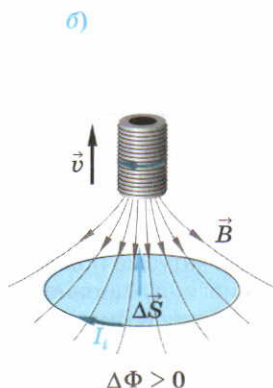
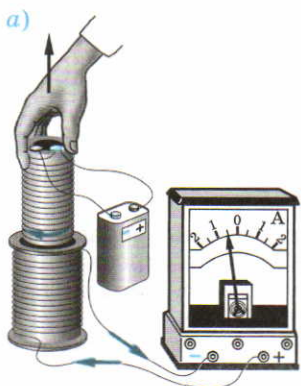


## 66

Возникновение индукционного тока в наружной катушке при включении тока во внутренней:  
а) опыт Фарадея;  
б) его теоретическое объяснение

вектор магнитной индукции которого направлен вверх, в области наружной катушки. Если выбрать направление обхода витка наружной катушки вправо по ближайшей к нам стороне, то вектор его площади  $\Delta\vec{S}$  будет направлен вверх. Тогда изменение магнитного потока  $\Delta\Phi > 0$ , а ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i = -\Phi' < 0$ . Это означает, что индукционный ток  $I_i$  протекает против направления обхода контура (влево по ближайшей к нам стороне). Индукция его собственного магнитного поля направлена вниз и препятствует увеличению потока  $\Phi$ , что согласуется с правилом Ленца (рис. 66, б).

Индукционный ток возникает в наружной катушке, и в случае, если ток во внутренней катушке поддерживается постоянным, но она перемещается относительно наружной (рис. 67, а). Направление тока определяется следующим образом. Индукция магнитного поля, созданного внутренней катушкой в области наружной, направлена вниз (по правилу буравчика). Следовательно, магнитный поток через витки наружной



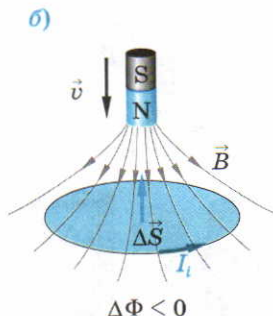
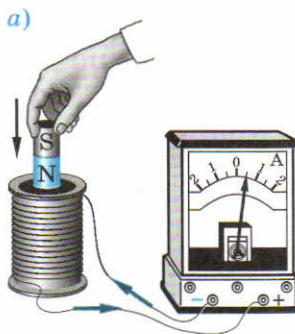
## 67

Возникновение индукционного тока в наружной катушке при выдвигании внутренней:  
а) опыт Фарадея;  
б) его теоретическое объяснение

68

Возникновение индукционного тока в катушке при вдвижении в неё постоянного магнита:

а) опыт Фарадея;  
б) его теоретическое объяснение



катушки будет отрицательным. До выдвигания внутренней катушки  $\Phi_1 = -B_1 S$ , после выдвигания  $\Phi_2 = -B_2 S$ . Так как индукция убывает с расстоянием, то  $B_2 < B_1$ . Значит,  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (B_1 - B_2)S$ , т. е.  $\Delta\Phi > 0$ ,  $\mathcal{E}_i = -\Phi' < 0$  (рис. 67, б). Это означает, что индукционный ток  $I_i$  протекает противоположно направлению обхода (влево по ближайшей к нам стороне).

**Опыт Фарадея с постоянным магнитом.** Фарадей обнаружил, что ещё одним способом индуцирования тока в катушке является вдвижение в катушку постоянного магнита (рис. 68, а). При вдвижении в катушку северного полюса магнита направленная вниз индукция магнитного поля (рис. 68, б), пронизывающего витки катушки, возрастает, т. е.  $B_2 > B_1$ .

$$\Delta\Phi = -B_2 S - (-B_1 S) = -(B_2 - B_1)S < 0,$$

поэтому

$$\mathcal{E}_i = -\Phi' > 0.$$

Это означает, что индукционный ток  $I_i$  протекает в направлении обхода контура витка катушки (вправо по ближайшей к нам стороне).

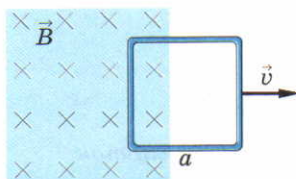
Индукционный ток возникает и при выдвигании постоянного магнита из катушки.

### В О П Р О С Ы

1. В чём состоит явление электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Запишите его математическое выражение.
3. Сформулируйте правило Ленца. Как с его помощью определить направление индукционного тока в наружной катушке при включении тока во внутренней?
4. Как определяется направление индукционного тока в наружной катушке при вдвижении внутренней, подключённой к источнику тока?
5. Объясните, почему возникает индукционный ток в катушке при вдвижении в неё магнита.

## З А Д А Ч И

1. Квадратная рамка со стороной  $a = 4$  см и сопротивлением  $R = 2$  Ом находится в однородном магнитном поле ( $B = 0,1$  Тл), линии индукции которого перпендикулярны плоскости рамки (рис. 69). Какой силы ток пойдёт по рамке и в каком направлении, если её выдвигать из резко очерченной области поля со скоростью  $v = 5$  /с?
2. Найдите значение ЭДС индукции в проводочной рамке при равномерном уменьшении магнитного потока на 6 мВб за 0,05 с.
3. При равномерном возрастании индукции магнитного поля, перпендикулярного поперечному сечению проводочной катушки площадью  $S = 10$  см<sup>2</sup>, от 0 до 0,2 Тл за 0,001 с на её концах возникло напряжение 100 В. Сколько витков  $N$  имеет катушка?



▲ 69

## § 22. Опыты Генри

**Самоиндукция.** В опытах Фарадея индукционный ток возникал вследствие изменения индукции внешнего магнитного поля. Американский учёный **Джозеф Генри** в 1832 г. впервые наблюдал возникновение индукционного тока в катушке вследствие изменения тока, протекающего в самой катушке. Это явление получило название *самоиндукции*.

**Самоиндукция — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока.**

ЭДС индукции возникает при изменении магнитного потока. Если это изменение вызывается собственным током, то говорят об ЭДС самоиндукции:

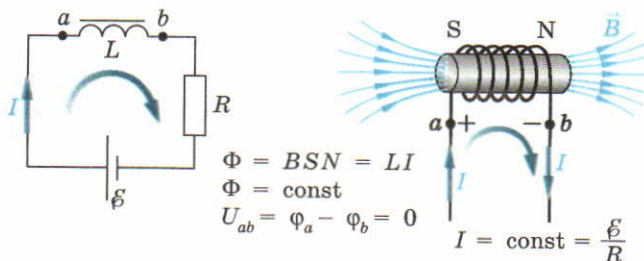
$$\mathcal{E}_{si} = -\Phi' = -(Li)',$$

так как  $\Phi = Li$ , где  $L$  — индуктивность катушки. Обычно в опытах с индукционными токами используют *соленоиды* — катушки с ферромагнитными сердечниками, имеющие большую индуктивность, так как  $\mathcal{E}_{si} \sim L$ . Индуктивность катушки из  $N$  витков в  $N^2$  раз больше индуктивности одного витка. Это связано с тем, что, во-первых, суммируются индукции от каждого из  $N$  витков, а во-вторых, в  $N$  раз больше, чем площадь одного витка, оказывается площадь, пронизываемая результи-



70

Постоянный ток  
в  $L$ – $R$ -цепи



рующим магнитным полем. Соответственно собственный магнитный поток, пронизывающий катушку из  $N$  витков, оказывается в  $N^2$  раз больше потока через один виток. Ферромагнитный сердечник, увеличивая в  $\mu$  раз индукцию внутри катушки, во столько же раз увеличивает её индуктивность.

Учитывая, что индуктивность соленоида постоянна,

$$\mathcal{E}_{si} = -Li'. \quad (45)$$

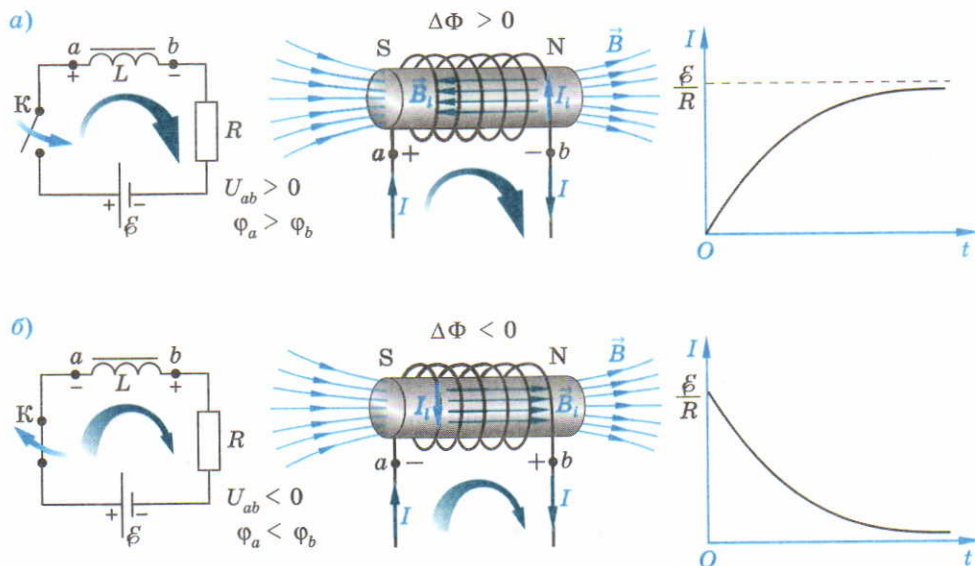
Если через соленоид протекает постоянный ток ( $I = \text{const}$ ), ЭДС самоиндукции отсутствует  $\mathcal{E}_{si} = 0$  (рис. 70). Так как катушка наряду с индуктивностью обладает электрическим сопротивлением  $R$ , то сила тока через неё

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

**Токи замыкания и размыкания.** Как следует из формулы (45), ЭДС самоиндукции оказывается тем больше, чем больше скорость изменения силы тока. Особенно быстро сила тока изменяется при замыкании-размыкании цепи.

При замыкании ключа  $K$  (рис. 71, а) магнитный поток сквозь соленоид возрастает:  $\Delta\Phi > 0$ . Согласно правилу Ленца, возникает индукционный ток  $I_i$ , создающий магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_i$ , направленной против индукции внешнего поля  $\vec{B}$ . Реально ЭДС самоиндукции тормозит движение электронов в проводнике, из которого сделана катушка. С течением времени, когда магнитный поток перестаёт изменяться ( $\Delta\Phi = 0$ ), ЭДС самоиндукции согласно формуле (45) становится равной нулю и устанавливается сила тока значением  $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ .

При размыкании ключа  $K$  (рис. 71, б) ток самоиндукции протекает в ту же сторону, в которую протекал ток в цепи до размыкания. ЭДС самоиндукции поддерживает электрический ток без изменения. Реально



## ▲ 71

Индукционные токи:  
а) при замыкании ключа;  
б) при размыкании ключа

ЭДС самоиндукции ускоряет движение электронов в проводнике, из которого сделана катушка. Поэтому в течение некоторого времени в разомкнутой цепи продолжает протекать ток самоиндукции.

Если в цепь включён соленоид большой индуктивности, ЭДС самоиндукции может значительно превысить ЭДС источника тока. Появление значительной разности потенциалов в месте размыкания цепи часто приводит к электрическому пробое воздуха, т. е. возникновению электрической искры.

Электрическая лампа, соединённая последовательно с соленоидом, загорается с запаздыванием при включении тока и гаснет не мгновенно после его выключения. Правда, визуально заметить запаздывание погасания лампы не удаётся, так как энергия магнитного поля соленоида расходуется на образование искры (даже возникновение дуги). Процесс самоиндукции задерживает увеличение и уменьшение тока в электрических схемах и линиях передачи сигналов, тем самым приводя к искажению передаваемой информации.

Явление самоиндукции подобно инертности в механике: тело нельзя ускорить или затормозить мгновенно, как бы ни велика была ускоряющая или тормозящая сила, действующая на тело.

## В О П Р О С Ы

1. Какое физическое явление называется самоиндукцией?
2. Чему равна ЭДС самоиндукции?
3. Как зависит индуктивность катушки от числа витков? Почему?
4. Почему при замыкании цепи сила тока в ней не нарастает мгновенно?
5. Почему возникает ток размыкания? В каком направлении он протекает?

## § 23. Использование электромагнитной индукции

**Трансформатор.** Явление электромагнитной индукции широко используется в многочисленных технических устройствах и приборах. Наиболее распространённым из них является *трансформатор*.

*Трансформатор — устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения.*

Принципиальное устройство трансформатора представлено на рисунке 72. В простейшем варианте трансформатор состоит из магнитомягкого стального сердечника, на который надеты две катушки с проводными обмотками.

*Первичная обмотка* (число витков  $N_1$ ) подключается к источнику переменного напряжения.

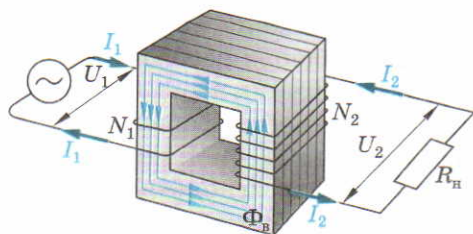
*Вторичная обмотка* (число витков  $N_2$ ) подключается к нагрузке (сопротивлению  $R_n$ ).

Явление электромагнитной индукции следующим образом используется при работе трансформатора. Переменный ток  $i_1$ , протекающий в первичной обмотке, создаёт в сердечнике переменное магнитное поле  $B(t)$ , концентрирующееся внутри сердечника. Поэтому магнитный поток  $\Phi_B$  во вторичной обмотке оказывается таким же, как и в первичной. В каждом витке этих обмоток возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\dot{\Phi}_B.$$

72 ►

Принципиальная схема трансформатора, подключённого к нагрузке



Обозначение трансформатора на схемах





Результирующие ЭДС индукции  $\mathcal{E}_1$  в первичной и  $\mathcal{E}_2$  во вторичной обмотках пропорциональны числу витков в них (так как ЭДС отдельных витков направлены согласованно и складываются):

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \Phi'_v, \quad \mathcal{E}_2 = -N_2 \Phi'_v.$$

Отношение ЭДС индукции в обмотках

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (46)$$

Если сопротивлением обмоток можно пренебречь, то ЭДС индукции в них равны напряжению на их зажимах:  $\mathcal{E}_1 \approx U_1$ ;  $\mathcal{E}_2 \approx U_2$ . Изменение напряжения трансформатором характеризует коэффициент трансформации.

**Коэффициент трансформации — величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора:**

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (47)$$

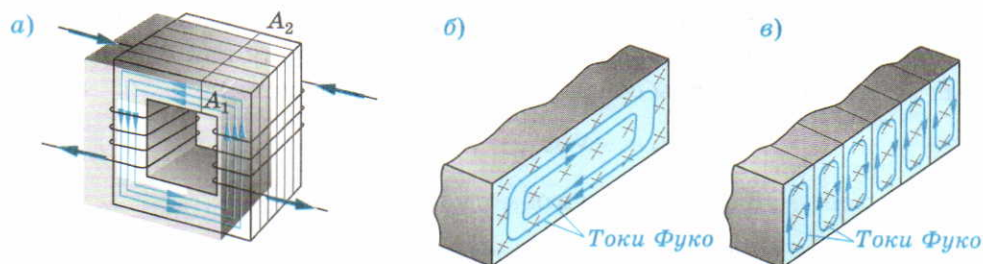
Коэффициент трансформации определяется отношением числа витков в первичной и вторичной обмотках.

**Повышающий трансформатор** — трансформатор, увеличивающий напряжение ( $U_2 > U_1$ ). У повышающего трансформатора число витков  $N_2$  во вторичной обмотке должно быть больше числа витков  $N_1$  в первичной обмотке, т. е.  $k > 1$ .

**Понижающий трансформатор** — трансформатор, уменьшающий напряжение ( $U_2 < U_1$ ). У понижающего трансформатора число витков  $N_2$  во вторичной обмотке должно быть меньше числа витков  $N_1$  в первичной обмотке, т. е.  $k < 1$ .

Переменный ток в обмотках вызывает индукционные токи в стальном сердечнике трансформатора.

Для уменьшения потерь энергии, вызванных вихревыми индукционными токами в сердечнике трансформатора (токами Фуко), сердечник ламинируют, т. е. изготавливают из тонких, изолированных друг от друга пластин (рис. 73). Изолирующее покрытие пластин ограничивает индукционные токи в пределах каждого слоя.



### 73

Токи Фуко:

- а) в сердечнике трансформатора;  
 б) сплошном (в сечении  $A_1-A_2$ );  
 в) наборном (в сечении  $A_1-A_2$ )

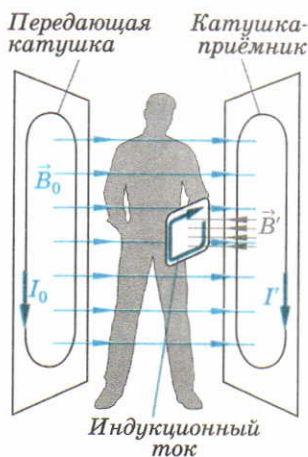
Из-за малых тепловых потерь мощность тока во вторичной обмотке можно считать равной мощности тока в первичной обмотке:

$$I_1 U_1 = I_2 U_2. \quad (48)$$

Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = k.$$

**Электромагнитная индукция в современной технике.** Приведём характерные примеры использования электромагнитной индукции в современной технике.



### 74

Детектор металла

Для обнаружения металлических предметов применяются специальные детекторы (рис. 74). Например, в аэропортах детектор металла фиксирует поля индукционных токов в металлических предметах.

Магнитное поле  $\vec{B}_0$ , создаваемое током  $I_0$  передающей катушки, индуцирует в металлических предметах токи, препятствующие (по правилу Ленца) изменению магнитного потока. В свою очередь, магнитное поле  $\vec{B}'$  этих токов индуцирует в катушке-приёмнике ток  $I'$ , запускающий сигнал тревоги.

В поезде на магнитной подушке сверхпроводящие катушки с током, размещённые на дне вагона, индуцируют ток в алюминиевых катушках на полотне дороги (рис. I на цветной вклейке, с. 96).

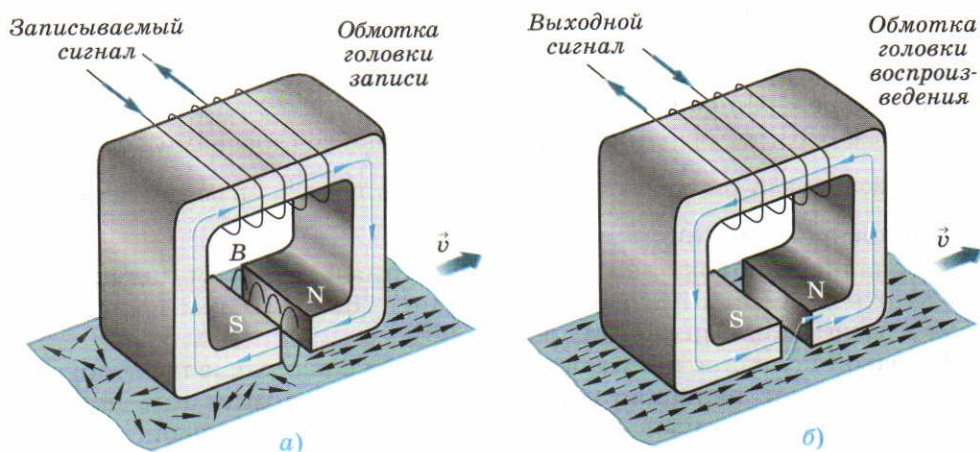


Отталкивание сверхпроводящих катушек и катушек на полотне дороги приподнимает вагон над землёй. Движение поезда вызывается взаимодействием сверхпроводящих катушек, расположенных вдоль стенок вагонов, и катушек внутри ограничительных бортиков полотна дороги.

В сверхпроводнике индукционный ток существует достаточно долго, поэтому в результате отталкивания токов в сверхпроводнике и в постоянном магните высокотемпературный проводник зависает над магнитом (рис. II на цветной вклейке, с. 96).

Индукционные токи, возникающие в проводниках (токи Фуко), используются для их нагрева. На этом принципе основано устройство электропечей для плавки металлов. Тот же эффект используется в бытовых микроволновых СВЧ-печах.

Явление электромагнитной индукции позволяет считывать видео- и аудиоинформацию с магнитных лент. Магнитная лента — тонкая пластмассовая лента, покрытая слоем ферромагнитного порошка. При записи информации на магнитную ленту сигнал подаётся на записывающую головку (ферромагнетик С-образной формы с зазором) (рис. 75, а). Магнитное поле, возникающее в зазоре, ориентирует беспорядочно расположенные микротоки вещества на движущейся магнитной ленте. При воспроизведении записи остаточная индукция доменов, движущихся вместе с лентой, создаёт магнитное поле в зазоре головки воспроизведения (рис. 75, б).



# 75

Запись и воспроизведение информации с помощью магнитной ленты:

а) головка записи;

б) головка воспроизведения



Это поле в результате электромагнитной индукции вызывает ЭДС индукции в выходной обмотке головки, подобную записанному сигналу.

### В О П Р О С Ы

1. Какое электрическое устройство называют трансформатором?
2. Какая обмотка трансформатора является первичной и какая вторичной?
3. Дайте определение коэффициента трансформации. Какой трансформатор называется повышающим и какой понижающим?
4. Приведите примеры использования электромагнитной индукции в современной технике.
5. Как производится запись и воспроизведение информации с помощью магнитной ленты?

## § 24. Генерирование переменного электрического тока

**ЭДС в рамке, вращающейся в однородном магнитном поле.** В проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле, генерируется электрическое поле, возникает ЭДС индукции. Происходит преобразование механической энергии проводника в энергию электрического поля. С целью большей компактности генераторов электрического тока в электрическую энергию преобразуется механическая энергия вращательного движения, а не поступательного. Основным элементом генератора является рамка, вращающаяся в магнитном поле. Во вращение рамку может приводить паровая машина, двигатель внутреннего сгорания, гидротурбина и т. д.

Найдём ЭДС, которая индуцируется в рамке со сторонами  $a$  и  $b$ , вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  (периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ) в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  (рис. 76).

В начальном положении угол  $\alpha$ , образуемый вектором индукции  $\vec{B}$  с вектором площади  $\Delta\vec{S}$ , равен нулю (рис. 76,  $a$ ). В этом положении рамки разделения зарядов не происходит.

В правой половине рамки вектор скорости сонаправлен вектору индукции, в левой половине направлен противоположно ему, поэтому сила Лоренца, действующая на заряды в рамке, равна нулю.

При повороте рамки на угол  $90^\circ$  в сторонах рамки под действием силы Лоренца происходит разделение зарядов (рис. 76,  $b$ ). В сторонах 1 и 3 возникают одинаковые ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_{i1} = \mathcal{E}_{i3} = vBb.$$

Разделение зарядов в сторонах 2 и 4 незначительно, и поэтому ЭДС индукции, возникающими в них, можно пренебречь. С учётом того, что  $v = \omega \frac{a}{2}$ , полная ЭДС, индуцируемая в рамке, равна

$$\mathcal{E}_i = 2\mathcal{E}_{i1} = \omega B \Delta S, \quad (49)$$

где  $\Delta S = ab$ .

ЭДС, индуцируемую в произвольном положении рамки в момент времени  $t$ , можно найти из закона Фарадея. Магнитный поток через площадь рамки изменяется с течением времени из-за изменения угла  $\alpha = \omega t$  между линиями магнитной индукции и вектором площади:

$$\Phi = B \Delta S \cos \omega t. \quad (50)$$

Тогда

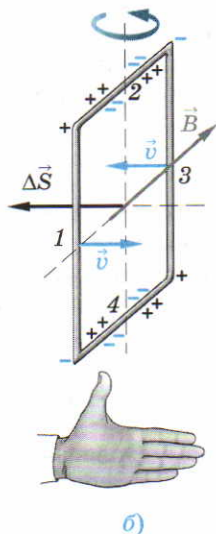
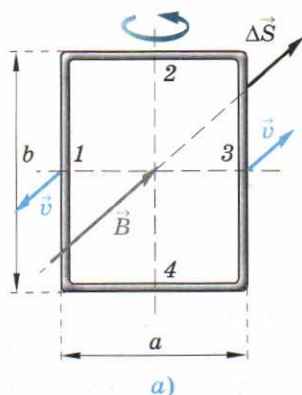
$$\mathcal{E}_i = -\Phi' = \mathcal{E}_{i\max} \sin \omega t, \quad (51)$$

где  $\mathcal{E}_{i\max}$  — максимальная ЭДС, индуцируемая в рамке;  $\mathcal{E}_{i\max} = \omega B \Delta S$ .

Гармоническая зависимость  $\mathcal{E}_i(t)$  приведена на рисунке 77.

Частота ЭДС индукции  $\nu = \frac{1}{T}$ .

**Генератор переменного тока.** В генераторе переменного тока рамка вращается в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом. (В ряде конструкций рамка неподвижна, а вращается магнит.) Противоположные стороны рамки присоединены к кольцам, с которых с помощью гибких контактов (щёток) снимается индуцированный заряд. Принципиальное устройство генератора переменного тока показано на рисунке III на цветной вклейке, с. 97. Возникающий ток фиксируется осциллографом, а положения рамки показаны через каждую четверть периода её вращения. При  $t = 0$  и  $t = T/2$  заряды не разделяются, так как линейные скорости сторон рамки параллельны вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ . Когда  $t = T/4$  и  $t = 3T/4$ , разделение зарядов на



## 76

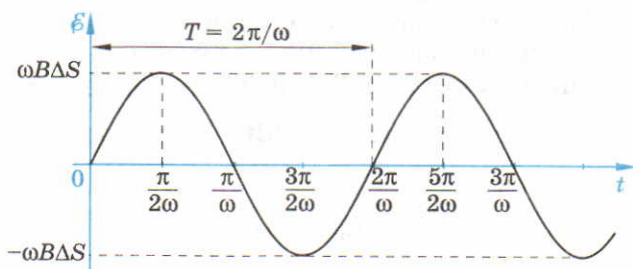
Разделение зарядов в рамке, вращающейся в магнитном поле:

а)  $\alpha = 0$ ;

б)  $\alpha = 90^\circ$

## 77 ►

ЭДС индукции в рамке  
как функция времени



сторонах рамки оказывается одинаковым, однако полярность сигнала, подаваемого на клеммы осциллографа, будет противоположной.

Для увеличения генерируемой ЭДС вместо рамки используют катушку с большим числом витков, называемую ротором. При подключении к щёткам нагрузки, потребляющей электроэнергию, через неё пойдёт переменный ток, изменяющийся по гармоническому закону. Закон изменения тока в нагрузке зависит от того, какой элемент электрической цепи используется в качестве нагрузки.

### В О П Р О С Ы

1. Почему основным элементом генератора является рамка, вращающаяся в магнитном поле?
2. Поясните механизм (причины) разделения зарядов в сторонах рамки при её вращении в магнитном поле.
3. Нарисуйте один под другим графики зависимости от времени магнитного потока через вращающуюся рамку и ЭДС индукции в ней.
4. Объясните назначение гибких контактов (щёток) в генераторе переменного тока.
5. Почему в реальном генераторе вместо рамки используют катушку с большим числом витков?

### З А Д А Ч И

1. Прямоугольная рамка со сторонами  $a = 5$  см и  $b = 8$  см вращается вокруг вертикальной оси с периодом  $T = 0,02$  с в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,05$  Тл, направленной перпендикулярно оси вращения. Найдите максимальную ЭДС, индуцируемую в рамке, и зависимость ЭДС от времени.
2. Найдите частоту вращения катушки с числом витков  $N = 20$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл, если максимальная ЭДС в катушке  $\mathcal{E}_m = 7,85$  В, а площадь сечения одного витка  $S = 25$  см<sup>2</sup>.
3. Ротор генератора переменного тока, представляющий из себя катушку, содержащую  $N = 10$  витков, каждый площадью  $S = 1200$  см<sup>2</sup>, вращается с постоянной частотой  $\nu = 50$  Гц в магнитном поле с индукцией  $B = 0,58$  Тл. Найдите максимальную ЭДС, индуцируемую в обмотке ротора.



## § 25. Передача электроэнергии на расстояние

**Потери электроэнергии в линиях электропередачи.** Электроэнергия производится вблизи источников топлива или гидроресурсов, в то время как её потребители находятся повсеместно. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния. Схему электропередачи можно представить в виде простейшей замкнутой цепи, включающей источник тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r_0$ , сопротивления нагрузки  $R$  и сопротивления подводящих проводов  $r$  (рис. 78).

Обычно внутренним сопротивлением источника тока можно пренебречь, так как  $r_0 \ll r$ ;  $r_0 \ll R$ . Сила тока

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Тогда

$$\mathcal{E} = IR + Ir.$$

ЭДС равна сумме напряжений на сопротивлениях замкнутой цепи.

Умножим последнее равенство на силу тока:

$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r, \text{ или } P = P_{\text{н}} + P_{\text{п}}. \quad (52)$$

Мощность сторонних сил  $P = I\mathcal{E}$ , разделяющих разноимённые заряды в источнике тока.

$P_{\text{н}} = I^2R$  — полезная мощность, частично передаётся потребителю (нагрузке).

$P_{\text{п}} = I^2r$  — потери мощности (мощность идёт на нагревание проводов).

При передаче электрической энергии важно доставить потребителю максимальную мощность и снизить потери мощности в подводящих проводах.

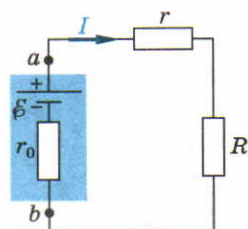
Выясним, от чего зависят потери мощности и как можно их уменьшить. При заданной, известной, мощности  $P$  источника тока в линии электропередачи сила тока равна

$$I = \frac{P}{\mathcal{E}}.$$

Если внутренним сопротивлением источника тока можно пренебречь, то

$$\mathcal{E} = U_{ab},$$

где  $U_{ab}$  — напряжение на полюсах источника (так как  $U_{ab} = \mathcal{E} - Ir_0$ ).



▲ 78

Принципиальная схема передачи электроэнергии от источника к потребителю

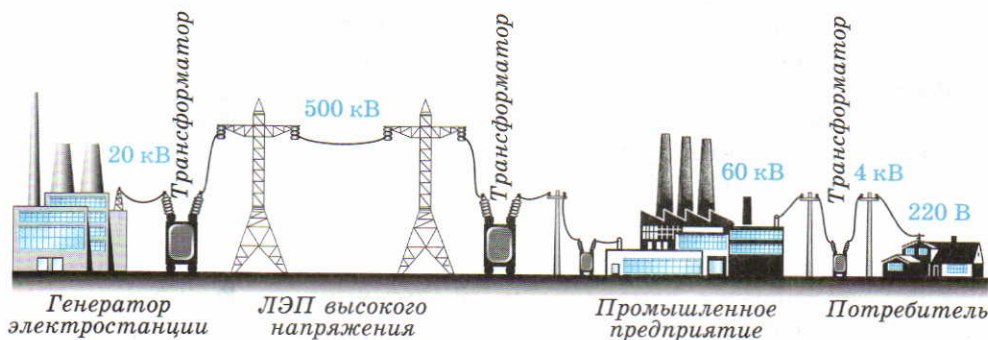
Значит,

$$P_{\text{п}} = \frac{P^2 r}{U_{ab}^2}. \quad (53)$$

При большой длине линии электропередачи её электрическое сопротивление становится значительным.

Существенно уменьшить сопротивление линии практически невозможно. Ввиду того что потери мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) обратно пропорциональны квадрату передаваемого напряжения, их уменьшают за счёт повышения этого напряжения. Поэтому передача электроэнергии на расстояние требует сначала повышения напряжения с 20 кВ до 400—500 кВ, а затем его снижения до 220 В, сравнительно безопасно используемых потребителем. Подобное изменение напряжения — технически затруднительная проблема при передаче постоянного тока, которая практически отсутствует в линиях электропередачи переменного тока. Это определяет повсеместное применение ЛЭП переменного тока, в которых изменение напряжения осуществляется с помощью трансформаторов.

**Схема передачи электроэнергии потребителю.** Рассмотрим принципиальную схему передачи электроэнергии от генератора к потребителю (рис. 79). Обычно генераторы переменного тока на электростанциях вырабатывают напряжение, не превышающее 20 кВ, так как при более высоких напряжениях резко возрастает возможность электрического пробоя изоляции в катушке (обмотке) и в других частях генератора.



## ▲ 79

*Принципиальная схема передачи электроэнергии на расстояние и её распределения*



Для сохранения передаваемой мощности (снижения потерь мощности) напряжение в ЛЭП должно быть максимальным, поэтому на крупных электростанциях ставят повышающие трансформаторы. Однако напряжение в линии электропередачи ограничено: при слишком высоком напряжении между проводами возникают разряды, приводящие к потерям энергии.

Для использования электроэнергии на промышленных предприятиях требуется значительное снижение напряжения, осуществляемое с помощью понижающих трансформаторов. Дальнейшее снижение напряжения до величин порядка 4 кВ необходимо для энергораспределения по местным сетям, т. е. по тем проводам, которые мы видим на окраинах городов. Менее мощные трансформаторы снижают напряжение до 220 В для индивидуальных потребителей.

В России и странах ЕС (Европейского сообщества) используется переменное напряжение с частотой 50 Гц. Такая частота выбрана для того, чтобы человеческий глаз не замечал изменения интенсивности излучения ламп накаливания.

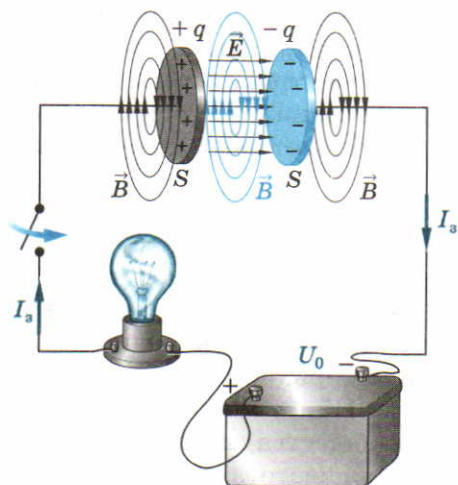
### В О П Р О С Ы

1. Почему повышение напряжения, передаваемого в линии электропередачи, уменьшает потерю мощности в подводящих проводах?
2. Для чего в линиях электропередачи используют повышающие трансформаторы?
3. Чем ограничено повышение напряжения в линиях электропередачи?
4. Зачем при передаче электроэнергии на расстояние используют понижающие трансформаторы?
5. Почему в качестве частоты переменного напряжения используется частота 50 Гц?

## § 26. Магнитоэлектрическая индукция

**Зарядка конденсатора. Ток смещения.** Переменное магнитное поле в результате электромагнитной индукции создаёт вихревое электрическое поле независимо от того, есть ли в этой области пространства замкнутый проводящий контур или нет. При наличии такого контура в нём может быть зафиксирован индукционный ток. Последующие исследования показали, что возможно и обратное преобразование полей, когда переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное поле. Подобный эффект может наблюдаться, в частности, при зарядке конденсатора ёмкостью  $C$ . При подключении конденсатора к источнику постоянного напряжения  $U_0$  в цепи возникает кратковременный





### ▲ 80

Ток смещения при зарядке конденсатора от аккумулятора

денсатора, она должна существовать и внутри него, где ток проводимости отсутствует. Магнитное поле возникает при наличии тока. По определению

$$I = \frac{dq}{dt},$$

т. е. сила тока равна изменению заряда в единицу времени. При зарядке плоского конденсатора изменение заряда на его пластинах приводит к изменению напряжения  $U = \frac{q}{C}$  внутри конденсатора. Напряжённость электрического поля внутри плоского конденсатора с расстоянием  $d$  между обкладками равна

$$E = \frac{U}{d}.$$

Следовательно, сила тока внутри конденсатора связана с изменением напряжённости электрического поля со временем. Такой ток называется *током смещения*:

$$I_{\text{см}} = Cd \frac{dE}{dt}.$$

Ток смещения, порождающий магнитное поле внутри конденсатора, возникает при изменении с течением времени электрического поля в этой области.

импульс тока  $I_3$ , который заряжает конденсатор до напряжения источника. После зарядки конденсатора ток прекращается (рис. 80).

В процессе зарядки ток, протекающий по подводящим проводам, или *ток проводимости*, создаёт вокруг себя переменное магнитное поле. Линиями индукции этого поля являются концентрические окружности (см. рис. 80). Так как подводящие проводники располагаются снаружи от конденсатора, то, казалось бы, только снаружи от него должно существовать и магнитное поле. Однако из замкнутости линий индукции магнитного поля следует постоянство его потока через любую поверхность. Поэтому, если существует магнитная индукция вне конденсатора,

**Магнитоэлектрическая индукция.** *Изменяющееся во времени электрическое поле (согласно гипотезе Д. Максвелла) является (наряду с движущимися свободными зарядами) источником магнитного поля.*

**Магнитоэлектрическая индукция — явление возникновения магнитного поля в переменном по времени электрическом поле.**

Между электрическим и магнитным полями существует взаимосвязь и прослеживается симметрия: переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле (электромагнитная индукция), а переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное (магнитоэлектрическая индукция). Эти поля образуют единое *электромагнитное поле*.

### В О П Р О С Ы

1. Почему постоянный ток не может протекать через конденсатор?
2. Как изменяется сила тока, протекающего через конденсатор, подключённый к источнику постоянного напряжения?
3. Какой ток называют током смещения?
4. Какое физическое явление называют магнитоэлектрической индукцией?
5. Поясните взаимосвязь между переменными электрическим и магнитным полями.

## **§ 27. Свободные гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре**

**Энергообмен между электрическим и магнитным полями.** Существует замкнутая электрическая цепь — *колебательный контур*, в котором могут возникать свободные электромагнитные колебания.

**Колебательный контур — цепь, состоящая из последовательно включённых катушки индуктивностью  $L$ , конденсатора ёмкостью  $C$  и сопротивления  $R$  подводящих проводов.**

Обычно активное сопротивление проводов и катушки пренебрежимо мало ( $R \approx 0$ ).



Электромагнитные колебания заряда и силы тока в колебательном контуре сопровождаются взаимными превращениями электрического и магнитного полей.

Рассмотрим последовательные стадии колебательного процесса в  $L$ — $C$ -контуре.

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор предварительно заряжают, сообщая его обкладкам заряды  $\pm q_0$ . Тогда в начальный момент времени ( $t = 0$ ) (рис. 81) между обкладками конденсатора возникает электрическое поле. Полная энергия в контуре определяется энергией электрического поля конденсатора:

$$W = W_p = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (54)$$

При замыкании ключа в контуре возникает возрастающий со временем ток. Этот ток нейтрализует заряд на пластинах конденсатора, приводя к его разрядке. В результате энергия электрического поля  $q^2/(2C)$  уменьшается, а энергия магнитного поля катушки  $LI^2/2$  возрастает.

Полная энергия в контуре сохраняется, так как на нагревание она не расходуется ( $R \approx 0$ ). Энергия электромагнитного поля в любой момент времени остаётся равной электрической энергии конденсатора в начальный момент времени:

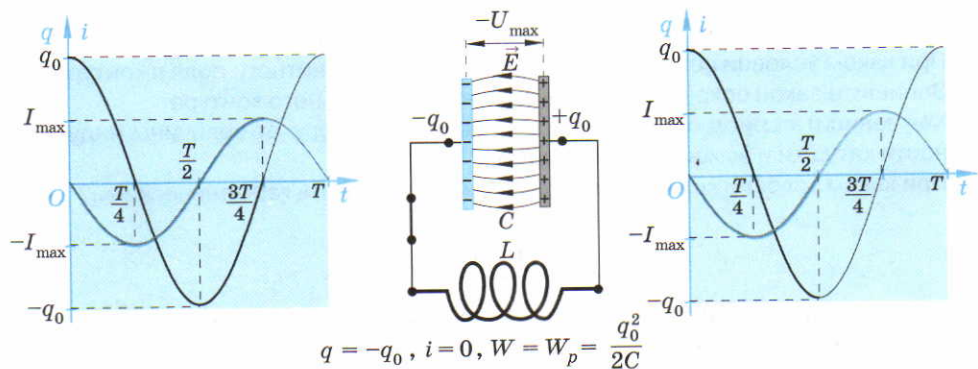
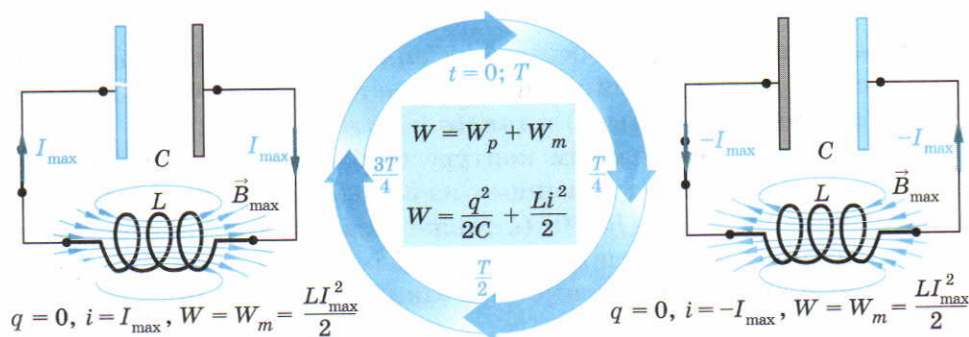
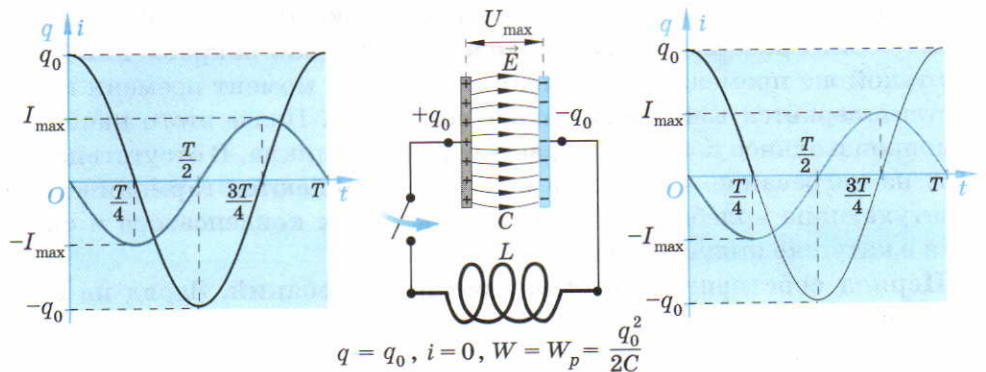
$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (55)$$

В момент времени  $t = T/4$ , когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля обращается в нуль, а энергия магнитного поля (а следовательно, и сила тока) достигает максимального значения:

$$W = W_m = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (56)$$

Начиная с этого момента, сила тока в контуре убывает; следовательно, уменьшается магнитный поток в катушке ( $\Phi = LI$ ). Согласно правилу Ленца, изменению магнитного потока препятствует индукционный ток, протекающий в том же направлении, что и ток разрядки конденсатора. Конденсатор начинает перезаряжаться, между его обкладками возникает электрическое поле, стремящееся ослабить ток, который в момент времени  $t = T/2$  обращается в нуль. В этот момент времени заряд  $\mp q_0$  на обкладках достигнет первоначального значения,





# 81

Энергообмен между электрическим и магнитным полями в колебательном контуре

при этом знак заряда окажется противоположным первоначальному. Далее те же процессы начнут протекать в обратном направлении и через такой же промежуток времени  $T/2$ , т. е. в момент времени  $t = T$  система вернётся в первоначальное состояние. После этого начнётся самопроизвольное повторение рассмотренного цикла. В отсутствие потерь на нагревание проводов в контуре совершаются гармонические незатухающие колебания заряда на обкладках конденсатора и силы тока в катушке индуктивности.

**Период собственных гармонических колебаний.** Заряд на конденсаторе и сила тока в катушке индуктивности изменяются по гармоническому закону с периодом  $T_0$ :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (57)$$

Формула для периода собственных колебаний заряда на конденсаторе и силы тока в катушке индуктивности впервые была получена 1853 г. английским учёным *Уильямом Томсоном*.

В реальном колебательном контуре свободные электромагнитные колебания являются затухающими из-за выделения джоулева тепла в проводнике катушки ( $R \neq 0$ ) (а также из-за излучения электромагнитных волн). Однако на протяжении небольших интервалов времени собственные электромагнитные колебания в контуре можно считать гармоническими.

### В О П Р О С Ы

1. Какая электрическая цепь называется колебательным контуром?
2. При каком условии сохраняется энергия электромагнитного поля в контуре?
3. Запишите закон сохранения энергии для колебательного контура.
4. Как зависит период собственных колебаний в контуре от величины индуктивности катушки и ёмкости конденсатора?
5. При каком условии колебания в контуре можно считать гармоническими?

### З А Д А Ч И

1. Конденсатор электроёмкостью 1 мкФ, заряженный до напряжения 225 В, подключили к катушке с индуктивностью 10 мГн. Найдите максимальную силу тока в контуре.
2. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью  $L = 4$  мГн и плоского воздушного конденсатора. Площадь пластин конденсатора  $S = 10$  см<sup>2</sup>, расстояние между ними  $d = 1$  мм. Найдите период собственных колебаний в контуре.

3. Найдите диапазон частот  $\nu_1$ — $\nu_2$  колебаний в контуре с катушкой, индуктивность которой  $L = 1$  мГн, и конденсатором, ёмкость которого может изменяться в пределах от  $C_1 = 40$  пФ до  $C_2 = 90$  пФ.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Проводящая рамка площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup> имеет  $N = 100$  витков и вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл вокруг оси, перпендикулярной вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  так, как показано на рис. III на цветной вклейке с. 97. Период вращения рамки  $T = 20$  мс. Концы обмотки рамки через скользящие контакты замкнуты на резистор сопротивлением  $R = 50$  Ом. Постройте графики зависимости от времени магнитного потока  $\Phi_N$  через  $N$  витков ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  и силы тока  $I_i$  в резисторе. Найдите максимальное значение и частоту изменения ЭДС индукции и силы тока в резисторе. Сопротивлением рамки можно пренебречь.

#### Решение

Магнитный поток, пронизывающий площадь, ограниченную рамкой, меняется с течением времени из-за изменения угла между линиями индукции и вектором площади. Мгновенное значение магнитного потока  $\Phi_1$  через один виток рамки можно представить в виде:

$$\Phi_1(t) = BS \cos \alpha, \text{ где } \alpha = \frac{2\pi t}{T}.$$

Магнитный поток через  $N$  витков будет в  $N$  раз больше:

$$\Phi_N(t) = N\Phi_1(t) = NBS \cos \frac{2\pi t}{T}.$$

Подставим значения  $N$ ,  $B$  и  $S$ :

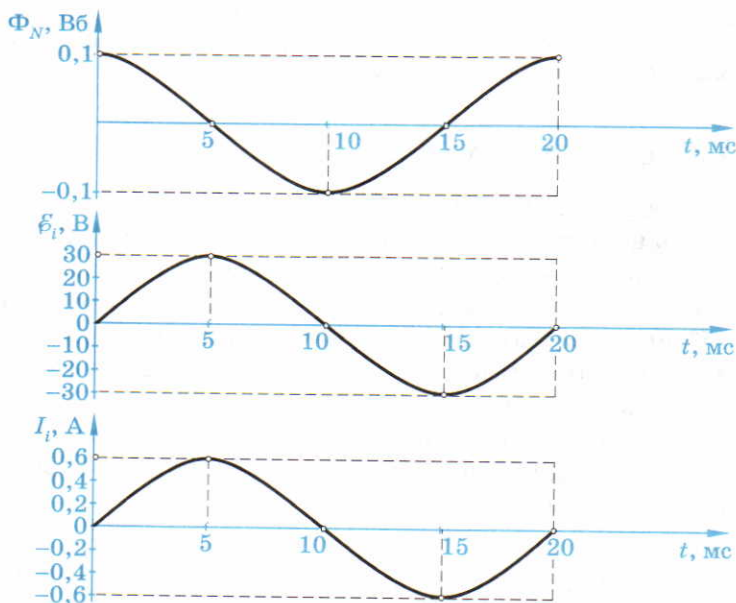
$$\Phi_{N\max} = 100 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 0,1 \text{ Тл} = 0,1 \text{ Вб}.$$

$$\Phi_N(t) = 0,1 \cos \frac{2\pi t}{T}.$$

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС электромагнитной индукции  $\mathcal{E}_i$  в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. В катушке наводится

$$\mathcal{E}_i(t) = -\Phi'_N(t) = \frac{2\pi}{T} NBS \sin \frac{2\pi t}{T}.$$





## ▲ 82

Определим максимальное значение  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_{i\max} = \frac{2\pi}{2 \cdot 10^{-2} \text{ с}} \cdot 100 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 0,1 \text{ Тл} = 31,4 \text{ В.}$$

$$\varepsilon_i(t) = 31,4 \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Силу переменного индукционного тока  $I_i$  в рамке можно найти по закону Ома:

$$I_i(t) = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{2\pi}{TR} NBS \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Подставим значения:  $I_i(t) = 0,6 \sin \frac{2\pi t}{T}.$

Графиком зависимости магнитного потока от времени  $\Phi_N(t)$  является косинусоида с амплитудой 0,1 Вб и частотой  $\nu = \frac{1}{T} = 50 \text{ Гц}$  (рис. 82).

ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  изменяется по синусоидальному закону с амплитудой 31,4 В и частотой 50 Гц.

Синусоидально зависит от времени индукционный ток  $I_i$ . Его амплитуда 0,6 А, а частота 50 Гц.

**Ответ:** 31,4 В, 50 Гц; 0,6 А, 50 Гц.

## О С Н О В Н Ы Е   П О Л О Ж Е Н И Я

- На концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}_\perp$ , перпендикулярной скорости движения, возникает разность потенциалов

$$U = vB_\perp l.$$

- **Электромагнитная индукция** — физическое явление, заключающееся в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.

- Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея): ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\mathcal{E}_i = -\dot{\Phi}.$$

- Правило Ленца: индукционный ток в контуре имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.
- **Самоиндукция** — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока или индуктивности контура.

ЭДС самоиндукции в катушке:

$$\mathcal{E}_{si} = -LI',$$

где  $L$  — индуктивность катушки.

- **Трансформатор** — устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения.

- **Коэффициент трансформации**  $k$  — величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора:

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

- **Повышающий трансформатор** — трансформатор, увеличивающий напряжение ( $k > 1$ ).

- **Понижающий трансформатор** — трансформатор, уменьшающий напряжение ( $k < 1$ ).

- **Мгновенное значение напряжения** — напряжение в данный момент времени.

- **Магнитоэлектрическая индукция** — явление возникновения магнитного поля в переменном электрическом поле.

- Формула Томсона: период собственных колебаний заряда на конденсаторе и силы тока в катушке индуктивности колебательного контура:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}.$$

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

---

## 4

## Излучение и приём электромагнитных волн радио- и СВЧ-диапазона

### § 28. Электромагнитные волны

**Опыт Герца.** Ранее мы выяснили, что электростатическое поле и магнитное поле можно описывать независимо, так как эти поля не взаимодействуют друг с другом. В то же время между изменяющимися во времени электрическим и магнитным полем существует взаимосвязь. Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле (*электромагнитная индукция*), а переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное поле (*магнитоэлектрическая индукция*). В результате возникает единое электромагнитное поле. При наличии источника электромагнитного возмущения, изменяющегося во времени, это возмущение может распространяться в пространстве от одной области к другой даже в отсутствие вещества между ними. Это означает, что возникает волновой процесс — процесс переноса энергии электромагнитного поля без переноса вещества.

*Электромагнитная волна — переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве.*

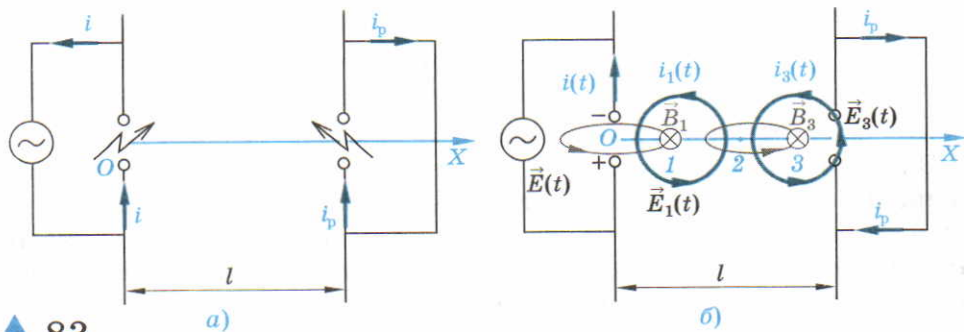
Английский учёный *Джеймс Клерк Максвелл* в 1864 г. теоретически предсказал существование электромагнитных волн. Согласно теории Максвелла, *скорость распространения в вакууме электромагнитных волн совпадает со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.*

Экспериментально электромагнитные волны были обнаружены в 1887 г. в Берлинском университете Г. Герцем. Источником электромагнитного поля в опыте Герца являлись электромагнитные колебания, возникающие в *вибраторе*.



Вибратор Герца — прямолинейный проводник с воздушным промежутком посередине, представляет собой колебательный контур. Емкость и индуктивность такого «открытого» колебательного контура очень малы, поэтому собственная частота колебаний в таком контуре —  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  — достаточно велика (порядка 100—1000 МГц). Высокое напряжение, подаваемое к воздушному промежутку, вызывало разряд в нём вследствие электрического пробоя воздуха (рис. 83, а). Спустя промежуток времени  $\tau = l/c$  искровой разряд возникал в воздушном промежутке аналогичного вибратора (резонатора), замкнутого накоротко проволокой и расположенного на расстоянии  $l$  (порядка нескольких метров) от вибратора.

Объяснение результатов опыта Герца оказывается возможным с помощью теории Максвелла. Предположим, что в начальный момент времени переменный ток  $i(t)$  возрастает по величине и протекает через воздушный промежуток вверх (рис. 83, б). Такое направление тока (от плюса к минусу) означает, что аналогичное направление имеет напряженность электрического поля, вызывающего этот ток, в разрядном промежутке. Ток  $i(t)$  создаёт вокруг себя магнитное поле с возрастающей индукцией  $\vec{B}_1(t)$ , направленной по правилу буравчика по касательной к окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа. Возрастание магнитного потока в области точки 1 приводит к возникновению вихревого электрического поля, препятствующего росту магнитного потока (согласно правилу Ленца). Индукция магнитного поля, создаваемого вихревым электрическим полем в области точки 1, должна быть направлена против  $\vec{B}_1(t)$  — к нам. Вихревое электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}_1(t)$  вызывает в точке 2 ток смещения, направленный вверх. Этот ток создаёт в точке 3 маг-



### ▲ 83

Электромагнитные волны:

а) опыт Герца;

б) механизм распространения

нитное поле с индукцией  $\vec{B}_3(t)$ , порождающее вихревое электрическое поле. В разрядном промежутке резонатора напряжённость  $\vec{E}_3(t)$  вихревого электрического поля будет направлена вверх. Если значение  $\vec{E}_3(t)$  оказывается достаточным для электрического пробоя воздуха в этом промежутке, в нём возникает искра, фиксируемая экспериментаторами, и через резонатор протекает ток  $i_p$ .

Возникающая и распространяющаяся в пространстве электромагнитная волна является поперечной: направления векторов напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны.

**Излучение электромагнитной волны.** Источником электромагнитной волны является переменный ток. При постоянном токе явления электромагнитной и магнитоэлектрической индукции не возникают. Так как сила тока пропорциональна скорости движения заряженных частиц (см. формулу (3)), то электромагнитная волна возникает, если скорость движения заряженных частиц меняется со временем.

### *Излучение электромагнитных волн возникает при ускоренном движении электрических зарядов.*

В результате излучения электромагнитных волн частица теряет энергию, а следовательно, не может двигаться с неизменной скоростью.

Выясним, как энергия излучения частицы зависит от её ускорения.

Ускорение  $\vec{a}$  заряженной частицы, движущейся под действием электрического поля напряжённости  $\vec{E}$ , определяется из второго закона Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_k}{m} = \frac{q\vec{E}}{m}, \quad (58)$$

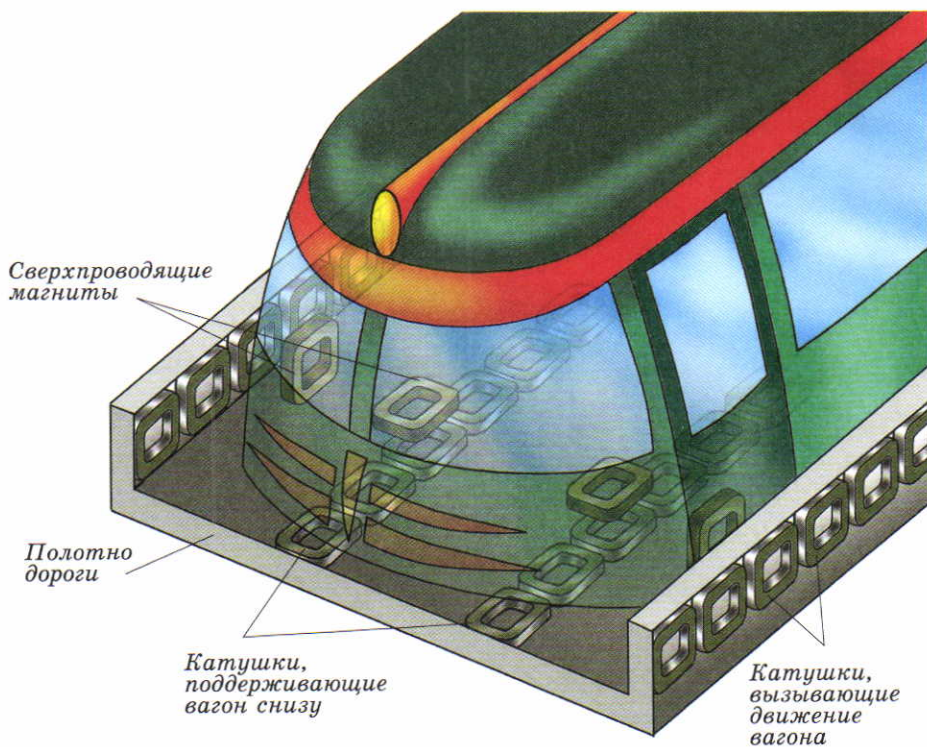
где  $q$  — заряд частицы,  $m$  — её масса.

Электрическое поле действует на частицу. Частица получает ускорение  $a \sim E$ . Рассматривая этот процесс в обратном направлении по времени, можно утверждать, что *напряжённость электрического поля в излучаемой электромагнитной волне пропорциональна ускорению излучающей заряженной частицы:*

$$E \sim a. \quad (59)$$

Объёмная плотность энергии электромагнитного поля в электромагнитной волне складывается из объёмной плотности энергии элект-



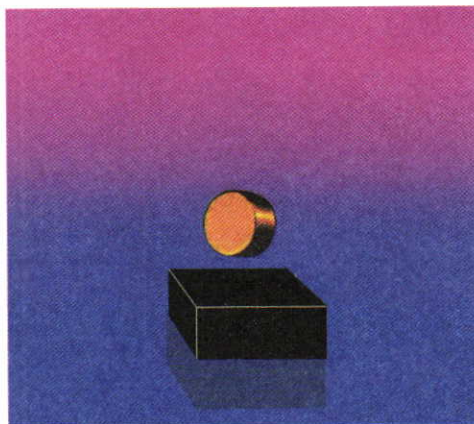


## ▲ I

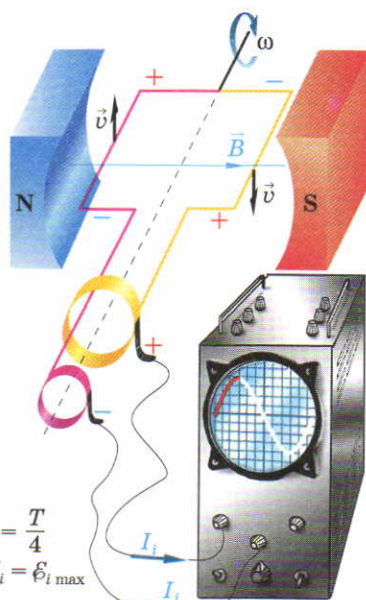
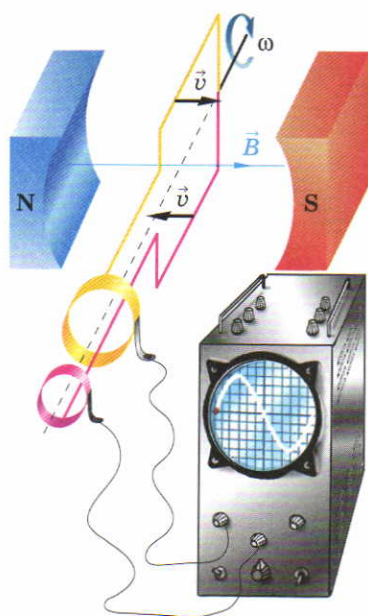
Поезд на магнитной подушке

## ▶ II

«Левитация» высокотемпературного сверхпроводника  
(над постоянным магнитом)

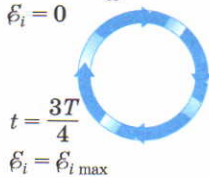






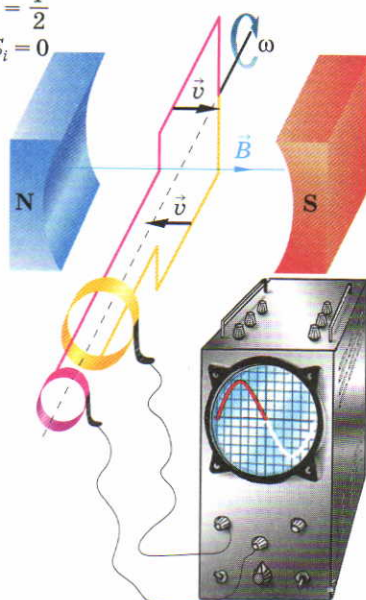
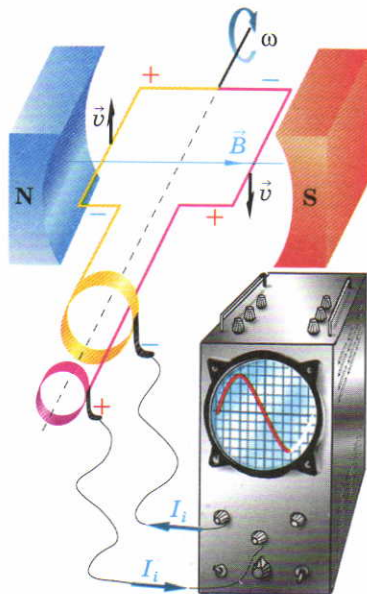
$$\begin{cases} t=0 \\ t=T = \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \quad \begin{cases} \mathcal{E}_i = 0 \end{cases}$$

$$t = \frac{T}{4} \quad \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i \max}$$



$$t = \frac{3T}{4} \quad \mathcal{E}_i = -\mathcal{E}_{i \max}$$

$$t = \frac{T}{2} \quad \mathcal{E}_i = 0$$



### III

Принцип действия генератора переменного тока

рического и магнитного полей, в среднем по времени равных друг другу:

$$w_{\text{эм}} = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = 2w_{\text{э}}. \quad (60)$$

Используя формулу  $w = \epsilon \epsilon_0 E^2 / 2$  (см. Ф-10, § 67), получаем плотность энергии электромагнитного поля в вакууме ( $\epsilon = 1$ ):

$$w_{\text{эм}} = \epsilon_0 E^2. \quad (61)$$

С учётом зависимости (59)

$$w_{\text{эм}} \sim a^2. \quad (62)$$

Энергия излучаемой электромагнитной волны пропорциональна квадрату ускорения излучающей заряженной частицы.

### В О П Р О С Ы

1. Какую волну называют электромагнитной? С какой скоростью она распространяется?
2. Опишите опыт Герца по обнаружению электромагнитных волн.
3. Объясните результаты опыта Герца с помощью теории Максвелла. Почему электромагнитная волна является поперечной?
4. Почему излучение электромагнитных волн возникает при ускоренном движении электрических зарядов? Как напряжённость электрического поля в излучаемой электромагнитной волне зависит от ускорения излучающей заряженной частицы?
5. Как зависит плотность энергии электромагнитного поля от напряжённости электрического поля?

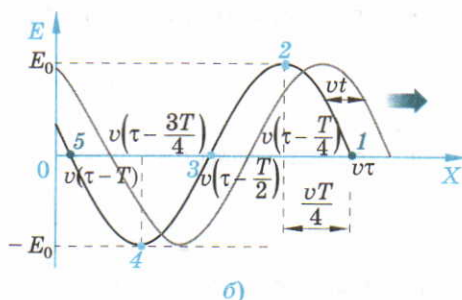
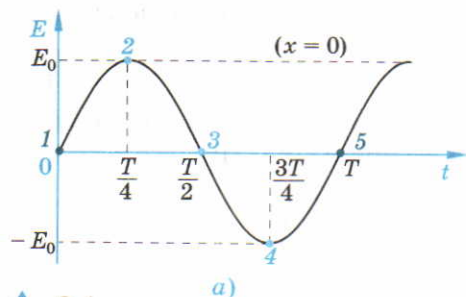
## § 29. Распространение электромагнитных волн

**Бегущая гармоническая электромагнитная волна.** Для выяснения механизма распространения электромагнитной волны мы рассмотрели её возникновение при кратковременном импульсе напряжённости электрического поля в вибраторе. Реально при пробое воздуха в вибраторе возникают колебания с периодом  $T$ . Напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля в вибраторе изменяются по гармоническому закону (рис. 84, а):

$$E = E_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (63)$$

$$B = B_0 \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (64)$$

Для определённости рассмотрим, как распространяется в пространстве (вдоль оси  $X$ ) электрическое поле. Будем считать, что скорость распространения возмущения равна  $v$ . Возможно, что  $v \leq c$ .



### ▲ 84

Распространение в пространстве гармонического возмущения электромагнитного поля:

- а) напряжённость  $E$  электрического поля в вибраторе как функция времени;  
 б) пространственное распределение напряжённости  $E$  электрического поля в моменты времени  $\tau$  и  $\tau + t$

Начальное возмущение 1 ( $t = 0$ ;  $E = 0$ ) через время  $\tau$  распространяется со скоростью  $v$  на расстояние  $v\tau$ . Возмущение 2 ( $t = T/4$ ,  $E = E_0$ ) оказывается ближе к вибратору на расстояние  $vT/4$  (рис. 84, б).

Более поздние возмущения 3 ( $t = T/2$ ,  $E = 0$ ), 4 ( $t = 3T/4$ ,  $E = -E_0$ ) и 5 ( $t = T$ ,  $E = 0$ ) находятся в момент  $\tau$  на следующих расстояниях:  $v(\tau - T/2)$ ;  $v(\tau - 3T/4)$ ;  $v(\tau - T)$  соответственно. Расстояние в пространстве между точками 1 и 5, колеблющимися в одинаковой фазе, оказывается равным  $vT$  и характеризует длину электромагнитной волны.

**Длина волны — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний.**

При постоянной скорости распространения волны за период она проходит расстояние

$$\lambda = vT, \quad (65)$$

или

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (66)$$

В произвольной точке с координатой  $x$  напряжённость электрического поля в момент времени  $t$  та же, что в точке  $x = 0$  в более ранний



момент времени  $(t - x/v)$ . (Время  $x/v$  требуется для распространения волны на расстояние  $x$ .) Поэтому для получения напряжённости электрического поля для *бегущей волны* в выражении (62), справедливом в точке  $x = 0$ , следует заменить  $t$  на  $(t - x/v)$ .

*Выражение для напряжённости электрического поля бегущей гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $X$  со скоростью  $v$ , имеет вид*

$$E = E_0 \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{v} \right). \quad (67)$$

Индукция магнитного поля в электромагнитной волне изменяется во времени и в пространстве синхронно с напряжённостью электрического поля.

Согласно формуле (64) *индукция магнитного поля бегущей гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $X$  со скоростью  $v$ , будет иметь вид*

$$B = B_0 \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{v} \right). \quad (68)$$

Излучение электромагнитных волн гармоническим вибратором в момент времени  $7T/4$  представлено на рисунке 85, *а*. Линии напряжённости электрического поля располагаются в плоскости чертежа (плоскость  $XY$ ), линии индукции — в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, окружая переменный ток. На графике зависимости напряжённости электрического поля от координаты  $x$  в момент времени  $7T/4$  показана длина волны излучения.

**Фронт волны.** Как показано на рисунке 85, *б*, колебания вектора  $\vec{E}$  упорядочены: они происходят в плоскости  $XY$ .

В поляризованной электромагнитной волне колебания вектора напряжённости электрического поля упорядочены.

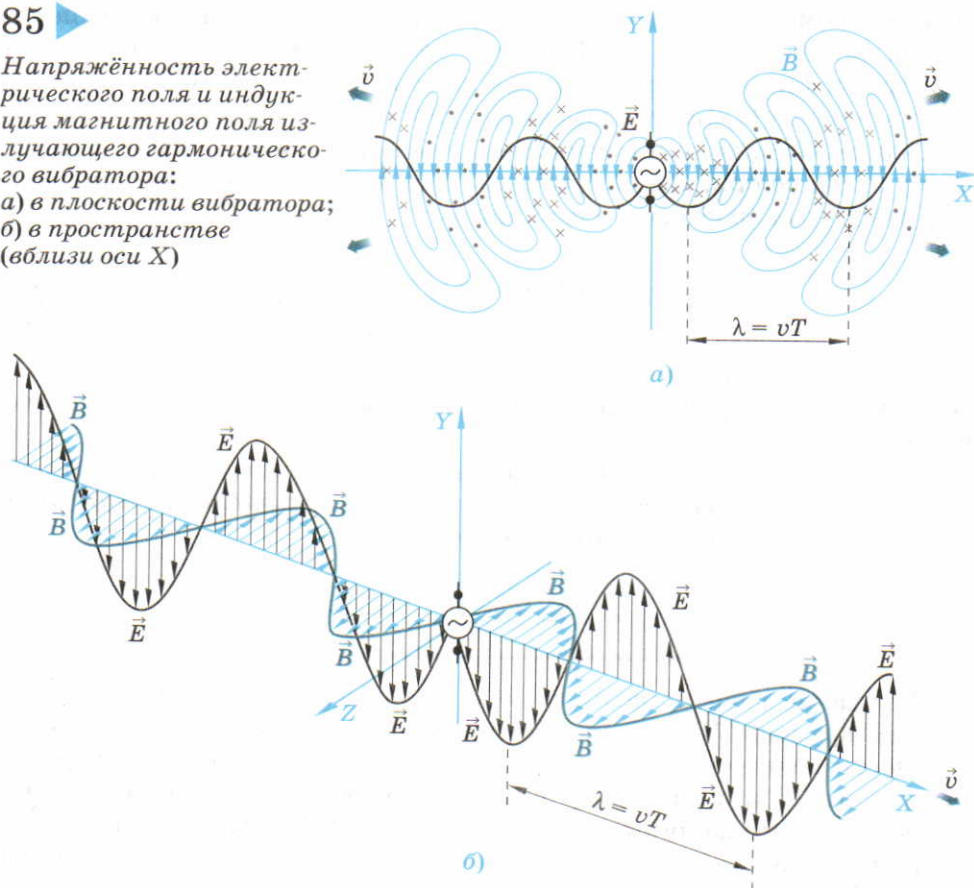
**Плоскополяризованная (или линейно-поляризованная) электромагнитная волна** — волна, в которой вектор  $\vec{E}$  (и, следовательно,  $\vec{B}$ ) колеблется только в одном направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

**Плоскость поляризации электромагнитной волны** — плоскость, проходящая через направление колебаний вектора напряжённости электрического поля и направление распространения волны.

85 ►

Напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля излучающего гармонического вибратора:

а) в плоскости вибратора;  
б) в пространстве  
(вблизи оси  $X$ )



В рассматриваемом случае плоскостью поляризации является плоскость  $XU$ .

Основные характеристики электромагнитной волны — напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля. Они принимают определённые значения в момент времени  $t$  в тех точках с координатой  $x$ , для которых аргумент  $\varphi$  синуса в выражениях (67) и (68) постоянен, т. е.

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{v} \right) = \text{const.}$$

Например, если  $\varphi = \pi/6$ , то  $E = E_0/2$ ,  $B = B_0/2$  в момент времени  $t$  в точках с координатой  $x = v \left( t - \frac{\pi}{6} \cdot \frac{2\pi}{T} \right)$ .

Геометрическим местом точек, имеющих определённую координату  $x$ , является плоскость, проходящая через эту точку параллельно плоскости  $YZ$  (см. рис. 85). В этой плоскости, называемой *фронтом волны*, напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля изменяются синхронно.

**Фронт электромагнитной волны — поверхность постоянной фазы напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля.**

Если фронтом волны является плоскость, то волна — *плоская*.

На рисунке 86 изображены фронты электромагнитных плоских гармонических волн, на которых  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  имеют амплитудные значения:  $E = \pm E_0$ ;  $B = \pm B_0$ . Им соответствуют  $\varphi = \pm\pi/2$ .

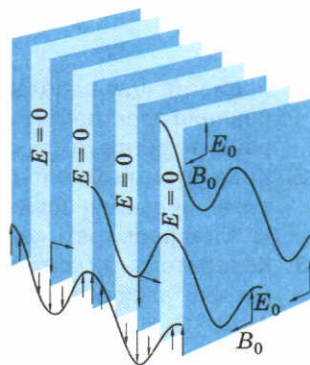
Направление распространения фронта волны характеризует *луч*.

**Луч — линия, вектор касательной к которой перпендикулярен фронту волны и направлен в сторону переноса энергии волны в данной точке.**

На большом расстоянии от источника излучения электромагнитных волн фронт произвольной волны становится практически плоским.

### В О П Р О С Ы

1. Объясните, как распространяется в пространстве гармоническое возмущение электромагнитного поля.
2. Какое расстояние называется длиной волны? Как длина волны зависит от скорости распространения волны?
3. Напишите уравнение бегущей гармонической волны для напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля. Объясните содержание рисунка 85.
4. Что такое плоскость поляризации и плоскополяризованная волна?
5. Какую поверхность называют фронтом волны? Что такое луч, что он характеризует?



▲ 86

Плоская электромагнитная волна



## З А Д А Ч И

1. Радиостанция работает на частоте  $\nu = 100$  МГц. Считая, что скорость распространения электромагнитных волн в атмосфере равна скорости света в вакууме, найдите соответствующую длину волны.
2. Колебательный контур радиоприёмника настроен на длину волны  $\lambda = 300$  м. Капашка индуктивности в контуре обладает индуктивностью  $L = 100$  мкГн. Найдите электроёмкость конденсатора в контуре.
3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью  $L = 1$  мкГн и конденсатора, электроёмкость которого может изменяться в пределах от  $10^{-8}$  Ф до  $4 \cdot 10^{-8}$  Ф. На какой диапазон длин волн может быть настроен этот контур?

## § 30. Энергия, переносимая электромагнитными волнами

**Интенсивность волны.** Электромагнитные волны переносят энергию электромагнитного поля. Скорость переноса энергии сквозь площадь  $S$  в момент времени  $t$  характеризует *поток энергии электромагнитной волны*.

*Поток энергии электромагнитной волны — мощность электромагнитного излучения, проходящего сквозь поверхность площадью  $S$ :*

$$\Phi_W = P_{\text{эм}}.$$

*Плотность потока энергии электромагнитной волны — мощность электромагнитного излучения, проходящего сквозь единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны:*

$$\frac{\Phi_W}{S} = \frac{P_{\text{эм}}}{S}. \quad (69)$$

Плотность потока энергии пропорциональна плотности электромагнитной энергии  $w_{\text{эм}}$ , которая, в свою очередь, пропорциональна  $E^2$  (см. формулу (61)):

$$\frac{P_{\text{эм}}}{S} \sim w_{\text{эм}} \sim E^2. \quad (70)$$

Учитывая, что напряжённость электрического поля в электромагнитной волне зависит от времени (например, по гармоническому закону (67)) перенос мощности характеризует величина, усреднённая по времени, — *интенсивность волны*.

**Интенсивность электромагнитной волны — среднее значение плотности потока энергии электромагнитной волны:**

$$I = \frac{\bar{P}_{\text{эм}}}{S} \sim \bar{w}_{\text{эм}}. \quad (71)$$

Единица интенсивности волны — *ватт на квадратный метр* (1 Вт/м<sup>2</sup>).

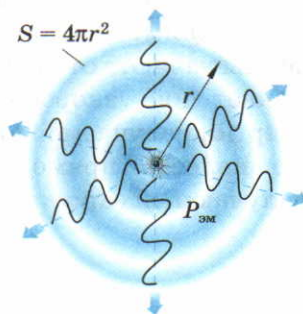
Для гармонических электромагнитных колебаний с амплитудой  $E_0$ :

$$I \sim E_0^2. \quad (72)$$

Следовательно, *интенсивность гармонической электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля*.

**Зависимость интенсивности электромагнитной волны от расстояния до источника излучения и его частоты.** Найдём зависимость интенсивности излучения точечного источника от расстояния до него. Точечными источниками можно, например, считать звёзды, расстояния до которых во много раз превышают их радиусы. При этом предположим, что такой источник излучает электромагнитные волны по всем направлениям с одинаковой интенсивностью. В вакууме мощность  $P_{\text{эм}}$  электромагнитной волны, излучаемая точечным источником, не поглощается. С течением времени волна проходит через всё большие концентрические сферические поверхности (рис. 87). Поэтому средняя энергия, переносимая в перпендикулярном направлении сквозь единицу площади в единицу времени, т. е. интенсивность электромагнитной волны, уменьшается по мере удаления от источника.

В результате распространения излучения источника в пространстве сквозь сфериче-



### 87

*Уменьшение интенсивности излучения с расстоянием от точечного источника*



скую поверхность радиусом  $r$  проходит средняя мощность электромагнитной волны:

$$P_{\text{эм}} = I \cdot 4\pi r^2,$$

где  $I$  — интенсивность излучения источника на расстоянии  $r$  от источника.

$$I \sim \frac{1}{r^2}. \quad (73)$$

*Интенсивность излучения точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.*

Согласно формуле (72), интенсивность гармонической электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля:  $I \sim E_0^2$ . С учётом зависимости (73) это означает, что

$$E_0 \sim \frac{1}{r}. \quad (74)$$

В отличие от напряжённости электростатического поля точечного заряда, резко убывающей с расстоянием от него по закону обратных квадратов, напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, созданной точечным источником, убывает с расстоянием более медленно (обратно пропорционально лишь первой степени расстояния от источника). Благодаря этому электромагнитные волны передаются в вакууме на большие расстояния, обеспечивая возможность радио-, теле- и космической связи.

Выясним, как интенсивность гармонической электромагнитной волны зависит от её частоты. Излучение электромагнитных волн возникает при ускоренном движении электрических зарядов. Средняя энергия излучаемой электромагнитной волны (и соответственно её интенсивность) прямо пропорциональна среднему квадрату ускорения излучающей заряженной частицы:

$$I \sim \overline{a^2}. \quad (75)$$

Гармоническая электромагнитная волна частотой  $\nu$  возникает при гармонических колебаниях заряженной частицы с этой частотой. При таких колебаниях координата заряженной частицы по оси  $Y$  изменяется по гармоническому закону:

$$y = A \cos(2\pi \nu t).$$



По гармоническому закону изменяется со временем и ускорение частицы:

$$a = y'' = -A(2\pi\nu)^2 \cos(2\pi\nu t).$$

Соответственно  $\overline{a^2} \sim \nu^4$ . Следовательно (см. (75)),

$$I \sim \nu^4. \quad (76)$$

*Интенсивность гармонической электромагнитной волны с постоянной амплитудой прямо пропорциональна четвёртой степени её частоты.*

Резкая зависимость интенсивности излучения от частоты означает, что для получения интенсивных электромагнитных волн частота электромагнитных колебаний в их источнике (например, в вибраторе) должна быть достаточно высокой. При изменении частоты излучения от  $\nu_1 = 100$  кГц (ей соответствует длина волны  $\lambda_1 = c_1/\nu_1 = 3000$  м) до  $\nu_2 = 100$  МГц ( $\lambda_2 = 3$  м) интенсивность излучаемых источником электромагнитных волн возрастает в  $10^{12}$  раз:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\nu_2^4}{\nu_1^4} = \frac{(10^8)^4}{(10^5)^4} = 10^{12}.$$

Если интенсивность излучения  $I_1$  при частоте  $\nu_1$  оказывается достаточной для потребителя, то мощность передатчика при изменении частоты с  $\nu_1$  на  $\nu_2$  можно уменьшить в  $10^{12}$  раз. Поэтому излучение электромагнитных волн больших частот требует меньшей мощности передатчика.

### В О П Р О С Ы

1. Дайте определение потока и плотности потока энергии электромагнитной волны?
2. Какая физическая величина характеризует перенос средней мощности электромагнитной волной?
3. Как интенсивность гармонической электромагнитной волны зависит от амплитуды напряжённости электрического поля в волне?
4. Как интенсивность электромагнитной волны зависит от расстояния до источника? Что можно сказать о зависимости напряжённости электрического поля от этого расстояния?
5. Как интенсивность электромагнитной волны зависит от её частоты? Объясните, почему энергетически выгодно излучение электромагнитных волн больших частот.

## § 31. Давление и импульс электромагнитных волн

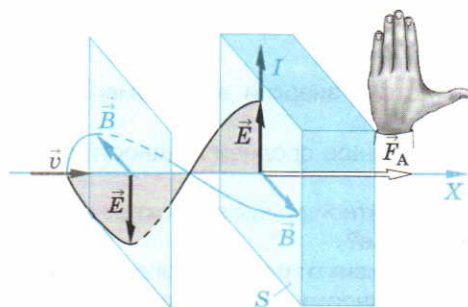
**Давление электромагнитной волны.** Электромагнитная волна переносит не только энергию электромагнитного поля, но и импульс. Этим объясняется давление, которое она оказывает на объекты, встречающиеся на пути её распространения. Давление является результатом совместного действия на заряженные частицы вещества электрического и магнитного полей электромагнитной волны. Предположим, что плоская электромагнитная волна падает на образец и отражается от него. При падении плоской электромагнитной волны на поверхность вещества площадью  $S$  электрическое поле волны вызывает в веществе направленное движение свободных зарядов. Направление движения этих зарядов сонаправлено с напряжённостью  $\vec{E}$  поля волны (рис. 88). Магнитное поле индукцией  $\vec{B}$  действует на возникающий ток с силой Ампера  $\vec{F}_A$ . Её направление определяется с помощью правила левой руки. На образец действует сила  $\vec{F}_A$ , направленная в сторону распространения волны. Давление электромагнитной волны на поверхность образца равно

$$p_{\text{эм}} = \frac{F_A}{S}. \quad (77)$$

При расчёте давления идеального газа мы показали (см. Ф-10, формула (114)), что давление равно

$$p = \frac{2}{3} w,$$

где  $w$  — объёмная плотность внутренней энергии газа. Этот результат был получен в предположении, что частицы могут равновероятно двигаться по трём координатным осям, поэтому в направлении одной из осей двигается лишь одна треть частиц (отсюда появился множитель  $1/3$ ). Поскольку взаимодействие электромагнитной волны и идеального газа с веществом является упругим, можно найти давление электромагнитной волны так же, как находится давление идеального газа. При этом нужно учесть, что волна распространяется в одном направлении, и поэтому необходимость вве-



### ▲ 88

Давление электромагнитной волны на вещество

дения этого множителя отсутствует при определении давления  $p_{\text{эм}}$  электромагнитной волны:

$$p_{\text{эм}} = 2\bar{w}_{\text{эм}}. \quad (78)$$

С помощью формулы (71) можно найти связь давления электромагнитной волны с её интенсивностью:

$$p_{\text{эм}} = 2 \frac{I}{c}. \quad (79)$$

Интенсивность излучения Солнца, попадающего в атмосферу Земли, оказывается около  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ . Среднее давление на отражающую поверхность

$$p_{\text{эм}} = \frac{2 \cdot 1,4 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 9,3 \text{ мкПа}.$$

Такое радиационное давление составляет лишь  $10^{-10}$  от атмосферного вблизи поверхности Земли. Тем не менее длительное действие радиационного давления на большую площадь солнечных батарей искусственных спутников Земли (рис. IV, а на цветной вклейке, с. 128) приводит к их преждевременному сходу с орбиты и падению на Землю. Радиационное давление электромагнитных волн, идущих от Солнца, отталкивает хвосты комет от Солнца (рис. IV, б на цветной вклейке, с. 128).

**Импульс электромагнитной волны.** Давление электромагнитной волны является следствием наличия у неё импульса. При абсолютно упругом отражении электромагнитной волны изменение её импульса за промежутки времени  $\Delta t$ :

$$\Delta p = 2p,$$

где  $p$  — импульс падающей волны.

Согласно второму закону Ньютона,

$$F_A = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2p}{\Delta t}. \quad (80)$$

Подставляя выражения (79) и (80) в формулу (77), получаем

$$p = \frac{IS\Delta t}{c}. \quad (81)$$

Числитель этой формулы является выражением для энергии электромагнитного поля, распространяющегося сквозь поверхность площадью  $S$  за промежутки времени  $\Delta t$ . Взаимосвязь импульса электромагнитной волны с переносимой ею энергией записывается как

$$p = \frac{W}{c}. \quad (82)$$



## В О П Р О С Ы

1. Каков механизм давления электромагнитной волны на объекты, встречающиеся на пути её распространения?
2. Как давление электромагнитной волны связано с её интенсивностью?
3. Проведите оценку радиационного давления солнечного излучения на Землю.
4. Почему давление электромагнитной волны означает наличие у неё импульса?
5. Как импульс электромагнитной волны связан с энергией, переносимой волной?

## § 32. Спектр электромагнитных волн

**Диапазон частот.** Диапазон частот электромагнитных волн огромен. Он определяется всеми возможными частотами колебаний заряженных частиц. Такие колебания возникают при переменном токе в линиях электропередачи, антеннах радио- и телевизионных станций, СВЧ-печах, мобильных телефонах, радарх, лазерах, лампах накаливания и люминесцентных лампах, радиоактивных элементах, рентгеновских аппаратах. Диапазон частот электромагнитных волн, фиксируемых в настоящее время, простирается от 0 до  $3 \cdot 10^{22}$  Гц. Этот диапазон соответствует *спектру* (от лат. spectrum — видение, образ) *электромагнитных волн* с длиной волны  $\lambda$  ( $\lambda = c/v$ ), изменяющейся от  $10^{-14}$  м до бесконечности. По длине волны (или частоте) спектр электромагнитных волн условно делят на восемь диапазонов (рис. VII на цветной вклейке, с. 129). Отличие частот (длин волн), излучаемых в различных диапазонах, связано с различием микроскопических источников излучения. Частота излучения электромагнитной волны определяется частотой колебаний заряженной частицы, которую можно представить как пружинный маятник. Частота колебаний пружинного маятника зависит от массы  $m$  частицы и жёсткости  $k$  пружины (см. Ф-10, формула (85)):

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Жёсткость пружины характеризует потенциальную энергию частицы. Переход от одного диапазона частот излучаемых волн к другому (в сторону увеличения частоты электромагнитной волны) может происходить либо при уменьшении массы колеблющейся заряженной частицы, либо при увеличении энергии связи заряженной частицы. Энергия связи (взаимодействие) заряженных частиц возрастает при уменьшении расстояния между заряженными частицами, т. е. при уменьшении пространственного масштаба излучающей системы. Кроме того, элек-

тромагнитное излучение высокой частоты возникает при резком ускорении отдельных элементарных частиц.

Охарактеризуем кратко границы диапазонов длин волн (частот) в спектре электромагнитных волн в порядке возрастания частоты излучения, а также укажем основные источники излучения в соответствующем диапазоне.

- **Электромагнитные волны звуковых частот** возникают в диапазоне от 0 до  $2 \cdot 10^4$  Гц ( $\lambda = 1,5 \cdot 10^4 \div \infty$  м). Источником волн звуковых частот является переменный ток соответствующей частоты. Учитывая, что интенсивность излучения электромагнитных волн пропорциональна четвёртой степени частоты, излучением таких сравнительно малых частот можно пренебречь. Именно по этой причине часто можно пренебречь излучением линии передачи переменного тока с частотой 50 Гц.

- **Радиоволны** занимают диапазон частот  $2 \cdot 10^4$ — $10^9$  Гц ( $\lambda = 0,3$ — $1,5 \times 10^4$  м).

Радиоволны впервые были открыты Герцем в 1886 г. (см. § 41).

Источником радиоволн, так же как и волн звуковых частот, является переменный ток. Однако большая частота радиоволн по сравнению с волнами звуковых частот приводит к заметному излучению радиоволн в окружающее пространство. Это позволяет использовать их для передачи информации на значительное расстояние (радиовещание, телевидение, радиолокация).

- **Сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, или микроволновое излучение**, возникает в диапазоне частот  $10^9$ — $3 \cdot 10^{11}$  Гц ( $\lambda = 1$  мм —  $0,3$  м). Источники СВЧ-излучения — валентные электроны атома, изменяющие направления спина, или молекулы вещества, изменяющие скорости своего вращения. Учитывая прозрачность атмосферы в этом диапазоне, СВЧ-излучение используют для космической связи. Кроме того, это излучение используют в бытовых микроволновых СВЧ-печах. В создании приборов для генерации мощного СВЧ-излучения российские разработчики занимают передовые позиции.

- **Инфракрасное (ИК) излучение** занимает частотный диапазон  $3 \cdot 10^{11}$ — $3,85 \cdot 10^{14}$  Гц ( $\lambda = 780$  нм —  $1$  мм). ИК-излучение было открыто в 1800 г. английским астрономом Уильямом Гершелем. Изучая повышение температуры термометра, нагреваемого видимым светом, Гершель обнаружил наибольшее нагревание термометра вне области видимого света (за красной областью). Невидимое излучение, учитывая его место в спектре, было названо инфракрасным.

Источником инфракрасного излучения являются колебания и вращение молекул вещества, поэтому инфракрасные электромагнитные волны излучают нагретые тела, молекулы которых движутся осо-



бенно интенсивно. Часто ИК-излучение называют *тепловым*. Около 50% энергии Солнца излучается в инфракрасном диапазоне. Максимальная интенсивность излучения человеческого тела приходится на длину волны 10 мкм. Отметим, что волны этого диапазона воспринимаются приёмником теплового излучения змеи, охотящейся по ночам. Зависимость интенсивности ИК-излучения от температуры позволяет измерять температуру различных объектов, что используется в биноклях ночного видения, в фотокамерах искусственных спутников, прогнозирующих урожай, а также в медицине при обнаружении инородных образований. Дистанционное управление телевизором и видеомagneитофоном осуществляется с помощью ИК-излучения.

- **Видимый свет** — электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом. Световые волны занимают достаточно узкий диапазон: 380—780 нм ( $\nu = 3,85 \cdot 10^{14} - 7,89 \cdot 10^{14}$  Гц).

*Источником видимого света являются валентные электроны в атомах и молекулах, изменяющие своё положение в пространстве, а также свободные заряды, движущиеся ускоренно.* Эта часть спектра даёт человеку максимальную информацию об окружающем мире, являясь лишь малой частью спектра электромагнитных волн. Максимум чувствительности человеческого глаза приходится на длину волны  $\lambda = 560$  нм. На эту длину волны приходится также максимум интенсивности излучения Солнца и одновременно максимум прозрачности атмосферы Земли. В процессе длительной биологической эволюции подобное удивительное совпадение существенно помогало человеку получать информацию об окружающем мире, что способствовало его выживанию.

Излучение, имеющее разные длины волн (частоты) в диапазоне видимого света, оказывает различное физиологическое воздействие на сетчатку человеческого глаза, вызывая ощущение *цвета*. Цвет — не свойство электромагнитной световой волны самой по себе, а проявление электрохимического действия физиологической системы человека: глаз, нервов, мозга. Например, электромагнитное излучение в диапазоне длин волн  $\lambda = 620-780$  нм вызывает у человека ощущение красного цвета. Достаточно приблизительно можно назвать семь основных цветов, различаемых человеческим глазом в видимом диапазоне (в порядке возрастания частоты излучения): красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый. Диапазон длин волн электромагнитного излучения, соответствующий каждому цвету, приведён в таблице 3.

Запоминание последовательности основных цветов спектра облегчает фраза, каждое слово которой начинается с первой буквы названия основного цвета: «Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит



**Таблица 3. Диапазон длин волн, соответствующий определённому основному цвету**

	Красный	Оранже- вый	Жёлтый	Зелёный	Голубой	Синий	Фиоле- товый
$\lambda$ , нм	780—620	620—590	590—560	560—500	500—480	480—450	450—380
$\nu$ , ТГц	385—484	484—508	508—536	536—600	600—625	625—667	667—789

**Фазан».** Возможно, кому-нибудь больше придётся по душе поэтическая форма, известная многим поколениям физиков: «Как Однажды Жак-Звонарь Головой Сломал Фонарь».

Видимый свет может влиять на протекание химических реакций в растениях (фотосинтез) и организмах животных и человека. Например, голубой свет может вызывать *диссоциацию* (деление) молекул билирубина. Этот процесс увеличивает число таких молекул в крови, препятствуя развитию желтухи у новорождённых. Видимый свет испускают отдельные насекомые (светлячки) и некоторые глубоководные рыбы за счёт химических реакций в организме. Поглощение растениями углекислого газа в результате процесса фотосинтеза и выделение кислорода способствует поддержанию биологической жизни на Земле. Оно оказывается возможным благодаря энергии, излучаемой естественным источником видимого света — Солнцем.

Ежегодно 200 млрд т углерода, образующегося в процессе фотосинтеза из атмосферного углекислого газа, идёт на образование сложных органических молекул, обогащающих природу нашей планеты. Свет — источник жизни на Земле и одновременно источник наших представлений об окружающем мире.

• **Ультрафиолетовое (УФ) излучение** занимает диапазон частот  $8 \cdot 10^{14}$ — $3 \cdot 10^{16}$  Гц ( $\lambda = 10$ —380 нм). УФ-излучение было открыто в 1801 г. немецким учёным **Иоганном Риттером**.

Изучая почернение хлористого серебра под действием видимого света, Риттер обнаружил, что серебро чернеет ещё более эффективно в области, находящейся за фиолетовым краем спектра, где видимое излучение отсутствует. Невидимое излучение, вызвавшее это почернение, было названо *ультрафиолетовым*.

*Источник ультрафиолетового излучения — валентные электроны атомов и молекул, а также ускоренно движущиеся свободные заряды.*

В малых дозах УФ-излучение оказывает благотворное оздоровительное влияние на человека, активизируя синтез витамина D в организме, а также вызывая загар. Большая доза УФ-облучения может вызвать ожог кожи и раковые новообразования (в 80% случаев изле-

чимые). Кроме того, чрезмерное УФ-облучение ослабляет иммунную систему организма, способствуя развитию некоторых заболеваний.

Ультрафиолетовое излучение с длиной волны  $\lambda < 300$  нм деполимеризует нуклеиновые кислоты и разрушает протеины, нарушая жизненные процессы в организме. В малых дозах такое излучение обладает бактерицидным действием, уничтожая микроорганизмы.

Озоновый слой атмосферы Земли сильно поглощает УФ-излучение с длиной волны  $\lambda < 320$  нм, а кислород воздуха — коротковолновое УФ-излучение ( $\lambda < 185$  нм). Практически не пропускает УФ-излучение оконное стекло, так как его поглощает оксид железа, входящий в состав стекла. По этой причине даже в жаркий солнечный день нельзя загореть в комнате при закрытом окне.

Человеческий глаз не видит УФ-излучение, так как роговая оболочка глаза и глазная линза поглощают ультрафиолет. Однако люди, у которых удалена глазная линза при снятии катаракты, могут видеть УФ-излучение в диапазоне длин волн 300—350 нм.

Ультрафиолетовое излучение видят некоторые животные. Например, голубь ориентируется по Солнцу даже в пасмурную погоду.

• **Рентгеновское излучение** возникает в диапазоне частот  $3 \cdot 10^{16}$ — $3 \cdot 10^{20}$  Гц ( $\lambda = 10^{-12}$ — $10^{-8}$  м). Рентгеновское излучение было открыто в 1895 г. немецким физиком **Вильгельмом Рентгеном**. Изучая ускоренное движение заряженных частиц в закрытой чёрным картоном разрядной трубке, Рентген обнаружил свечение экрана, покрытого солью бария, находящегося на некотором расстоянии от трубки. Излучение высокой проникающей способности, испускаемое заряженными частицами в трубке, проходящее, в отличие от ИК- и УФ-излучения, через картон, Рентген назвал *X-лучами* (подобно тому, как в математике называется неизвестная величина). Как было выяснено позднее, *источники рентгеновского излучения — электроны внутренних оболочек атомов или молекул, изменяющие свои состояния, а также ускоренно движущиеся свободные электроны*.

Подобно видимому свету, оставляющему тень за непрозрачными предметами, *рентгеновское излучение* (как его стали называть впоследствии) тоже оставляло такие тени. Однако проникающая способность этого излучения была столь велика, что на экране можно было рассматривать внутреннее строение тел. X-лучи могут проникать через толстый словарь, деревянную доску толщиной несколько сантиметров, металлическую пластину толщиной порядка сантиметра.

Благодаря высокой проникающей способности рентгеновское излучение применяется в рентгеноструктурном анализе (исследовании структуры кристаллической решётки), при изучении структуры молекул, обнаружении дефектов в образцах, в медицине (рентгеновские



снимки, флюорография, лечение раковых заболеваний), криминалистике.

Большая доза рентгеновского облучения приводит к ожогам и изменению структуры крови человека.

Создание приёмников рентгеновского излучения и размещение их на космических станциях позволило обнаружить рентгеновское излучение сотен звёзд, а также оболочек сверхновых звёзд и целых галактик.

•  **$\gamma$ -Излучение** — самое коротковолновое электромагнитное излучение, занимающее весь диапазон частот  $\nu > 3 \cdot 10^{20}$  Гц, что соответствует длинам волн  $\lambda < 10^{-12}$  м.

$\gamma$ -Излучение было открыто французским учёным **Полем Вилларом** в 1900 г. Изучая излучение радия в сильном магнитном поле, Виллар обнаружил коротковолновое электромагнитное излучение, не отклоняющееся, как и свет, магнитным полем. Оно было названо  $\gamma$ -излучением.

*Источник  $\gamma$ -излучения — атомные ядра, изменяющие энергетическое состояние, а также ускоренно движущиеся заряженные частицы.*

$\gamma$ -Излучение обладает ещё большей проникающей способностью, чем рентгеновское излучение. Оно проходит сквозь метровый слой бетона и слой свинца толщиной несколько сантиметров. Почти всё  $\gamma$ -излучение, приходящее на Землю из космоса, поглощается атмосферой Земли. Это обеспечивает возможность существования органической жизни на Земле.  $\gamma$ -Излучение возникает при взрыве ядерного оружия вследствие радиоактивного распада ядер.

Солнце излучает в окружающее пространство каждую секунду во всём диапазоне электромагнитных волн энергию  $E_{\odot} \approx 10^{26}$  Дж. Излучение такой энергии эквивалентно ежесекундной потере массы  $m_1 = E_{\odot}/c^2 = 1,1 \cdot 10^9$  кг = 1,1 млн т.

Это означает, что за счёт электромагнитного излучения Солнце за каждую секунду становится легче на 1,1 млн т. Отметим, что масса Солнца  $m_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$  кг. Поэтому такое уменьшение массы может происходить в течение времени

$$t = \frac{m_{\odot}}{m_1} = 2 \cdot 10^{21} \text{ с} \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ лет.}$$

Ранее всю информацию о Вселенной астрономия получала в видимом диапазоне. В XX в. появилась возможность анализировать данные, поступающие в радиодиапазоне. В настоящее время информация о галактиках исследуется также в ИК-, УФ-, рентгеновском диапазонах. Приёмники, установленные на искусственных спутниках Земли, фиксируют  $\gamma$ -излучение, идущее из космоса. Анализ информации



во всём спектре электромагнитных волн позволяет составить более полную картину структуры объектов во Вселенной.

На рисунке VIII на цветной вклейке (с. 192) приведены снимки туманности Андромеды в радио-, ИК-диапазонах, в видимом свете и рентгеновском диапазоне.

### В О П Р О С Ы

1. В каких устройствах и приборах возникают колебания заряженных частиц?
2. Перечислите восемь основных диапазонов длин волн (частот) в спектре электромагнитных волн в порядке возрастания частоты излучения и укажите границы этих диапазонов.
3. Назовите основные источники излучения волн звуковой частоты, радиоволн, СВЧ- и ИК-излучения.
4. Охарактеризуйте источники видимого света, диапазоны длин волн, соответствующие определённому цвету, а также роль видимого света для жизни на Земле.
5. Назовите основные источники ультрафиолетового, рентгеновского и  $\gamma$ -излучения. Охарактеризуйте основные особенности электромагнитного излучения в этих диапазонах электромагнитного спектра.

## § 33. Радио- и СВЧ-волны в средствах связи

**Принципы радиосвязи.** Передача информации на расстояние с помощью электромагнитных сигналов часто осуществляется по проводам (радиотрансляционная, телеграфная, телефонная связь). Это оказывается энергетически выгодным, кроме того, такой способ связи обеспечивает высокое качество передачи информации. Однако значительные затраты на прокладку линий связи (особенно под водой или в условиях сложного рельефа местности) заставляют отдавать предпочтение беспроводной связи. Такая связь оказывается единственно возможной при информационном обмене между космическими и военными объектами, самолётами, кораблями, альпинистами, спасателями и т. д.

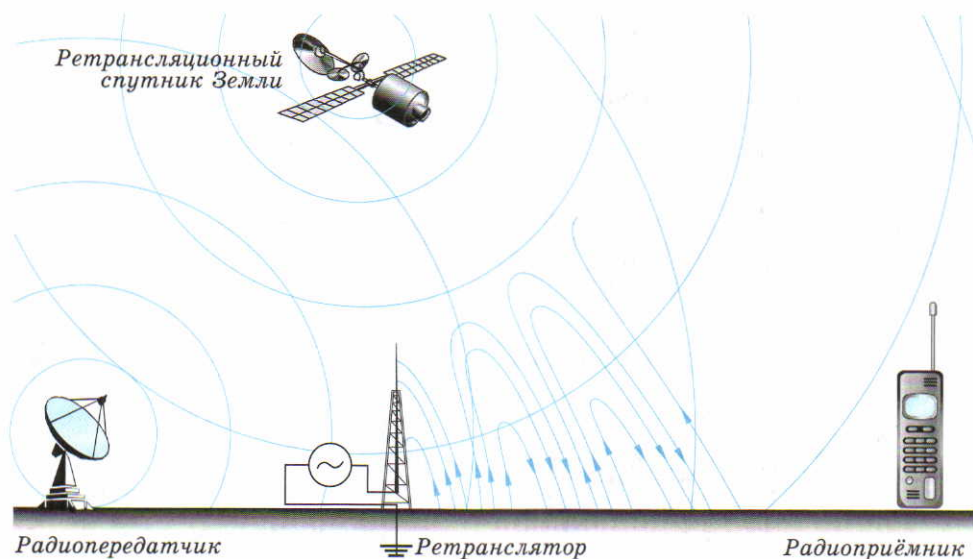
Для передачи и приёма информации с помощью электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве, используют *радиоволны*.

---

***Радиосвязь — передача и приём информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.***

---

Гармонический сигнал радиочастоты, излучаемый в окружающее пространство, не содержит полезной информации (кроме факта су-



## ▲ 89

### Основные элементы радиосвязи

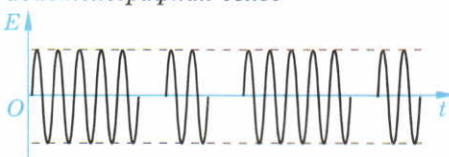
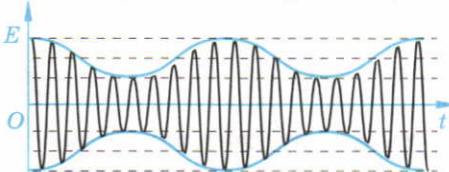
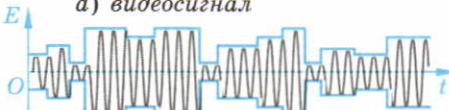
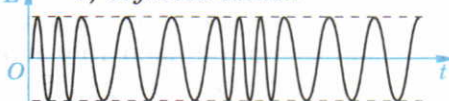
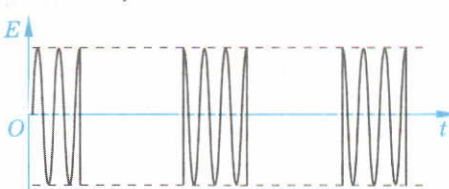
ществования радиоизлучателя). Поэтому передаваемая информация кодируется в радиосигнале. Для радиосвязи требуется *радиопередатчик*, излучающий радиоволны, переносящие необходимую кодированную информацию, и *радиоприёмник*, улавливающий и декодирующий (расшифровывающий) излучаемый передатчиком сигнал (рис. 89). В случае, если мощность передатчика невелика (сотовые и спутниковые телефоны) или если его излучение распространяется в пределах прямой видимости (УКВ-излучение, телевидение), дополнительно используют *ретрансляторы* (стационарные и спутниковые). Ретрансляторы принимают сигнал передатчика и переизлучают его с большей мощностью, обеспечивая передачу сигнала на большие расстояния.

**Виды радиосвязи.** Различают четыре вида радиосвязи: *радиотелеграфная*, *радиотелефонная* и *радиовещание*, *телевидение*, *радиолокация*. Они отличаются *формой передаваемого сигнала*, или *модуляцией* (табл. 4).

Средняя частота передаваемого радиосигнала называется *несущей частотой*. В таблице 4 приведён ориентировочный диапазон несущих частот и соответственно длин волн для различных видов радиосвязи.

**Радиотелеграфная связь** осуществляется путём передачи сочетания точек и тире, кодирующего буквы алфавита в азбуке Морзе.

Таблица 4. Виды радиосвязи

Кодирование сигнала		$\lambda, \text{м}$	$\nu, \text{Гц}$	
Радиотелеграфная связь		$10^4$		
			Длинные волны	$10^5$
		$10^3$	$\lambda = 10^3 - 10^4 \text{ м}$	
Радиотелефонная связь, радиовещание		$10^2$		
			Средние волны	$10^6$
			$\lambda = 10^2 - 10^3 \text{ м}$	
Телевидение		10		
а) видеосигнал			Короткие волны	$10^7$
			$\lambda = 10 - 10^2 \text{ м}$	
б) звуковой сигнал		1		
			УКВ метрового диапазона	$10^8$
Радиолокация		$10^{-1}$		
			УКВ дециметрового диапазона	$10^9$
		$10^{-2}$	УКВ сантиметрового диапазона	$10^{10}$
		$10^{-3}$	УКВ миллиметрового диапазона	$10^{11}$

Впервые радиотелеграфная связь на расстоянии 250 м была продемонстрирована в 1895 г. в Санкт-Петербурге российским учёным **А. С. Поповым**. В 1901 г. итальянский инженер **Г. Маркони** впервые осуществил радиосвязь через Атлантический океан.



**Радиолокация** — обнаружение объектов и определение их координат с помощью отражения радиоволн.

Излучённый радиолокатором и отражённый от объекта импульсы улавливаются антенной (рис. 90, а) и фиксируются на экране электронно-лучевой трубки (рис. 90, б). Промежуток времени  $\tau$  между этими импульсами равен времени распространения электромагнитного импульса от радиолокатора к объекту и обратно, т. е. времени прохождения импульсом, распространяющимся со скоростью света, двойного расстояния

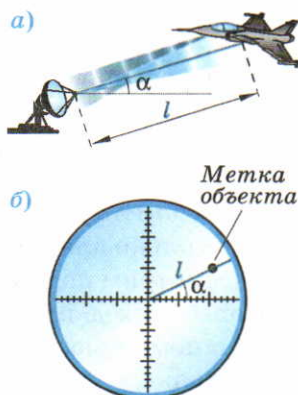
$$\tau = \frac{2l}{c},$$

где  $l$  — расстояние от объекта до радиолокатора.

Тогда расстояние от объекта до радиолокатора

$$l = \frac{c\tau}{2}.$$

Радиолокаторы используют для обнаружения самолётов, кораблей, скопления облаков, локации планет, в космических исследованиях. С помощью радиолокации определяют скорости орбитального движения планет, а также скорости их вращения вокруг оси. Радиолокация Меркурия показала, что он не обращён к Солнцу всё время одной стороной, а совершает три оборота вокруг своей оси за два меркурианских года. Детальная карта рельефа Венеры была получена с помощью радиолокатора межпланетной станции «Магеллан».



▲ 90

Радиолокация:

а) поиск объекта;

б) изображение объекта на электронно-лучевой трубке

## В О П Р О С Ы

1. Какой вид передачи информации называют радиосвязью? Охарактеризуйте основные элементы радиосвязи.
2. Какие существуют виды радиосвязи? Что их отличает друг от друга?
3. Охарактеризуйте форму передаваемого сигнала при различных видах радиосвязи, а также частотный диапазон каждого вида радиосвязи.
4. Охарактеризуйте особенности радиотелеграфной связи.
5. Какой вид радиосвязи называют радиолокацией? На каком физическом явлении основана радиолокация и для каких целей она применяется?

## § 34. Радиотелефонная связь, радиовещание

**Радиопередача. Модуляция сигнала.** В настоящее время значительная доля информации передаётся в радиодиапазоне.

*Радиовещание* — передача в эфир речи, музыки, звуковых эффектов с помощью электромагнитных волн.

*Радиотелефонная связь* предполагает передачу подобной информации только для приёма конкретным абонентом.

Рассмотрим подробнее, как реализуется такой вид радиосвязи.

Колебания давления воздуха в звуковой волне сначала превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Однако колебания звуковой частоты излучаться практически не будут. Поэтому для передачи звука используется излучение высокочастотных колебаний, один из параметров которых изменяется (*модулируется*) по закону изменения звуковых колебаний.

**Модуляция передаваемого сигнала — кодированное изменение одного из его параметров.**

Простейшим видом модуляции высокочастотного сигнала является *амплитудная модуляция*.

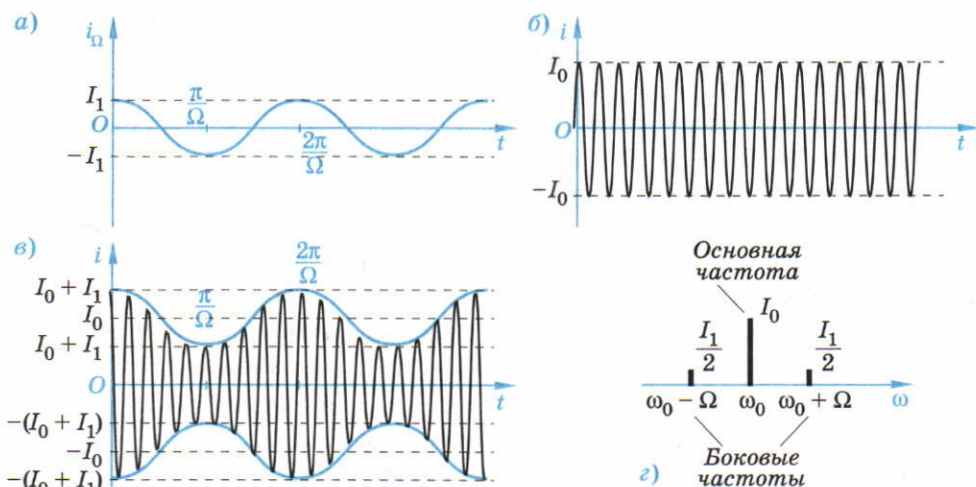
**Амплитудная модуляция — изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.**

Предположим, что высокочастотный сигнал, передаваемый в эфир, изменяется по гармоническому закону с частотой  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ , называемой *несущей*:

$$i = I_0 \cos \omega_0 t.$$

Амплитуда сигнала изменяется со звуковой частотой  $\Omega$  ( $\Omega \ll \omega_0$ ) с помощью микрофона (источника звуковых колебаний) по закону  $i_\Omega = I_1 \cos \Omega t$  (рис. 91, а). В результате амплитуда высокочастотных колебаний (рис. 91, б) начинает изменяться по гармоническому закону с частотой  $\Omega$ :

$$i = (I_0 + I_1 \cos \Omega t) \cos \omega_0 t.$$



## 91

Амплитудно-модулированный сигнал:

- а) звуковой сигнал передатчика;  
 б) высокочастотный сигнал передатчика;  
 в) модулированный сигнал;  
 г) спектрограмма

Такой сигнал можно рассматривать как гармонические колебания с медленно изменяющейся амплитудой, так как ( $\Omega \ll \omega_0$ ) (рис. 91, в).

Раскрывая скобки в этом выражении и учитывая, что

$$\cos \Omega t \cos \omega_0 t = \frac{1}{2} [\cos (\Omega - \omega_0) t + \cos (\Omega + \omega_0) t],$$

получаем

$$I = I_0 \cos \omega_0 t + \frac{I_1}{2} \cos (\omega_0 - \Omega) t + \frac{I_1}{2} \cos (\omega_0 + \Omega) t.$$

Последнее выражение показывает, что такой амплитудно-модулированный сигнал, передаваемый в эфир, можно рассматривать как сумму трёх гармонических колебаний с частотой  $\omega_0$ ,  $\omega_0 - \Omega$  и  $\omega_0 + \Omega$ .

Структуру амплитудно-модулированного колебания можно представить в виде спектрограммы, в которой по горизонтальной оси откладывается частота, а по вертикальной оси — амплитуда колебаний (рис. 91, г). Как видно из спектрограммы, для передачи данного звукового сигнала требуется полоса частот  $2\Omega$ .

Ширина канала связи — полоса частот, необходимая для передачи данного звукового сигнала.



Чем больше несущая частота, тем большее число независимых радиостанций (сигналы которых не накладываются друг на друга) можно разместить в заданном диапазоне частот. Переход к вещанию на более высоких частотах позволяет резко увеличить число каналов и соответственно объём передаваемой информации.

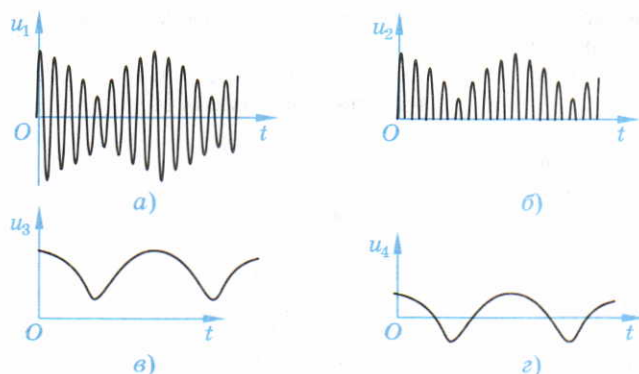
**Радиоприём. Демодуляция сигнала.** Радиоволны, излучаемые передатчиком, вызывают вынужденные колебания электронов в антенне приёмника. Принципиально такие высокочастотные колебания возникают в приёмной антенне от всех радиостанций Земли. Для выделения сигнала одной радиостанции, работающей на фиксированной несущей частоте  $\omega_0$ , служит колебательный контур, содержащий конденсатор переменной ёмкости. Индуктивность контура является вторичной обмоткой трансформатора, у которого роль первичной обмотки выполняет индуктивность антенны. Изменением электроёмкости контура можно добиться совпадения собственной частоты контура с несущей частотой интересующей радиостанции:  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ .

При этом вследствие резонанса амплитуда вынужденных колебаний напряжения данной несущей частоты резко возрастает по сравнению с напряжениями других несущих частот, приходящих от других радиостанций. Таким образом сигнал требуемой станции выделяется среди всех остальных.

Однако выделенный амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал не воспринимается ухом человека и не способен непосредственно вызвать колебания мембраны телефона или рупора громкоговорителя со звуковой частотой. Из амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала требуется выделить колебания звуковой частоты  $\Omega$ , содержащие передаваемую информацию. Высокочастотные колебания несущей частоты  $\omega$ , как отмечалось выше, лишь переносят требуемую информацию, но не содержат её.

**Детектирование (или демодуляция) — процесс выделения низкочастотных (звуковых) колебаний из модулированных колебаний высокой частоты.**

В простейшем приёмнике демодуляция осуществляется в два этапа: сначала высокочастотные колебания (рис. 92, а) выпрямляются (рис. 92, б), а затем выделяется низкочастотная огибающая высокочастотных импульсов (рис. 92, в).



92

Демодуляция  
в простейшем  
радиоприёмнике

В результате демодуляции в приёмнике электрический сигнал звуковой частоты, идентичный сигналу, передаваемому радиостанцией, преобразуется мембраной телефона в звуковые колебания (рис. 92, г).

### В О П Р О С Ы

1. В чём отличие радиовещания от радиотелефонной связи?
2. Какое изменение передаваемого сигнала называют амплитудной модуляцией?
3. Объясните последовательность формирования амплитудно-модулированного сигнала.
4. Почему переход к вещанию на более высоких частотах позволяет увеличить число каналов передачи информации?
5. Объясните последовательность радиоприёма и детектирования высокочастотного модулированного радиосигнала.

### О С Н О В Н Ы Е П О Л О Ж Е Н И Я

**Электромагнитная волна** — возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в пространстве со скоростью света.

Электромагнитная волна является поперечной: направления векторов напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны.

Излучение электромагнитных волн возникает при ускоренном движении электрических зарядов.

**Плотность энергии электромагнитного поля** в вакууме пропор-

циональна квадрату напряжённости электрического поля:

$$w_{\text{эм}} = \epsilon_0 E^2,$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

**Напряжённость электрического поля для бегущей гармонической волны**, распространяющейся в положительном направлении оси  $X$  со скоростью  $v$ :

$$E = E_0 \sin \left( \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right).$$



- **Длина волны** — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний её источника:

$$\lambda = vT.$$

- **Плоскополяризованная (или линейнополяризованная) электромагнитная волна** — волна, в которой вектор  $\vec{E}$  колеблется только в одном направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

- **Плоскость поляризации электромагнитной волны** — плоскость, проходящая через направление колебаний вектора напряжённости электрического поля и направление распространения волны.

- **Фронт электромагнитной волны** — поверхность постоянной фазы напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля.

- **Плотность потока энергии электромагнитной волны** — мощность электромагнитного излучения, проходящего сквозь единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны.

- **Интенсивность электромагнитной волны** — среднее значение плотности потока энергии электромагнитной волны.

- **Интенсивность гармонической электромагнитной волны** прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля:

$$I \sim E_0^2.$$

- **Интенсивность излучения точечного источника** убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника:

$$I \sim \frac{1}{r^2}.$$

Интенсивность гармонической электромагнитной волны с постоянной амплитудой прямо пропорциональна четвёртой степени её частоты:

$$I \sim \nu^4.$$

Спектр электромагнитных волн условно делят на восемь диапазонов частот (длин волн) (табл. 5):

- волны звуковых частот;
- радиоволны;
- микроволновое (СВЧ) излучение;
- инфракрасное (ИК) излучение;
- видимый свет;
- ультрафиолетовое (УФ) излучение;
- рентгеновское излучение;
- $\gamma$ -излучение.

**Радиосвязь** — передача и приём информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Различают **четыре вида радиосвязи**, отличающиеся типом кодирования передаваемого сигнала (см. табл. 5):

- радиотелеграфная связь;
- радиотелефонная связь и радиовещание;
- телевидение;
- радиолокация.

- **Модуляция передаваемого сигнала** — кодированное изменение одного из его параметров.

- **Амплитудная модуляция** — изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.

- **Ширина канала связи** — полоса частот, необходимая для передачи данного звукового сигнала.

- **Детектирование (или демодуляция)** — процесс выделения низкочастотных звуковых колебаний из модулированных колебаний высокой частоты.



**Таблица 5. Источники электромагнитного излучения различных диапазонов частот**

<i>Диапазон частот</i>	<i>Источник излучения</i>
Волны звуковых частот Радиоволны	Переменный ток
СВЧ-излучение (микроволновое)	Изменение направления спина валентного электрона атома или скорости вращения молекул вещества
ИК-излучение	Колебание и вращение молекул вещества
Видимый свет УФ-излучение Рентгеновское излучение	Изменение состояния электронов в атомах или молекулах, ускорение свободных электронов
$\gamma$ -Излучение	Изменение состояния атомных ядер, ускорение свободных заряженных частиц

## § 35. Принцип Гюйгенса

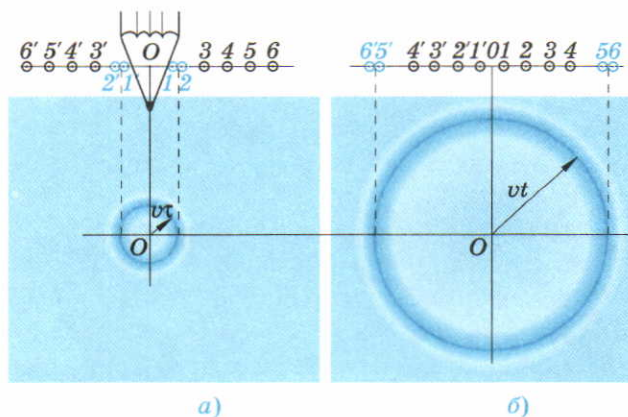
**Волна на поверхности воды от точечного источника.** Прежде чем начать изучение электромагнитных волн, обратимся к механическим волнам, поскольку распространение волн разной природы подчиняется одним и тем же принципам и законам.

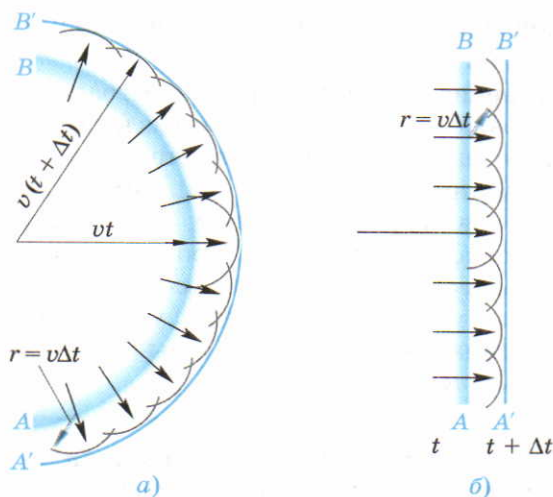
Начнём изучение с волн на поверхности воды, вызванных точечным источником. Если в воду в точке  $O$  быстро опускать (за промежуток времени  $\tau$ ) и сразу поднимать карандаш, то на поверхности воды возникает волна. Её появление связано с изменением расстояний между молекулами воды при воздействии на них карандаша (рис. 93). В невозмущённом состоянии межмолекулярные промежутки примерно одинаковы. Уменьшение расстояния между молекулами  $1-2$  и  $1'-2'$  (сжатие) приводит к увеличению сил отталкивания между ними, которое по цепочке передаётся через промежуток времени  $t$  молекулам  $5-6$  и  $5'-6'$ . Таким образом, через промежуток времени  $t$  фронт вол-

93 ▶

Волна на поверхности жидкости от точечного источника:

а) в момент времени  $\tau$ ,  
б) в момент времени  $t > \tau$





## 94

Фронт волны как огибающая вторичных волн:

- а) сферическая волна;  
б) плоская волна

ны сжатия, распространяющейся в воде со скоростью  $v$ , будет находиться от точки  $O$  на расстоянии  $vt$ , объединяя наиболее удалённые от источника точки, до которых дошёл процесс распространения волны.

Фронтом волны точечного источника в однородном пространстве является сфера. Зная положение фронта волны  $AB$  в момент времени  $t$ , с помощью принципа Гюйгенса можно найти фронт волны  $A'B'$  через промежуток времени  $\Delta t$  (рис. 94, а).

## Принцип Гюйгенса

**Каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде.**

Вторичные волны, распространяющиеся от каждой точки волнового фронта  $AB$ , через время  $\Delta t$  удаляются от него на расстояние  $v\Delta t$ . Сферическая поверхность радиуса  $v(t + \Delta t)$ , огибающая все вторичные волны в момент времени  $t + \Delta t$ , определяет положение фронта волны в этот момент времени.

Стрелки (лучи) на рисунке 94 показывают направление распространения фронта волны в каждой точке. Напомним, что *луч* — линия, вектор касательной к которой перпендикулярен фронту волны и направлен в сторону переноса энергии волны в данной точке.

Положение фронта сферической волны в определённый момент времени однозначно определяется двумя лучами, выходящими из точеч-



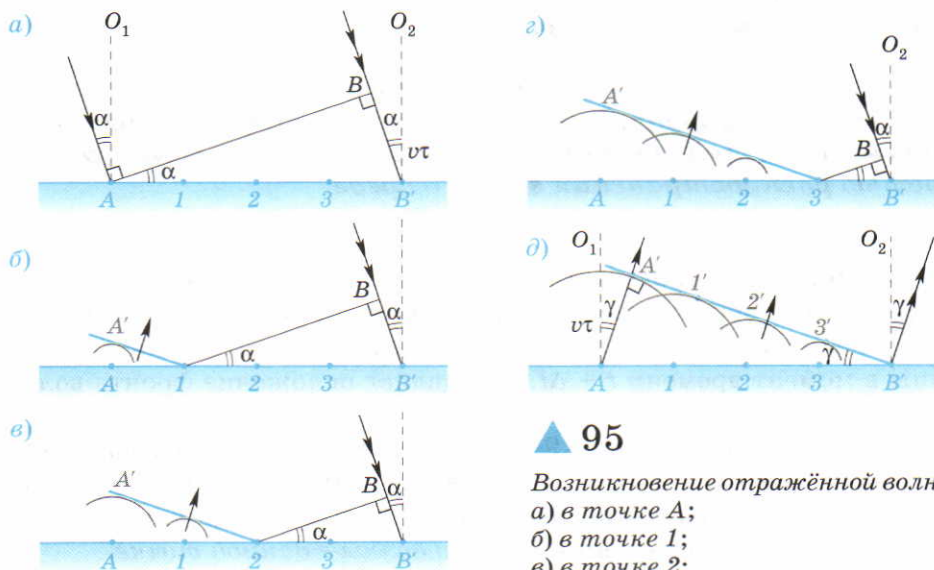
ного источника, а фронта плоской волны — одним лучом, перпендикулярным плоскости волны (рис. 94, б).

**Закон отражения волн.** Изменение направления распространения волны может происходить при отражении её от границы раздела двух сред. Найти количественно это изменение позволяет принцип Гюйгенса.

Рассмотрим процесс возникновения отражённой волны при падении плоской волны на плоскую границу раздела двух сред. Пусть фронт волны ограничен лучами, перпендикулярными фронту, направленными в точки  $A$  и  $B'$  границы раздела (рис. 95, а), и плоскость волны образует с поверхностью раздела угол  $\alpha$ . Угол между лучом и перпендикуляром  $O_2B'$  к границе раздела так же равен  $\alpha$  (углы с соответственно перпендикулярными сторонами).

**Угол падения волны — угол между падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред в точке падения.**

Падающая под углом волна достигает точек  $A$  и  $B'$  границы раздела в разные моменты времени. В тот момент, когда фронт волны достигает точки  $A$ , эта точка становится источником вторичных волн. По мере того как волна попадает в точки  $1, 2, 3, B'$  (рис. 95, б—д), все они становятся источниками вторичных волн. Фронт отражённой волны



## 95

Возникновение отражённой волны:

- а) в точке  $A$ ;
- б) в точке  $1$ ;
- в) в точке  $2$ ;
- г) в точке  $3$ ;
- д) в точке  $B'$

является плоской поверхностью, касательной к сферическим фронтам вторичных волн.

Из равенства прямоугольных треугольников  $AA'B'$  (см. рис. 95,  $\delta$ ) и  $AB'B$  (см. рис. 95,  $a$ ) (равные катеты  $AA'$  и  $BB'$  и общая гипотенуза  $AB'$ ) следует, что  $\angle AB'A' = \angle BAB'$ , или  $\alpha = \gamma$ .

Отражённые лучи из точек  $A$  и  $B'$  составляют с перпендикулярами к границе раздела  $O_1A$  и  $O_2B'$  угол  $\alpha$ .

**Угол отражения волны — угол между отражённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности.**

Сформулируем закон отражения волн.

### Закон отражения волн

**Угол отражения равен углу падения.**

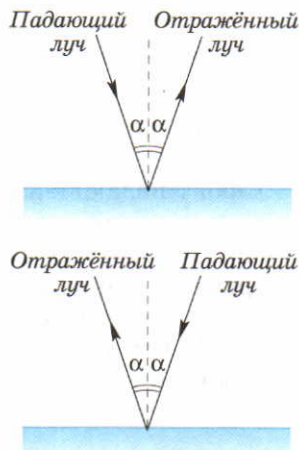
**Падающий луч, отражённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к отражающей поверхности, лежат в одной плоскости.**

Важным свойством лучей, в частности лучей света, является их *обратимость*. Если пустить падающий луч в направлении отражённого, то он отразится в направлении падающего (рис. 96).

При зеркальном отражении изменяется направление распространения плоского фронта волны, но не изменяется его форма. В случае неровной поверхности возникает *диффузное отражение*, при котором параллельный пучок падающих лучей не преобразуется в параллельный пучок отражённых лучей.

### В О П Р О С Ы

1. Дайте определение фронта механической волны.
2. Дайте определение угла падения волны и угла её отражения.
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса. Какие волны называют вторичными?
4. Докажите закон отражения света с помощью принципа Гюйгенса.
5. В чём состоит принцип обратимости лучей?



### 96

*Обратимость световых лучей*

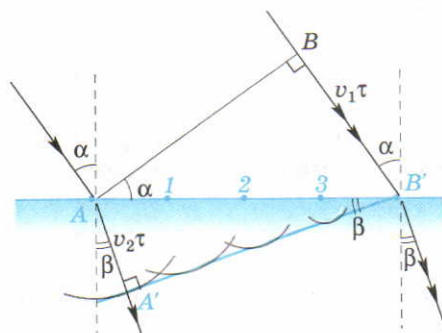


## § 36. Преломление волн

**Закон преломления.** Продолжим изучение особенностей распространения световых волн на границе двух сред.

Как было установлено ранее, свет, падающий из первой среды, отражается в неё обратно. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу раздела. При этом, как правило, он меняет направление распространения, или испытывает *преломление*.

**Преломление — изменение направления распространения волны при прохождении из одной среды в другую.**



### ▲ 97

*Преломление плоской волны*

Преломление волн при переходе из одной среды в другую вызвано тем, что скорости распространения волн в средах различны.

Обозначим скорость волны в первой среде через  $v_1$ , а во второй через  $v_2$ . Выведем закон преломления с помощью принципа Гюйгенса.

Рассмотрим процесс возникновения преломлённой волны (прошедшей во вторую среду) при падении плоской волны на плоскую границу двух сред.

Как и при отражении, предположим, что фронт  $AB$  падающей волны ограничен лучами, направленными в точки  $A$  и  $B'$  границы раздела (рис. 97).

Фронт падающей волны образует с поверхностью раздела угол  $\alpha$ . Таков же угол падения волны. В момент времени  $t$  точка  $B$  фронта волны попадает в точку  $B'$  ( $BB' = v_1 t$ ). Вторичная волна от точки  $A$  за это же время распространяется на расстояние  $AA' = v_2 t$ . На рисунке 96 показаны фронты вторичных волн, распространяющихся из точек  $A, 1, 2, 3$ . Огибающей этих волн является плоский фронт  $A'B'$  преломлённой волны.

Проведём преломлённые лучи в точках  $A$  и  $B'$  перпендикулярно фронту  $A'B'$ , составляющие с перпендикулярами к границе раздела угол  $\beta$ .

**Угол преломления — угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к границе раздела, восставленным в точке падения.**





а)



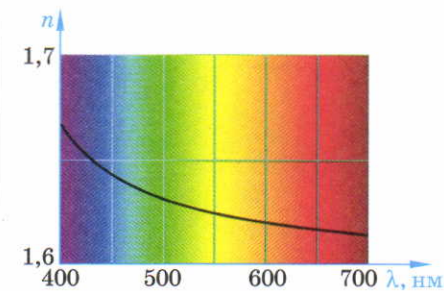
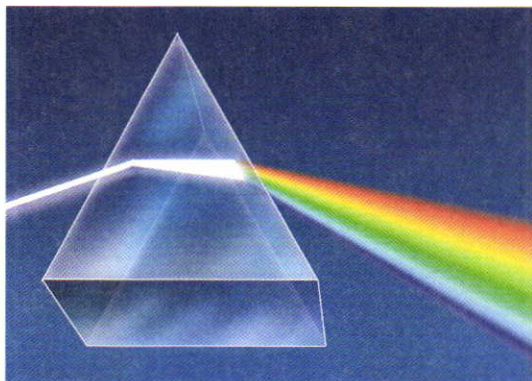
б)

#### IV

Радиационное давление излучения Солнца:

а) на панели солнечных батарей спутника Земли;

б) на хвост кометы



а)

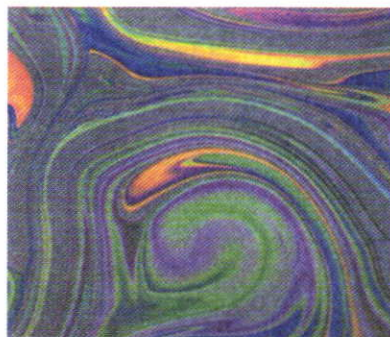
б)

#### V

Дисперсия света:

а) призма Ньютона;

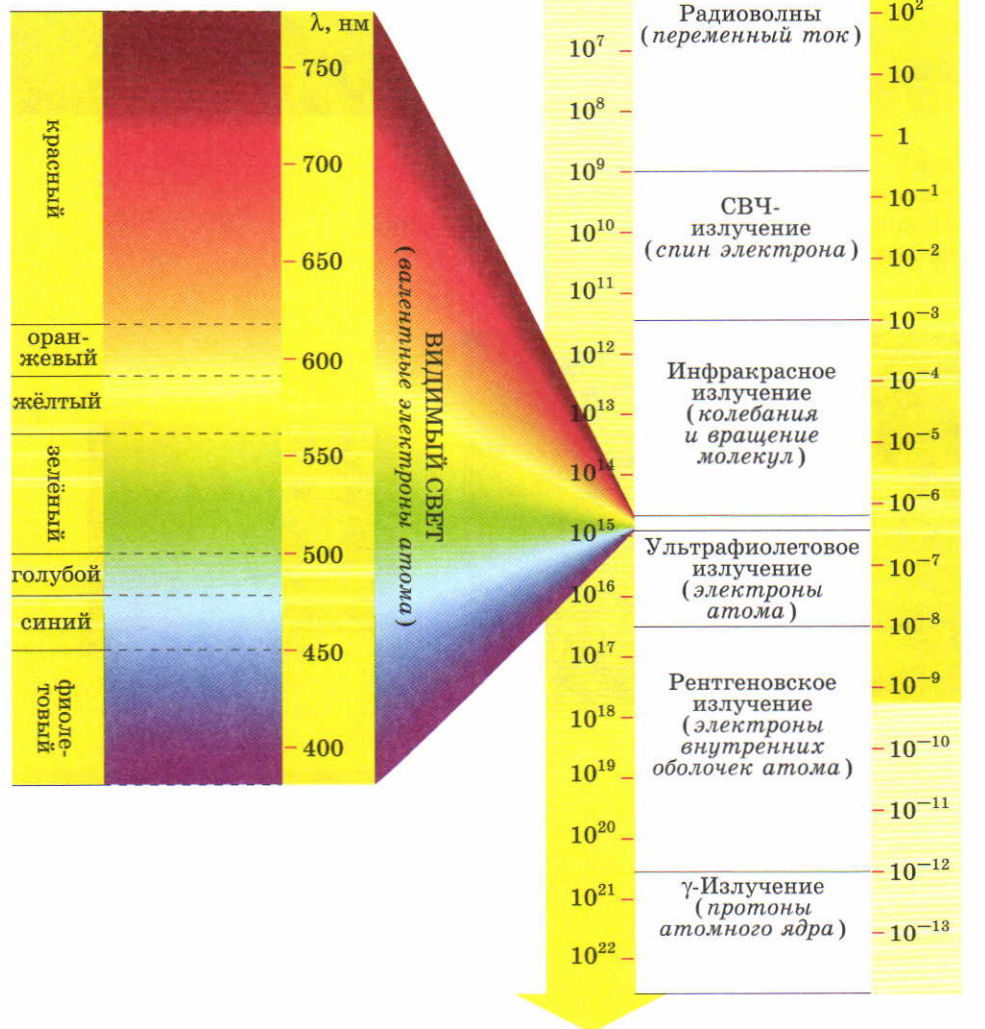
б) зависимость показателя преломления от длины волны



#### VI

Интерференция света в тонких плёнках.

Масляная плёнка на поверхности воды, освещённая солнечным светом



**▲ VII**  
Спектр электромагнитных волн и источники их излучения

Рассмотрим прямоугольные треугольники  $AA'B'$  и  $ABB'$ .

Углы  $AB'A'$  и  $\beta$  равны как углы с соответственно перпендикулярными сторонами. Приравнявая выражения для гипотенузы  $AB'$ , общей для  $\triangle AA'B'$  и  $\triangle ABB'$ , получаем

$$\frac{v_1 \tau}{\sin \alpha} = \frac{v_2 \tau}{\sin \beta}.$$

Тогда закон преломления можно сформулировать следующим образом.

### Закон преломления волн

*Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (83)$$

*Падающий луч, преломлённый луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.*

**Абсолютный показатель преломления среды.** Максимальной скоростью распространения взаимодействия является скорость света в вакууме. В любой среде свет распространяется с меньшей скоростью. Физической величиной, характеризующей уменьшение скорости распространения света в среде по сравнению со скоростью света в вакууме, является **абсолютный показатель преломления среды**.

*Абсолютный показатель преломления среды — физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:*

$$n = \frac{c}{v}. \quad (84)$$

Абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость распространения света в данной среде меньше, чем скорость света в вакууме:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (85)$$

Чем больше абсолютный показатель преломления среды, тем меньше скорость распространения света в ней. При сравнении абсолютных показателей преломления двух сред используют понятие оптической плотности среды.



*Оптически более плотная среда* — среда с большим показателем преломления.

*Оптически менее плотная среда* — среда с меньшим показателем преломления.

Используя выражение (85) для двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , можно представить закон преломления в следующем виде.

### Закон преломления

**Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению абсолютных показателей преломления второй среды к первой:**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (86)$$

Таблица 6.

**Абсолютный показатель преломления**

Вещество	$n$
Воздух	1,0003
Лёд	1,31
Вода	1,333
Этиловый спирт	1,36
Бензин	1,5
Стекло	1,52
Кварц	1,54
Алмаз	2,42

Если луч света переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную ( $n_1 < n_2$ ), то угол преломления оказывается меньше угла падения ( $\beta < \alpha$ ).

Преломлённый луч ближе прижимается к перпендикуляру к границе раздела, чем падающий (рис. 98, а).

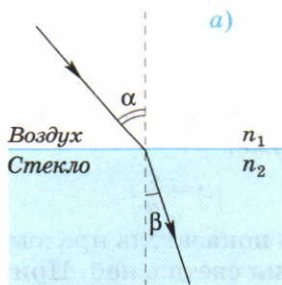
Для рассмотрения противоположного случая можно воспользоваться принципом обратимости лучей. Если луч света идёт из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ( $n_2 > n_1$ ), то угол преломления оказывается больше угла падения  $\alpha > \beta$ . Преломлённый луч больше отклоняется от перпендикуляра к границе раздела, чем падающий (рис. 98, б).

## 98

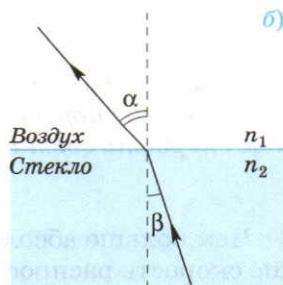
*Преломление светового луча:*

а) при падении из оптически менее плотной среды в оптически более плотную;

б) при падении из оптически более плотной среды в оптически менее плотную



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$



$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2}$$

При переходе луча света из вакуума ( $n_1 = 1$ ) в среду с показателем преломления  $n_2 = n$  закон преломления можно записать следующим образом:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (87)$$

Измеряя угол падения  $\alpha$  и угол преломления  $\beta$ , с помощью формулы (86) можно найти абсолютный показатель преломления среды.

Значения абсолютного показателя преломления некоторых сред приведены в таблице 6.

### В О П Р О С Ы

1. Какое физическое явление называют преломлением света?
2. Как с помощью принципа Гюйгенса объясняется явление преломления света?
3. Какой угол называют углом преломления?
4. Какую физическую величину называют абсолютным показателем преломления? Что она характеризует?
5. Запишите закон преломления света при переходе границы сред с абсолютными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . Чем отличается ход луча при его преломлении в оптически более плотную среду от преломления в оптически менее плотную?

### З А Д А Ч И

1. Найдите скорость распространения света в алмазе.
2. Длина волны зелёного света в воздухе  $\lambda = 540$  нм. Какой будет длина волны этого излучения в воде?
3. Луч света падает из воздуха в воду под углом  $60^\circ$ . Найдите угол между отражённым и преломлённым лучами.

## § 37. Полное внутреннее отражение. Дисперсия света

**Полное внутреннее отражение.** Остановимся на некоторых особенностях преломления света. Если пучок света переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную ( $n_1 < n_2$ ), то *при любом угле падения* существует как отражённый, так и преломлённый пучки света (рис. 99).

Рассмотрим подробнее случай, когда свет распространяется от точечного источника  $S$  из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (вакуум). Если угол падения небольшой, то свет как преломляется, так и отражается (лучи 1 и 2 на рис. 100). С ростом угла падения  $\alpha$  возрастает угол преломления  $\beta$  ( $\beta > \alpha$ ), а также интенсивность



### ▲ 99

Одновременное отражение и преломление света

отражённого луча. При некотором угле падения  $\alpha_0$  угол преломления достигает своего максимального значения  $\beta_{\max} = 90^\circ$  (луч 3).

В соответствии с законом преломления света (86):

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \alpha_0 = \arcsin \left( \frac{1}{n} \right).$$

Если угол падения  $\alpha > \alpha_0$  (луч 4), преломление света во вторую среду прекращается, свет полностью отражается от границы раздела, как от зеркала, — возникает явление полного внутреннего отражения.

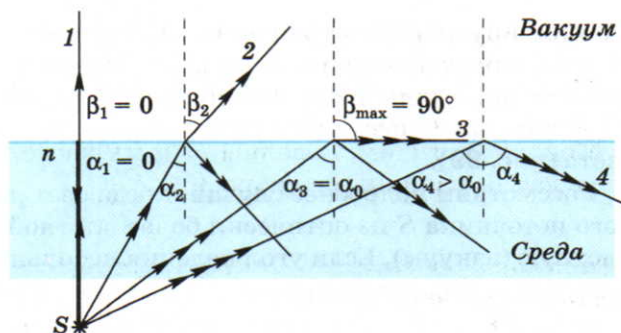
**Полное внутреннее отражение** — явление отражения света от оптически менее плотной среды, при котором преломление отсутствует, а интенсивность отражённого света практически равна интенсивности падающего.

Угол полного внутреннего отражения  $\alpha_0$  — минимальный угол падения света, начиная с которого возникает явление полного внутреннего отражения.

Для границы раздела стекло—воздух угол полного внутреннего отражения равен

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{1,52} = 42^\circ.$$

Испытывая полное внутреннее отражение, световой сигнал может распространяться внутри гибкого стекловолокна (световода). Свет мо-



### 100 ▶

Полное внутреннее отражение



жет покидать волокно лишь при больших начальных углах падения и при значительном изгибе волокна (рис. 101). Использование пучка, состоящего из тысяч гибких стекловолокон (с диаметром каждого волокна от 0,002—0,01 мм), позволяет передавать оптические изображения.

*Волоконная оптика — система передачи оптических изображений с помощью стекловолокон (световодов).*

Волоконно-оптические устройства используются в медицине в качестве *эндоскопов* — зондов, вводимых в различные внутренние органы (бронхиальные трубы, кровеносные сосуды и т. д.) для непосредственного визуального наблюдения.

В настоящее время волоконная оптика вытесняет металлические проводники в системах передачи информации.

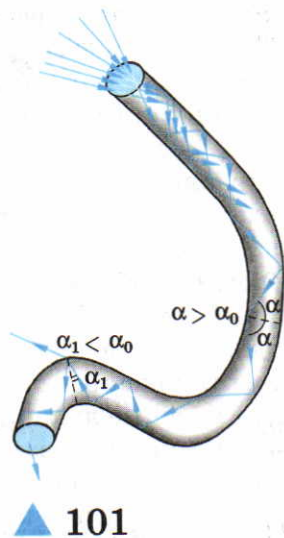
Увеличение несущей частоты передаваемого сигнала увеличивает объём передаваемой информации. Частота видимого света на 5—6 порядков превосходит несущую частоту радиоволн. Соответственно с помощью светового сигнала можно передавать в миллион раз больше информации, чем с помощью радиосигнала. Необходимая информация по волоконному кабелю передаётся в виде модулированного лазерного излучения. Волоконная оптика необходима для быстрой и качественной передачи компьютерного сигнала, содержащего большой объём передаваемой информации.

Полное внутреннее отражение используется в призматических биноклях, перископах, зеркальных фотоаппаратах.

**Дисперсия света.** В вакууме электромагнитные волны различных частот (длин волн) распространяются с одной и той же скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Однако в среде скорости распространения монохроматических волн разных частот отличаются друг от друга.

*Монохроматическая волна — электромагнитная волна определённой постоянной частоты.*

Монохроматические волны разных частот распространяются в одной среде с различными скоростями.



▲ 101

*Распространение света в световоде*

**Дисперсия света — зависимость скорости света в веществе от частоты волны.**

Различным скоростям распространения волн соответствуют разные абсолютные показатели преломления среды ( $n = c/v$ ). Поэтому можно утверждать, что *дисперсия света — зависимость абсолютного показателя преломления от частоты световой волны*. Подобная зависимость была наглядно подтверждена в 1666 г. **Исааком Ньютоном**, направившим тонкий пучок солнечного света на стеклянную призму. Белый свет не является монохроматическим, а содержит электромагнитные волны различных частот. За призмой наблюдалось разложение белого света в цветной спектр: семь основных цветов — красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый плавно переходили друг в друга (рис. V, а на цветной вклейке, с. 128). Наименьшее отклонение  $\alpha_k$  от первоначального направления падения испытывают красные лучи, а наибольшее — фиолетовые  $\alpha_\phi$ . Это означает, что абсолютный показатель преломления  $n_\phi$  для волн, соответствующих фиолетовому цвету, больше, чем для волн, соответствующих красному  $n_k$ . *Цвет, воспринимаемый глазом, определяется частотой световой волны.*

Частота  $\nu_\phi$  фиолетового света больше частоты красного. Таким образом, из опыта Ньютона следует, что *абсолютный показатель преломления возрастает с увеличением частоты света*. Учитывая, что длина волны обратно пропорциональна частоте ( $\lambda = c/\nu$ ), можно утверждать, что *абсолютный показатель преломления уменьшается с увеличением длины световой волны*. На рисунке V, б на цветной вклейке (с. 128) приведена зависимость абсолютного показателя преломления стекла (флинтгласа) от длины волны света.

**Восприятие и воспроизведение цвета.** Если цветной спектр лучей, полученный за призмой Ньютона, направить в обратную сторону (или на такую же призму), то в силу обратимости световых лучей он преобразуется в белый, бесцветный. Многочисленные опыты показали, что свет воспринимается наблюдателем как бесцветный  $\emptyset$ , даже если содержит три основных цвета: красный (к), зелёный (з) и синий (с) в определённой пропорции их интенсивностей: условно  $k + z + c = \emptyset$ . С помощью произвольного сочетания интенсивностей света этих цветов можно воспроизвести любой цвет, видимый человеческим глазом. Подобный эффект связан со структурой сетчатки глаза, содержащей три типа нервных окончаний — «колбочек», наиболее чувствительных соответственно к красному, зелёному и синему цветам. Если, например, в мозг идут сигналы только от зелёных колбочек сетчатки глаза, цвет излучения будет казаться наблюдателю зелёным.

Другой тип светочувствительных нервных окончаний — «палочки» — реагирует на уровень интенсивности света.



Цвет может восприниматься белым, если состоит из так называемых «дополнительных» цветов, например синего и жёлтого:  $c + ж = \emptyset$ .

Иногда жёлтый цвет в этом смысле называют антисиним и обозначают  $\tilde{c}$ . Тогда  $c + \tilde{c} = \emptyset$ .

Цветное изображение на дисплее компьютера (или плазменном экране телевизора) складывается из отдельных светящихся точек. Возможность воспроизведения трёх цветов разной интенсивности в каждой точке позволяет передать тончайшие оттенки любого цвета.

### В О П Р О С Ы

1. Какое физическое явление называют полным внутренним отражением? Как вычислить угол полного внутреннего отражения? Как используется полное внутреннее отражение в волоконной оптике?
2. Какую волну называют монохроматической?
3. Какое физическое явление называют дисперсией?
4. Какая зависимость абсолютного показателя преломления стекла от частоты следует из опыта Ньютона?
5. Как получается белый цвет на экране компьютера?

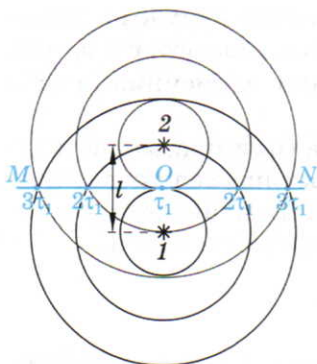
### З А Д А Ч И

1. Найдите угол полного внутреннего отражения для границы вода—воздух.
2. При каком угле падения  $\alpha$  луча из воды в стекло отражённый луч перпендикулярен преломлённому?
3. На дне пруда глубиной 0,4 м сидит лягушка, прячущаяся под круглым листом, который плавает на поверхности воды. Каким должен быть минимальный радиус листа, чтобы лягушку не увидел аист, находящийся над поверхностью воды?

## § 38. Интерференция волн

**Сложение волн от независимых точечных источников.** Выясним, как происходит взаимодействие световых волн, излучаемых различными источниками. В качестве аналогии рассмотрим взаимодействие двух волн на воде, вызванных одновременно двумя точечными источниками, находящимися на расстоянии  $l$  друг от друга. Например, такие волны сжатия и разрежения могут возникнуть на поверхности воды при одновременном ( $t_1 = t_2$ ) опускании в воду двух карандашей, которые затем быстро вынимаются из воды. На рисунке 102 показаны положения фронтов волн сжатия, распространяющихся от точек 1 и 2, через равные промежутки времени  $\tau_1 = l/2v$ , где  $v$  — скорость распространения волн на воде. Максимальное сжатие возникает в точках пересечения волновых фронтов на линии  $MON$ .





### ▲ 102

*Взаимодействие волновых фронтов двух точечных источников при одновременном возникновении волн ( $t_1 = t_2$ )*

**Когерентность.** В рассмотренном примере возмущения среды в точках 1 и 2 являлись однократными. Поэтому усиление колебаний среды в точках пересечений волновых фронтов можно было наблюдать лишь на передовом фронте результирующей волны.

Если возмущения среды в точках 1 и 2 происходят непрерывно, например изменяются по гармоническому закону, взаимодействие (наложение друг на друга волн, распространяющихся из этих точек) будет происходить во всех точках пространства. При определённых условиях человеческим глазом может наблюдаться *интерференционная картина* — неизменная во времени картина усиления или ослабления волн в пространстве.

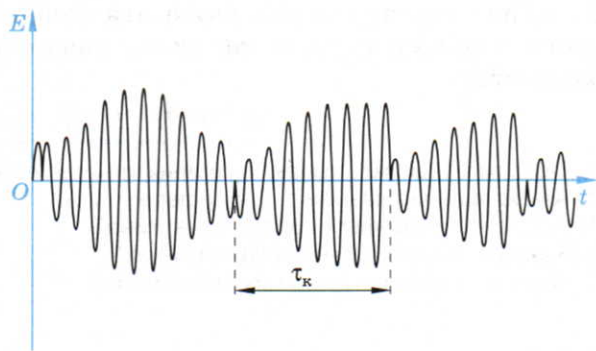
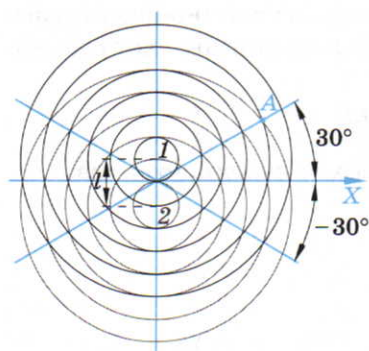
**Интерференция** (от лат. *inter* — взаимно и *ferio* — ударяю) — явление наложения волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний в различных точках пространства.

Интерференция — общее свойство волн любой природы.

Устойчивая во времени интерференционная картина может наблюдаться только при сложении коррелированных (взаимосвязанных) колебаний, называемых *когерентными* волнами (от лат. *cohaerens* — находящийся в связи).

**Когерентные волны** — волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

На рисунке 103 показан результат интерференции волн, излучаемых двумя радиодантными одной радиостанции, настроенной на длину волны  $\lambda$ . Расстояние между антеннами  $l = 2\lambda$ , излучение происходит синхронно: разность фаз излучателей равна нулю. Мгновенное положение фронтов волн показано через каждый период  $T$  излучения. Наложение волн происходит во всех точках, до которых дошло волновое возмущение. Например, в точке А в произвольный момент



### ▲ 103

Интерференция волн от двух когерентных источников ( $l = 2\lambda$ )

### ▲ 104

Амплитуда световой волны, излучаемой отдельным атомом вещества

времени складываются волны, излучённые из точки 1 в момент времени  $(t - 4T)$  и из точки 2 в момент  $(t - 5T)$ . Так как эти моменты времени разделяет период, волны, складываясь в точке A, усиливают друг друга. Аналогично можно показать, что устойчивое во времени взаимное усиление волн будет наблюдаться вдоль выделенных голубым цветом прямых линий, составляющих с горизонтальной осью X углы

$$\alpha = 0, \pm 30^\circ; \pm 90^\circ; \pm 150^\circ; 180^\circ.$$

Для выделения монохроматических световых волн можно воспользоваться светофильтром, дающим определённую частоту (длину волны). Поляризатор выделяет свет определённой поляризации. Наиболее сложно добиться постоянства разности фаз от двух независимых источников света. Атомы источников излучают свет прерывисто в виде «цуга» гармонических колебаний — импульса длительностью порядка  $10^{-8}$  с.

Фаза каждого последующего «цуга» хаотически изменяется по сравнению с предыдущим. Средняя длительность «цуга» гармонического излучения характеризует время когерентности  $\tau_k \approx 10^{-8}$  с.

За это время свет распространяется на расстояние  $l_k = c\tau_k$  (рис. 104), называемое длиной когерентности. Длина когерентности — расстояние, на котором происходит устойчивое гармоническое колебание световой волны:  $l_k \approx 1$  м.

Волны от различных источников имеют постоянную разность фаз лишь в течение времени когерентности. Затем разность фаз между ними хаотически изменяется. Соответственно изменяется и интерференционная картина. Человеческий глаз вследствие его инерционности (позволяющей различать картины, отличающиеся по длительности на



0,1 с) не в состоянии различить эти изменения. Устойчивой интерференционной картины от таких независимых источников света не наблюдается.

### В О П Р О С Ы

1. Поясните, как складываются волны от независимых точечных источников.
2. Какое явление называют интерференцией?
3. Что такое интерференционная картина?
4. Какие волны называют когерентными?
5. Что такое время и длина когерентности?

## § 39. Взаимное усиление и ослабление волн в пространстве

**Условия минимумов и максимумов при интерференции волн.** Выясним, как зависит результат сложения двух когерентных электромагнитных колебаний от их разности фаз или от времени запаздывания одного колебания по отношению к другому. Будем рассматривать интерференцию двух когерентных электромагнитных волн, пришедших одновременно в произвольную точку  $A$  пространства.

Когерентные волны одинаково поляризованы и имеют одинаковый период  $T = 2\pi/\omega$ .

Предположим сначала, что второе колебание с амплитудой  $E_2$  запаздывает по времени в точке  $A$  относительно первого на время  $\Delta t = T$ , равное периоду колебаний (рис. 105,  $a$ ). Результирующее колебание имеет максимально возможную амплитуду  $E_{\max} = E_1 + E_2$ . Максимальной в точке  $A$  будет и интенсивность электромагнитной волны  $I_{\max}$ , пропорциональная квадрату амплитуды  $E_{\max}$ . Согласно формуле (72),

$$I_{\max} \sim E_{\max}^2 \sim (E_1 + E_2)^2.$$

Максимальное значение интенсивности при интерференции волн с интенсивностями  $I_1$  и  $I_2$  ( $I_1 \sim E_1^2$ ,  $I_2 \sim E_2^2$ ):

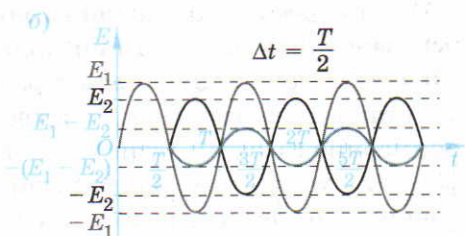
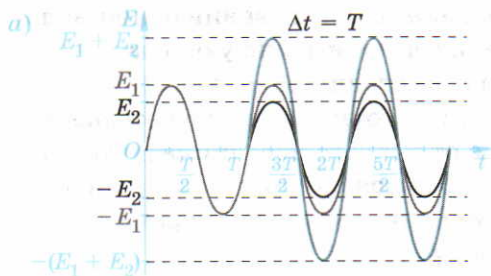
$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (88)$$

**Максимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное периоду этих колебаний:**

$$\Delta t_{\max} = mT, \quad (89)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

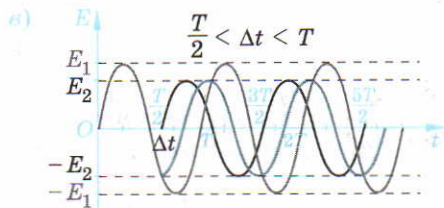




## 105

Интерференция когерентных волн при разном времени запаздывания друг относительно друга:

- а)  $\Delta t = T$ ;  
 б)  $\Delta t = T/2$ ;  
 в)  $T/2 < \Delta t < T$



Рассмотрим теперь случай, когда второе колебание с амплитудой  $E_2$  запаздывает по времени в точке А относительно первого на время  $\Delta t = T/2$  (рис. 105, б). Суммарное колебание будет иметь минимально возможную амплитуду  $E_{\min} = E_1 - E_2$ .

Минимальная интенсивность  $I_{\min}$  электромагнитной волны получается аналогично выражению (88):

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (90)$$

**Минимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, равное нечётному числу полупериодов этих колебаний:**

$$\Delta t_{\min} = (2m + 1)T/2, \quad (91)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Если время запаздывания одного когерентного колебания относительно другого принимает любое промежуточное значение, результирующая интенсивность оказывается между её минимальным и максимальным значениями:  $I_{\min} < I < I_{\max}$  (рис. 105, в).

**Геометрическая разность хода волн.** Запаздывание одной волны по сравнению с другой при попадании в произвольную точку  $A$  пространства может объясняться разным расстоянием до этой точки от источников излучения, в то время как источники излучают энергию синхронно (в фазе). Если расстояние от первого источника до точки  $A$  равно  $r_1$ , то световая волна распространяется со скоростью света от источника до точки  $A$  за время  $t_1 = r_1/c$ . Таким образом, вторая волна запаздывает относительно первой на время

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{r_2 - r_1}{c}.$$

С учётом полученного выражения для  $\Delta t$  условие интерференционных максимумов можно представить в виде

$$r_2 - r_1 = m\lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Разность  $r_2 - r_1$  обозначают  $\Delta$  и называют *геометрической разностью хода*.

**Геометрическая разность хода интерферирующих волн — разность расстояний от источников волн до точки их интерференции.**

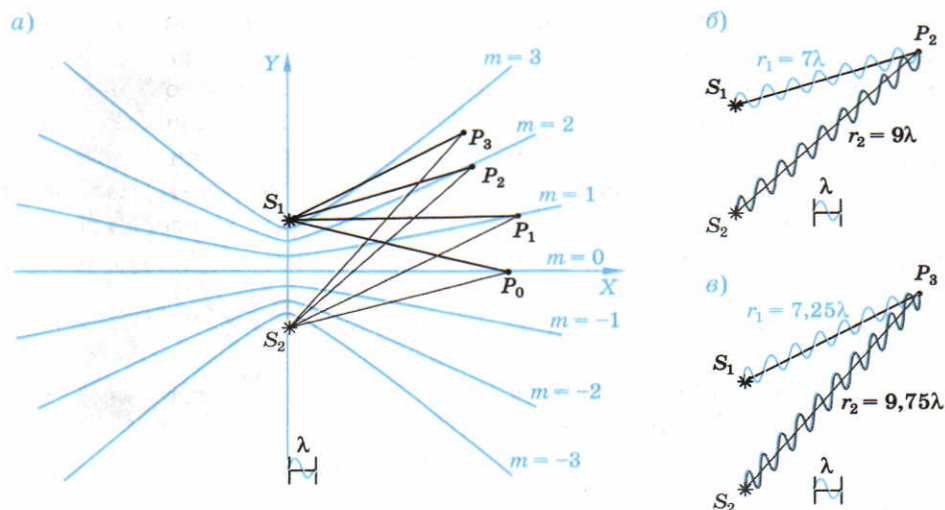
Учитывая, что длина волны  $\lambda = cT$ , условие интерференционного максимума имеет вид

$$\Delta = m\lambda, \quad (92)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

При интерференции двух когерентных источников максимумы интенсивности наблюдаются в точках пространства, для которых геометрическая разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн.

На рисунке 106, а изображены пространственные локализации интерференционных максимумов, возникшие в результате синхронного излучения двух источников  $S_1$  и  $S_2$ , находящихся на расстоянии  $4\lambda$  друг от друга. Разные значения  $m$  соответствуют различным геометрическим разностям хода интерферирующих волн. Например, для точки  $P_0$ :  $r_1 = r_2 = 8\lambda$  ( $\Delta = 0$ ), для точки  $P_1$ :  $r_1 = 8\lambda$ ,  $r_2 = 9\lambda$  ( $\Delta = \lambda$ ), для точки  $P_2$ :  $r_1 = 7\lambda$ ,  $r_2 = 9\lambda$  ( $\Delta = 2\lambda$ ) (рис. 106, б).



### ▲ 106

Результат интерференции синхронно излучающих источников ( $S_1 S_2 = 4\lambda$ ):

- а) пространственное расположение интерференционных максимумов;  
 б) образование интерференционного максимума в точке  $P_2$ ;  
 в) образование интерференционного минимума в точке  $P_3$

Условия интерференционного минимума также можно выразить с помощью формулы (91) через геометрическую разность хода

$$\Delta = (2m + 1)\lambda/2, \quad (93)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

При интерференции двух когерентных источников минимумы интенсивности наблюдаются в тех точках пространства, для которых геометрическая разность хода интерферирующих волн равна нечётному числу полуволен.

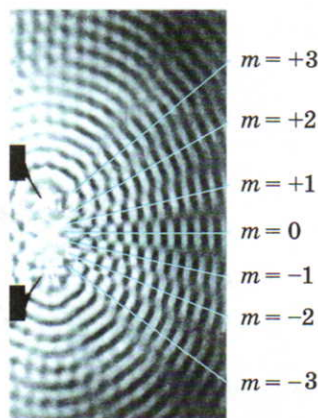
В точке  $P_3$  наблюдается интерференционный минимум, так как геометрическая разность хода  $\Delta = 5\lambda/2$  ( $r_1 = 7,25\lambda$ ;  $r_2 = 9,75\lambda$ ) (рис. 106, в).

Подобную интерференционную картину можно наблюдать в результате синхронных вертикальных колебаний точечных вибраторов на поверхности воды (рис. 107). Сплошными линиями показаны положения соответствующих интерференционных максимумов.



107

*Интерференционная картина на поверхности воды при синхронных вертикальных колебаниях двух шариковых вибраторов, находящихся на расстоянии  $4\lambda$*



### В О П Р О С Ы

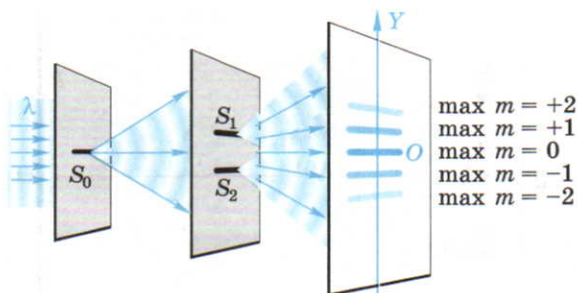
1. Почему результат сложения двух когерентных волн зависит от их разности фаз или от времени запаздывания одного колебания по отношению к другому?
2. При каком времени запаздывания одного колебания по отношению к другому возникает максимальная результирующая интенсивность при их интерференции? Чему она равна?
3. При каком времени запаздывания одного колебания по отношению к другому возникает минимальная результирующая интенсивность при их интерференции? Чему она равна?
4. Что такое геометрическая разность хода?
5. Запишите условия интерференционных максимумов и минимумов для двух синхронно излучающих источников.

### З А Д А Ч И

1. Два звуковых сигнала частотой  $\nu = 150$  Гц синхронно излучаются из двух различных точек, находящихся на одинаковом расстоянии  $l = 340$  м от точки  $A$  на берегу озера. Один сигнал приходит от источника  $B$ , находящегося в воде, другой идёт от источника  $C$ , расположенного в воздухе. Выясните, будут ли эти сигналы усиливать или ослаблять друг друга. Скорость звука в воде  $\nu_1 = 1500$  м/с, в воздухе  $\nu_2 = 340$  м/с.
2. Разность хода между лучами от двух когерентных источников в воздухе 6 мкм. Какой станет разность хода между ними в воде ( $n = 4/3$ )?
3. Две когерентные волны фиолетового света  $\lambda = 400$  нм достигают некоторой точки с разностью хода  $\Delta = 1,2$  мкм. Что произойдёт в этой точке: усиление или ослабление волн?

## § 40. Когерентные источники света

**Опыт Юнга.** Независимые источники естественного света некогерентны, поэтому от таких источников с помощью глаза невозможно наблюдать устойчивую интерференционную картину, подобную изображённой



## 108

Опыт Юнга. Разделение волнового фронта

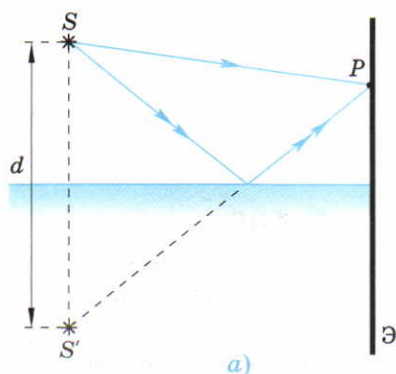
ной на рисунке 108. Однако любой источник естественного света может быть когерентен самому себе: одна часть его излучения может интерферировать с другой. Для этого излучение источника следует вначале пространственно разделить на два потока, идущих как бы от двух источников. Такие источники можно считать когерентными, если разность хода между ними будет меньше длины когерентности ( $\Delta \ll l_k$ ). Последующее наложение световых волн от этих источников создаёт устойчивую интерференционную картину.

Впервые такое наблюдение интерференции света было проведено в 1800 г. английским учёным **Томасом Юнгом**. В опыте Юнга солнечный свет падал на экран с узкой щелью  $S$  (шириной около 1 мкм). Пропавшая через эту щель световая волна падала на экран с двумя щелями  $S_1, S_2$  такой же ширины, находящимися друг от друга на расстоянии  $d$  порядка нескольких микрон (см. рис. 108). В результате деления фронта волны световые волны, идущие от щелей  $S_1$  и  $S_2$ , оказывались «в фазе» (когерентными), создавая на экране устойчивую интерференционную картину. Солнечный свет немонахроматичен, он содержит электромагнитные волны разной длины. Юнг впервые измерил длины волн в различных областях видимого спектра.

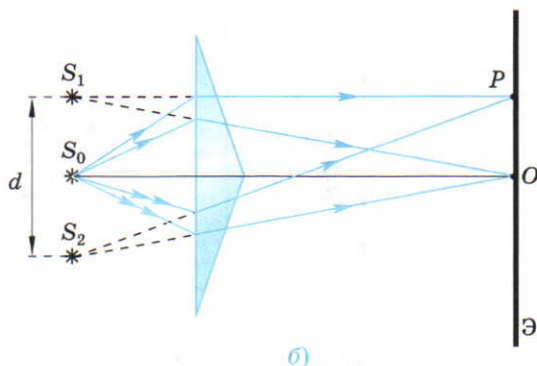
**Способы получения когерентных источников.** Разделение излучения источника естественного света для получения когерентных источников возможно и другими способами. На рисунке 108 приведены классические опыты по интерференции света, в которых разделение излучения происходило с помощью *зеркала Ллойда* и *бипризмы Френеля*. В случае с зеркалом Ллойда (рис. 109, а) когерентными источниками оказываются сам источник  $S$  и его мнимое изображение  $S'$ . Бипризма Френеля создаёт два когерентных мнимых изображения  $S_1$  и  $S_2$  источника  $S_0$  (рис. 109, б).

Когерентные волны от одного источника возникают при отражении света от передней и задней поверхностей тонких плёнок (масляные плёнки и плёнки жира на воде, крылья насекомых, мыльные пузыри). Свет, падающий на переднюю поверхность плёнки толщиной  $d$ , час-





а)



б)

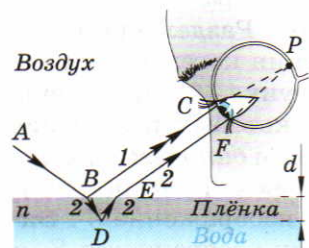
## 109

Получение когерентных источников:

а) зеркало Ллойда;

б) бипризма Френеля

точно отражается (луч 1 — путь  $ABC$  на рис. 110) и частично преломляется. После отражения преломлённого луча от задней поверхности плёнки в точке  $D$  луч 2 преломляется в точке  $E$ , попадая в глаз наблюдателя в точке  $F$ . Отражённые лучи 1 и 2 сходятся в точке  $P$  на сетчатке глаза. Разность хода отражённых лучей зависит от угла падения света на плёнку. Для волн разной частоты (длины волны) и, следовательно, различного цвета, входящих в состав падающего света, интерференционные максимумы наблюдаются в разных местах плёнки. Неоднородность плёнки по толщине также приводит к неоднородности отражения волн разного цвета от неё, что придаёт плёнке радужную окраску (рис. VI на цветной вклейке, с. 112).



## 110

Ход лучей при интерференции света в тонких плёнках

Интерференционная картина в тонкой плёнке резко зависит от её толщины, что позволяет измерять толщину плёнки с точностью до  $0,1 \text{ мкм}$ .

Интерференция в тонких плёнках используется для просветления оптики.

**Просветление оптики — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки.**

Плёнка оксида кремния  $\text{SiO}$  ( $n_1 = 1,45$ ) наносится на поверхность кремниевых солнеч-



ных батарей ( $n_2 = 3,5$ ) для уменьшения отражения от них солнечных лучей, т. е. для максимального преобразования солнечной энергии в электрическую.

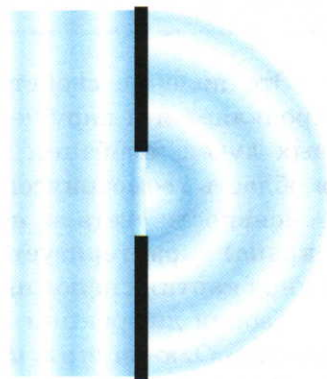
### В О П Р О С Ы

1. Почему невооружённым глазом нельзя наблюдать интерференционную картину от независимых естественных источников света?
2. Опишите опыт Юнга.
3. Как с помощью зеркала Ллойда и бипризмы Френеля получают когерентные источники света?
4. Чем объясняется радужная окраска тонких плёнок?
5. Что такое просветление оптики?

## § 41. Дифракция света

**Нарушение волнового фронта в среде.** Наличие чёткой геометрической тени за освещённым объектом в течение длительного времени представлялось весомым доказательством прямолинейного распространения света и его корпускулярной природы. Согласно корпускулярной теории, свет — поток частиц (корпускул). Тем не менее, чем дальше находится от объекта его тень, тем более расплывчатыми становятся её очертания. С одной стороны, свет проникает в область геометрической тени, с другой — ослабление освещённости наблюдается в тех частях пространства, где тень, казалось бы, должна отсутствовать. Подобное огибание препятствий наблюдается, например, для волн на воде (рис. 111), когда после входа в бухту волна распространяется уже не только в первоначальном направлении распространения взаимодействия. Опыт показал, что светлое пятно может возникнуть даже в области геометрической тени за освещённым непрозрачным диском (рис. 112). Этот эффект не может быть объяснён в рамках геометрической оптики, базирующейся в частности на прямолинейном распространении света в вакууме.

Результаты последнего эксперимента впервые были предсказаны в 1818 г. французским математиком **Симоном-Дени Пуассоном** на основе волновой теории света. Любопытно, что Пуассон хотел опроверг-

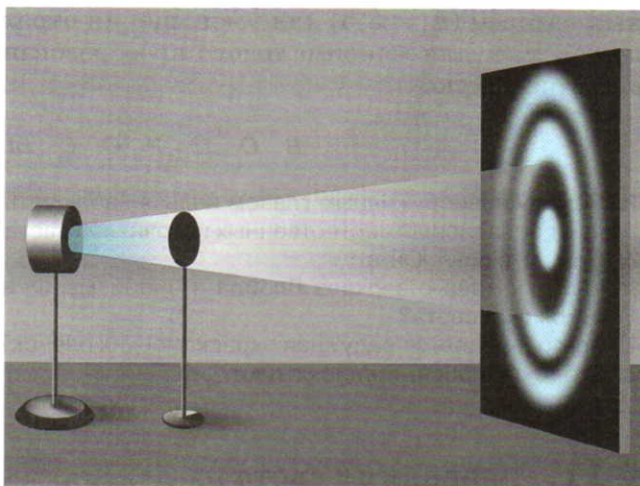


▲ 111

Морские волны  
у входа в бухту

112 ►

Освещённость на  
экране за непро-  
зрачным диском



нуть своими необычными предсказаниями эту теорию. Однако контрольный опыт лишь блестяще её подтвердил.

**Дифракция света.** Описанные выше эксперименты имеют характерную общую особенность. Неоднородность среды (поверхности диска) вызывает отклонение распространения волн от законов геометрической оптики, или *дифракцию*.

***Дифракция — явление нарушения целостности фронта волны, вызванное резкими неоднородностями среды.***

Это явление свойственно всем волновым процессам. Дифракция проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибании волнами препятствий, в проникновении света в область геометрической тени. Пространственное распределение интенсивности света за неоднородностью среды (например, в плоскости экрана) характеризует дифракционную картину. Внешне дифракционная картина напоминает интерференционную. И это не случайно.

Теория дифракции света была разработана в 1816 г. французским учёным **Огюстеном Френелем**, развившим идеи Гюйгенса.

Принцип Гюйгенса позволяет найти направление распространения фронта волны. Френель дополнил принцип Гюйгенса идеей об интерференции вторичных волн. Сформулированный Френелем **принцип Гюйгенса — Френеля** звучит так:



**Возмущение в любой точке пространства является результатом интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых каждой точкой фронта волны.**

Решить задачу дифракции — значит найти распределение интенсивности света на экране в зависимости от размеров и формы препятствий, вызывающих дифракцию.

### В О П Р О С Ы

1. Как описывает свет корпускулярная теория?
2. Какие свойства света следуют из наличия чёткой геометрической тени за освещённым объектом?
3. Какое физическое явление называют дифракцией?
4. В чём проявляется дифракция?
5. Сформулируйте принцип Гюйгенса—Френеля.

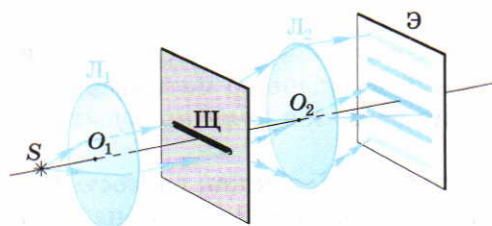
## § 42. Дифракция света на щели.

### Дифракционная решётка

**Дифракция света на щели.** Простейшим примером неоднородности среды является непрозрачный экран с прямоугольным отверстием (щелью), имеющим ширину  $a$ , много меньшую её длины  $l$  ( $a \ll l$ ).

В результате перпендикулярного падения на щель плоской монохроматической волны за щелью возникает дифракционная картина. Плоская волна, падающая на щель, формируется линзой  $L_1$ , в фокусе которой находится точечный источник  $S$  (рис. 113). Объяснение такой картины с позиции геометрической оптики оказывается невозможным.

Воспользуемся принципом Гюйгенса—Френеля для объяснения дифракционной картины за щелью. Щель может быть разбита на ряд узких параллельных полосок равной ширины, каждая из которых представляет источник вторичных волн с равной амплитудой. Эти вол-



◀ 113

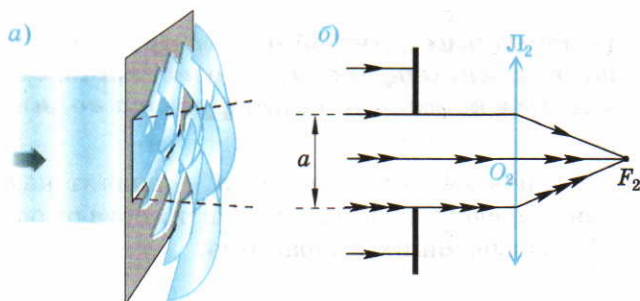
Интенсивность света  
за щелью



## 114

Интерференция вторичных волн за щелью:

а) возникновение вторичных волн;  
б) образование нулевого дифракционного максимума ( $\alpha = 0$ )



ны когерентны, так как их фазы одинаковы: при нормальном падении волновой фронт совпадает с поверхностью щели. Вторичные волны излучаются во все стороны (рис. 114, а). Однако результат их интерференции зависит от разности хода между ними. В направлении, перпендикулярном плоскости щели, вторичные волны усиливают друг друга, так как разность хода между ними равна нулю. В этом направлении волны распространяются по законам геометрической оптики, собираясь в фокусе собирающей линзы Л (точнее, на прямой, проходящей через её фокус параллельно щели). Таким образом возникает центральный нулевой максимум дифракционной картины в направлении, составляющем угол  $\alpha = 0^\circ$  с первоначальным направлением падающей волны (рис. 114, б). Если вторичные волны при интерференции попарно гасят друг друга, то образуется дифракционный минимум. Первый такой минимум (после нулевого максимума) возникает, если разность хода между соответственными парами вторичных волн оказывается равна  $\lambda/2$ .

**Зоны Френеля.** Площадь щели можно условно разделить на ряд параллельных полосок равной ширины (зоны Френеля), каждая из которых представляет собой источник вторичных волн с равной амплитудой.

**Зона Френеля** — множество когерентных источников вторичных волн, максимальная разность хода между которыми (для определённого направления распространения) равна  $\lambda/2$ .

Такое разделение щели позволяет свести задачу об интерференции вторичных волн, идущих от разных зон, к задаче об интерференции пар соответственных источников из этих зон, для которых разность хода одинакова.

Соседние пары зон Френеля гасят друг друга, так как разность хода соответственных источников из этих зон равна  $\lambda/2$ . Если на щели

укладываются две зоны Френеля  $AB$  и  $BC$ , возникает первый дифракционный минимум, наблюдающийся под минимальным углом  $\alpha_1$  (рис. 115). В этом случае разность хода

$$\Delta_1 = B_1C_1 = \frac{a}{2} \sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{2}.$$

Тогда условие первого дифракционного минимума имеет вид

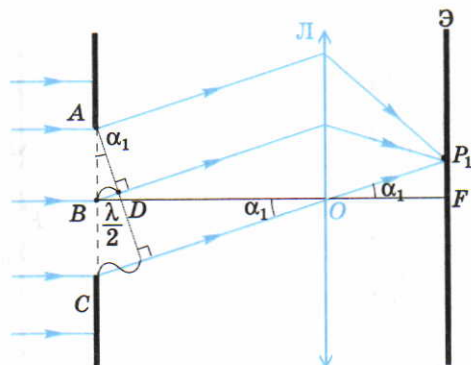
$$a \sin \alpha_1 = \pm \lambda.$$

Разделив щель на чётное число  $2m$  зон Френеля, получаем условие для  $m$ -го дифракционного минимума

$$a \sin \alpha_m = m\lambda, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots \quad (94)$$

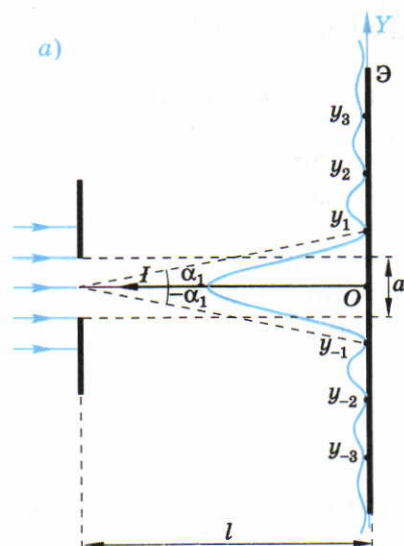
Между дифракционными минимумами располагаются максимумы интенсивности. Центральный максимум (при  $m = 0$ ) называют главным дифракционным максимумом.

Распределение интенсивности света на экране за щелью приведено на рисунке 116.



### 115

*Возникновение первого дифракционного минимума при дифракции света на щели*



б)

$m = +3$

$m = +2$

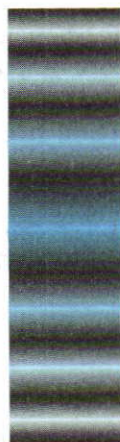
$m = +1$

$m = 0$

$m = -1$

$m = -2$

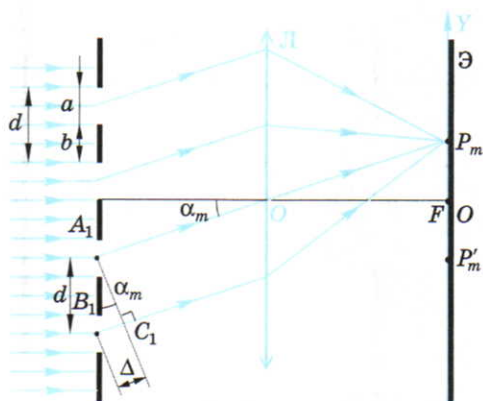
$m = -3$



### 116

*Распределение интенсивности света за щелью: а) теоретический расчёт; б) эксперимент*





### 117

#### Дифракция света на решётке

*периодом решётки.* Характерная величина  $d \approx 0,002$  мм. Дифракционная решётка служит для разложения света в спектр и измерения длины волны. Предположим, что на дифракционную решётку падает плоская монохроматическая волна длиной  $\lambda$ . Каждая щель является источником когерентных вторичных волн (рис. 117). Главные минимумы интенсивности оказываются такими же, как и для одной щели: те направления, по которым ни одна из щелей не посылает света, не получают его и при нескольких щелях. Найдём условия, при которых вторичные волны, идущие от различных щелей под углом  $\alpha$ , усиливают друг друга.

Рассмотрим интерференцию волн от пар соответствующих источников, находящихся в разных щелях, для которых разность хода одинакова. Расстояние между соответственными источниками  $A_1$  и  $B_1$  равно периоду решётки  $d$ , а разность хода между ними  $B_1C_1 = \Delta = d \sin \alpha$ .

Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Главные максимумы будут наблюдаться под углом  $\alpha_m$ , определяемым условием

$$d \sin \alpha_m = m\lambda, \quad (95)$$

где  $m = 0; \pm 1; \pm 2, \dots$

Увеличение числа щелей приводит к увеличению яркости дифракционной картины и сужению главных максимумов.

**Дифракционная решётка.** Из-за слабой видимости дифракционной картины и значительной ширины дифракционных максимумов на одной щели в физическом эксперименте используется другой спектральный прибор — дифракционная решётка. Дифракционная решётка представляет собой совокупность большого числа узких щелей шириной  $a$ , разделённых непрозрачными промежутками шириной  $b$ . Число штрихов на 1 мм стеклянной пластины достигает тысячи, а общее число штрихов  $N = 100\,000$ .

Величина  $d = a + b$  называется



## В О П Р О С Ы

1. Где возникает центральный максимум интенсивности при дифракции света на щели? Почему?
2. Что такое зона Френеля?
3. Запишите условие для  $m$ -го дифракционного минимума на щели.
4. Почему использование дифракционной решётки в спектральных экспериментах предпочтительнее, чем применение щели?
5. Запишите и поясните условие главных максимумов при дифракции света на решётке.

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Геометрическая разность хода волн от двух когерентных источников в некоторой точке  $A$  экрана  $\Delta = 2,925$  мкм. Каков будет результат интерференции в этой точке, если длина волны света равна: 1)  $\lambda_1 = 585$  нм; 2)  $\lambda_2 = 650$  нм. Интенсивности излучения от каждого источника в точке  $A$  равны соответственно  $I$  и  $4I$ .

**Решение**

На геометрической разности хода  $\Delta$  укладывается целое число  $m_1 = \frac{\Delta}{\lambda_1} = \frac{2,925}{0,585} = 5$  длин волн  $\lambda_1$ . Это означает, что в точке  $A$  будет наблюдаться интерференционный максимум с интенсивностью (§ 39, формула (88))

$$I_1 = I + 4I + 2\sqrt{I \cdot 4I} = 9I.$$

Число  $m_2$  длин волн  $\lambda_2$ , укладывающееся на геометрической разности хода  $\Delta$ , будет полуцелым:  $m_2 = \frac{\Delta}{\lambda_2} = \frac{2,925}{0,650} = 4,5$ . Поэтому в точке  $A$  будет наблюдаться интерференционный минимум с интенсивностью (§ 39, формула 90))

$$I_2 = I + 4I - 2\sqrt{I \cdot 4I} = I.$$

**Ответ:** 1) интерференционный максимум с интенсивностью  $9I$ ;  
2) интерференционный минимум с интенсивностью  $I$ .

## О С Н О В Н Ы Е П О Л О Ж Е Н И Я

**Принцип Гюйгенса:** каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распростра-

няющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде.

Огибающая вторичных волн определяет положение фронта волны в последующие моменты времени.

■ **Луч** — вектор, перпендикулярный фронту волны, показывающий направление переноса энергии волны в данной точке.

■ **Угол падения волны** — угол между падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред в точке падения.

■ **Угол отражения** — угол между отражённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности.

■ **Закон отражения волн**: *угол отражения равен углу падения. Падающий луч, отражённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.*

■ **Преломление** — изменение направления распространения волны при прохождении из одной среды в другую.

■ **Угол преломления** — угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к границе раздела в точке падения.

■ **Абсолютный показатель преломления среды** — физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:  $n = c/v$ .

■ **Закон преломления**: *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению показателей преломления второй среды к первой:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

■ **Полное внутреннее отражение** — явление отражения света от оптически менее плотной среды, при котором преломление отсутствует, а интенсивность отражённого света практически равна интенсивности падающего.

■ **Угол полного внутреннего отражения** — минимальный угол падения света, начиная с которого воз-

никает явление полного внутреннего отражения:

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{n}.$$

■ **Волоконная оптика** — система передачи оптических изображений с помощью стекловолокон (световодов). Луч, прошедший плоскопараллельную пластинку, выходит из неё параллельно направлению падения на неё.

■ **Дисперсия света** — зависимость скорости света в веществе от частоты волны.

■ **Когерентные волны** — волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

■ **Время когерентности** — средняя длительность «цуга» гармонического излучения.

■ **Длина когерентности** — расстояние, на котором происходит устойчивое гармоническое колебание световой волны.

■ **Интерференция** — явление наложения когерентных волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний в различных точках пространства.

■ **Максимальная результирующая интенсивность** при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное периоду этих колебаний:

$$\Delta t_{\max} = mT,$$

где  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$

■ **Минимальная результирующая интенсивность** при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, крат-

ное нечётному числу полупериодов этих колебаний:

$$\Delta t_{\max} = (2m + 1)T/2,$$

где  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ .

- **Геометрическая разность хода интерферирующих волн** — разность расстояний от источников волн до точки их интерференции. Условие интерференционного максимума:

$$\Delta = m\lambda, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2, \dots$$

- Условие интерференционного минимума:

$$\Delta = (2m + 1)\lambda/2,$$

где  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ .

Когерентные источники света получают при разделении светово-

го потока от источника естественного света.

- **Просветление оптики** — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки.
- **Дифракция** сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями в среде. Дифракция проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибании волнами препятствий, в проникновении света в область геометрической тени.
- **Принцип Гюйгенса—Френеля:** возмущение в любой точке пространства является результатом интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых каждой точкой фронта волны.



## 6

# Квантовая теория электромагнитного излучения и вещества

## § 43. Фотоэффект

**Квантовая гипотеза Планка.** Волновая теория света в конце XIX — начале XX в. не смогла объяснить целый ряд световых явлений и эффектов, таких, например, как излучение нагретых тел или электризация металлических поверхностей при их освещении.

Для объяснения результатов экспериментов потребовались принципиально новые физические идеи. В 1900 г. немецкий физик **Макс Планк** предположил, что излучение электромагнитных волн атомами и молекулами вещества происходит не непрерывно, а дискретно, т. е. отдельными порциями — *квантами* (от лат. quantum — количество). Энергия излучения кванта прямо пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$E = h\nu, \quad (96)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с — постоянная Планка.

Световые кванты можно рассматривать как реальные микрочастицы — *фотоны*, переносящие электромагнитное излучение. Фотон обладает следующими свойствами:

- Фотон — электрически нейтральная частица, т. е.  $q = 0$ .
- Скорость фотона во всех системах отсчёта равна скорости света в вакууме:

$$v = c.$$

- Фотон обладает импульсом:

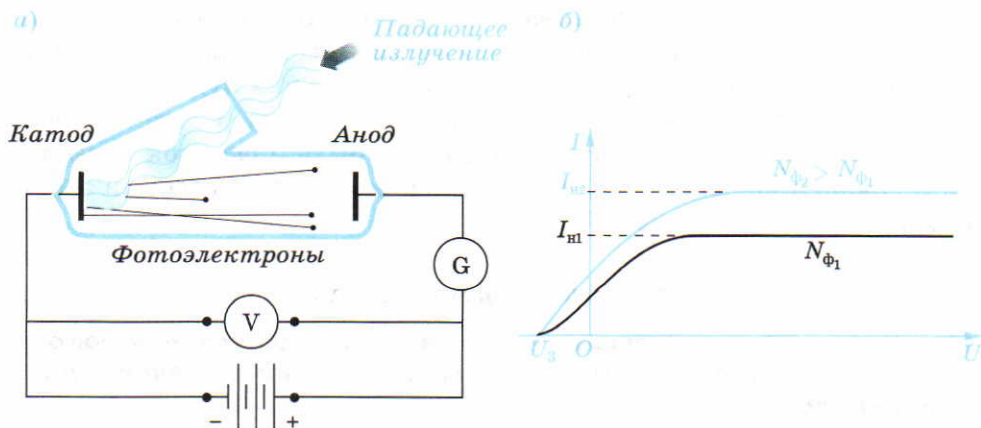
$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (97)$$

**Опыты Столетова.** Ещё одним подтверждением правильности квантовой теории было объяснение *Альбертом Эйнштейном* в 1905 г. явления *фотоэффекта*.

**Фотоэффект** — явление испускания электронов веществом под действием света.

Фотоэффект был открыт в 1887 г. *Генрихом Герцем*, а затем исследовался экспериментально русским учёным А. Г. Столетовым, немецкими физиками В. Гальваксом, Ф. Ленардом и итальянским учёным А. Риги.

Принципиальная схема установки для исследования фотоэффекта приведена на рисунке 118, а. В вакуумной трубке помещены два электрода — катод из исследуемого металла и анод (в схеме Столетова применялась металлическая сетка), подключённые к источнику напряжения. Напряжение между электродами измеряется вольтметром  $V$ , а ток в цепи — гальванометром  $G$ . Без освещения катода тока в цепи нет, так как в вакуумном промежутке между катодом и анодом отсутствуют носители заряда. При освещении электроны, вырываемые светом из катода, под действием электрического поля притягиваются к положительно заряженному аноду. Возникающий в цепи электрический ток называют *фототоком*, а вырванные электроны *фотоэлект-*



# 118

Опыт Столетова:

а) схема установки;

б) вольт-амперная характеристика при фотоэффекте

ронами. Фототок возникает даже в отсутствие разности потенциалов между анодом и катодом за счёт кинетической энергии фотоэлектронов, достигающих анода.

При малых напряжениях не все фотоэлектроны достигают анода. С увеличением разности потенциалов между анодом и катодом сила тока нарастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, называемого *фототоком насыщения*  $I_n$  (рис. 118, б).

Если изменить полярность источника напряжения, то сила тока уменьшится и при некотором задерживающем напряжении ( $-U_3$ ) она станет равной нулю. В этом случае электрическое поле тормозит фотоэлектроны до полной остановки, а затем возвращает их на катод. Вольт-амперная характеристика при фотоэффекте (зависимость фототока от приложенного напряжения) приведена на рисунке 118, б.

**Законы фотоэффекта.** Опытным путём были установлены законы фотоэффекта.

### Первый закон фотоэффекта

***Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод.***

Явление фотоэффекта и его законы были объяснены на основе предложенной Эйнштейном. Согласно квантовой теории света, распространение света следует рассматривать как поток дискретных световых квантов-фотонов с энергией  $h\nu$ . Интенсивность света прямо пропорциональна числу фотонов  $N_\phi$  и энергии каждого из них  $h\nu$ . Каждый фотон поглощается целиком только одним электроном. Поэтому число вырванных светом фотоэлектронов, а стало быть и фототок насыщения  $I_n$  пропорциональны  $N_\phi$ , т. е. интенсивности света (первый закон фотоэффекта) (см. рис. 118, б).

### Второй закон фотоэффекта

***Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.***

*Работа выхода*  $A_{\text{вых}}$  характеризует энергию связи электрона в металле.



Энергия поглощённого фотона идёт на совершение работы выхода и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2}. \quad (98)$$

Закон сохранения энергии (98) называют *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

**Работа выхода** — минимальная работа, которую нужно совершить для удаления электрона из металла.

Значения работы выхода для некоторых металлов приведены в таблице 7.

Кинетическая энергия фотоэлектрона зависит от частоты света линейно (второй закон фотоэффекта):

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = h\left(\nu - \frac{A_{\text{вых}}}{h}\right). \quad (99)$$

График зависимости  $E_k(\nu)$  приведён на рисунке 119. Кинетическая энергия всегда положительна. Это значит, что фотоэффект будет наблюдаться для частот

$$\nu \geq \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Таблица 7.

**Работа выхода для металлов**

Металл	Работа выхода, эВ (1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж)
Na	2,28
Co	3,9
Al	4,08
Pb	4,14
Zn	4,31
Fe	4,5
Cu	4,7
Ag	4,73
Pt	6,35

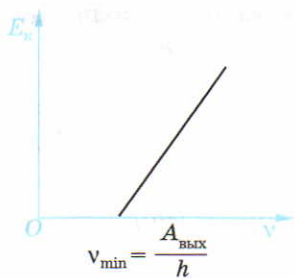
### Третий закон фотоэффекта

**Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен:**

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (100)$$

Красной границе соответствует длина волны

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}.$$



### 119

*Зависимость  
кинетической энергии  
фотоэлектронов  
от частоты*

Излучение такой длины волны, например, для натрия ( $\lambda_{\max} = 0,54$  мкм) находится в красном диапазоне видимого спектра, чем и объясняется историческое название — красная граница. Однако для других металлов, например для цинка, красной границе соответствует ультрафиолетовое излучение.

Фотоэффект нашёл широкое применение в технике. Вакуумные фотоэлементы используются в турникетах метро, системах защитной и аварийной сигнализации, фотоэкспонетрах, военной технике, системах связи, считывании светового сигнала, проходящего через звуковую дорожку киноплёнки, и т. д.

### В О П Р О С Ы

1. В чём состоит идея квантовой гипотезы Планка?
2. Какую микрочастицу называют фотоном? Перечислите основные физические характеристики фотона.
3. Какое физическое явление называют фотоэффектом?
4. Сформулируйте три закона фотоэффекта и объясните вольт-амперную характеристику при фотоэффекте. Как она будет выглядеть при большей интенсивности света?
5. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Какую величину называют работой выхода?

### З А Д А Ч И

1. Найдите энергию фотона с длиной волны  $\lambda = 400$  нм.
2. Найдите кинетическую энергию электрона, вырывающегося с поверхности Na фиолетовым светом с длиной волны  $\lambda = 400$  нм.
3. Используя данные таблицы 7, найдите красную границу  $\lambda_{\max}$  фотоэффекта для алюминия.

## § 44. Корпускулярно-волновой дуализм

**Корпускулярные и волновые свойства фотонов.** Распространение света в виде потока фотонов и квантовый характер взаимодействия света с веществом подтверждены в многочисленных экспериментах. Казалось бы, это является убедительным подтверждением квантовых свойств света. Однако целый ряд оптических явлений (поляризация, интерференция, дифракция) неопровержимо свидетельствует о волновых свойствах света.



Классическая физика всегда чётко разграничивала объекты, имеющие волновую природу (например, свет и звук), и объекты, имеющие дискретную корпускулярную структуру (например, системы материальных точек). Одно из наиболее значительных достижений современной физики — понимание ошибочности противопоставления волновых и квантовых свойств света. Рассматривая свет как поток фотонов, а фотоны как кванты электромагнитного излучения, обладающие одновременно и волновыми и корпускулярными свойствами, современная физика смогла объединить, казалось бы, непримиримые теории — волновую и корпускулярную. В результате возникло представление о *корпускулярно-волновом дуализме* (от лат. dualis — двойственный), лежащее в основе всей современной физики.

***Корпускулярно-волновой дуализм — проявление в поведении одного и того же объекта как корпускулярных, так и волновых свойств.***

Квант света — не волна, но и не корпускула в понимании Ньютона. Фотоны — особые безмассовые микрочастицы, энергия и импульс которых (в отличие от материальных точек) выражаются через волновые характеристики — частоту и длину волны:

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

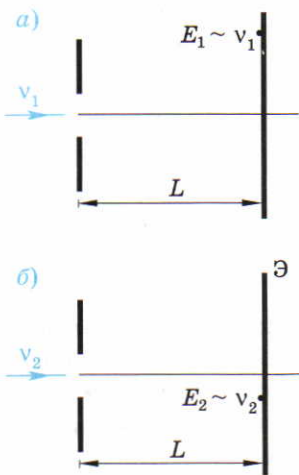
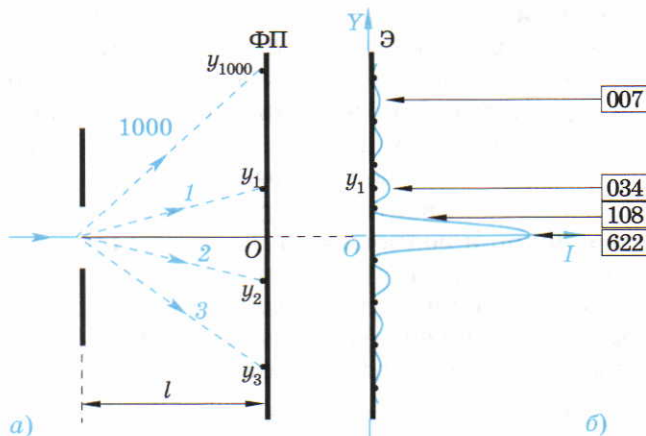
**Дифракция отдельных фотонов.** Согласно квантовой теории света, дифракция света на щели объясняется наличием волновых свойств у каждого отдельного фотона. При малой интенсивности света, падающего на щель, число фотонов уменьшается настолько, что они налетают на щель поодиночке. Траекторию движения классической частицы (материальной точки) в каждом отдельном случае можно однозначно предсказать, зная начальную координату частицы и её скорость. Однако заранее невозможно установить, в какую точку после дифракции на щели попадёт фотон. Можно говорить лишь о *вероятности попадания фотона в окрестность определённой точки*.

Предположим, что первый фотон, пройдя щель, попадает на фотопластинку в точку с координатой  $y_1$ . Затем на фотопластинку попадает второй фотон в точку с координатой  $y_2$  и т. д. На рисунке 120, а показаны возможные точки попадания фотонов на фотопластинку. Результат суммирования числа фотонов, попадающих в окрестность точки с определённой координатой  $y$ , приведён на рисунке 120 (после 1000 экспериментов).



## 120

Дифракция одиночных фотонов на щели:  
а) попадание на фотопластинку одиночного фотона;  
б) суммирование результатов отдельных измерений



## 121

Дифракция света малой интенсивности на щели:  
а) частоты  $\nu_1$ ;  
б) частоты  $\nu_2$

Например, из 1000 фотонов, последовательно проходящих через щель, в окрестность точки с координатой  $y_1$  попали 34. Это означает, что вероятность попадания фотона в окрестность этой точки в любом опыте равна 0,034. Дифракционная картина за щелью возникает потому, что вероятность попадания фотона в разные точки экрана неодинакова.

При большой интенсивности света, падающего на щель (число фотонов велико), зависимость интенсивности света на фотопластинке от координаты совпадает с картиной распределения интенсивности света за щелью, описываемой волновой теорией света.

При предельно малой интенсивности света, падающего на щель, т. е. падении на щель одиночных фотонов разной частоты  $\nu_1$  (рис. 121, а) и  $\nu_2 > \nu_1$  (рис. 121, б) на экране возникают локальные засветки (вспышки разного цвета, соответствующего данной частоте), энергия которых пропорциональна частоте света. Коэффициентом пропорциональности между энергией и частотой является постоянная Планка  $h$ .

## В О П Р О С Ы

1. Какие объекты согласно представлениям классической физики имеют волновую природу, а какие корпускулярную?

2. Что называют корпускулярно-волновым дуализмом?
3. При каких условиях можно наблюдать дифракцию одиночных фотонов на щели?
4. Почему при дифракции одиночных фотонов на щели возникает дифракционная картина?
5. При каком условии свойства света хорошо описываются волновой теорией, а при каком — квантовой?

## § 45. Волновые свойства частиц

**Длина волны де Бройля.** В 1923 г. французский физик *Луи де Бройль* высказал гипотезу, согласно которой *корпускулярно-волновой дуализм является универсальным свойством любых материальных объектов, а не только света*. Фотон — не единственная элементарная частица в микромире. Любая микрочастица обладает помимо корпускулярных ещё волновыми свойствами. Это значит, что частица массой  $m$ , движущаяся со скоростью  $v$ , характеризуется не только импульсом  $p$  и энергией  $E$ , но и подобно фотону частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda_B$ :

$$E = h\nu; \quad p = \frac{h}{\lambda_B}.$$

*Любой частице, обладающей импульсом  $p$ , соответствует длина волны де Бройля:*

$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \quad (101)$$

Волновые свойства макроскопических тел не наблюдались на опыте из-за необычайно малой величины длины волны де Бройля. Например, для пули массой 10 г, летящей со скоростью 660 м/с,

$$\lambda_B = \frac{h}{mv} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{10^{-2} \text{ кг} \cdot 660 \text{ м/с}} \approx 10^{-34} \text{ м}.$$

Длина волны де Бройля для пули оказывается на 24 порядка меньше размера атома водорода, поэтому её невозможно обнаружить экспериментально.

Однако для электрона, движущегося в атоме со скоростью  $2 \cdot 10^6$  м/с, длина волны де Бройля оказывается соизмеримой с размером атома:

$$\lambda_B = \frac{h}{m_e v_e} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}} = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$



**Дифракция электронов.** Наличие волновых свойств у микрочастиц означает, что можно наблюдать их интерференцию и дифракцию. В 1927 г. волновые свойства электронов были обнаружены английским физиком *Джозефом Томсоном* в опытах по дифракции электронов при их прохождении сквозь золотую фольгу. Картина дифракции электронов на кристаллической решётке золота оказалась сходной с известной дифракционной картиной рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda = \lambda_B$ . Результаты опытов Дж. Томсона по дифракции электронов подтвердили гипотезу де Бройля о наличии волновых свойств у микрочастиц.

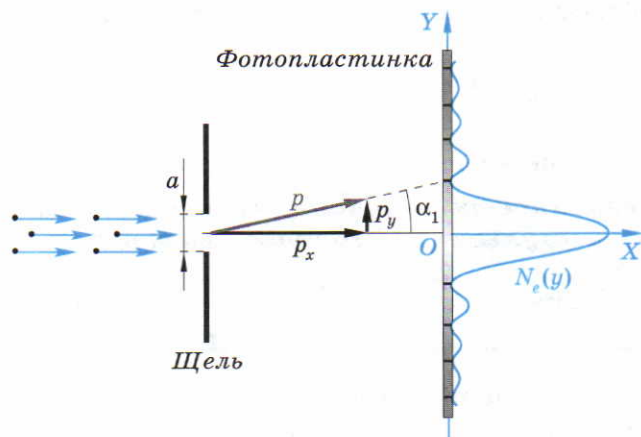
Волновые свойства частиц не являются их коллективной характеристикой, а присущи каждой частице в отдельности. Это подтвердили результаты эксперимента по дифракции электронного пучка предельно малой интенсивности, выполненного в 1949 г. российскими физиками *В. А. Фабрикантом, Л. М. Биберманом, Н. Г. Сушкиным*.

Дифракция одиночных электронов на щели оказывается абсолютно идентичной дифракции одиночных фотонов с длиной волны  $\lambda = \lambda_B$ . Так же как и для фотона, можно говорить лишь о вероятности попадания электрона в окрестность определённой точки. Дифракционная картина возникает потому, что вероятность попадания электрона в разные точки фотопластинки неодинакова (см. рис. 120). Суммирование результатов отдельных измерений (интенсивность засветок на фотопластинке) даёт зависимость от координаты  $y$ , аналогичной результату, полученному в волновой теории при расчёте интенсивности света длины волны  $\lambda = \lambda_B$ .

**Соотношение неопределённостей Гейзенберга.** В классической механике всякая частица движется по определённой траектории, так что в любой момент точно фиксированы её координаты и импульс. Зная начальную координату и скорость (импульс) частицы, можно с помощью законов динамики Ньютона найти её положение и скорость (импульс) в произвольный момент времени. Однако в микромире понятие определённой траектории теряет смысл. Зная начальное состояние электрона, невозможно однозначно предсказать его будущее движение.

Сам процесс измерения физических величин в микромире существенно отличается от подобного процесса в макромире или в повседневном опыте. Для обычного измерения длины предмета его надо видеть, т. е. следует осветить. Однако, если внешнее облучение не изменяет состояние макроскопического тела, то при облучении микрочастицы внешнее воздействие может существенно изменить её координату и скорость. *В процессе измерения изменяется состояние микрообъекта.* Например, при измерении координаты микрочастицы необходимо её





## 122

*Измерение импульса  
частицы при её локали-  
зации*

удержать в течение некоторого времени и в определённом месте, а это возможно лишь при внешнем воздействии на неё. При этом энергия частицы, её импульс изменятся по сравнению с первоначальными значениями.

Рассмотрим подробнее процесс измерения координаты микрочастицы (электрона). Область локализации частицы можно ограничить узкой щелью шириной  $a$ , на которую по оси  $X$  падает поток электронов с импульсом  $p$  (рис. 122). При этом неточность измерения или неопределённость координаты  $y$  частицы  $\Delta y \sim a$ , так как точно неизвестно, через какую именно точку щели пролетает электрон. Волновые свойства электрона характеризуются длиной волны де Бройля  $\lambda_B = h/p$ .

В результате дифракции на щели электрон изменяет направление своего движения и, соответственно, направление скорости и импульса. Возникает компонента импульса по оси  $Y$ :

$$p_y = p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda_B} \sin \alpha.$$

Для оценки  $p_y$  можно использовать угол  $\alpha_1$ , соответствующий первому дифракционному минимуму на щели:

$$a \sin \alpha_1 = \lambda_B.$$

Следовательно,

$$p_y = \frac{h}{a}.$$

Реально возможно попадание электрона в область дифракционных максимумов более высоких порядков, поэтому неточность измерения

импульса, или неопределённость импульса  $\Delta p_y$ , может даже превосходить величину  $p_y$ :

$$\Delta p_y \geq \frac{h}{a}.$$

### Соотношение неопределённостей Гейзенберга

**Произведение неопределённости координаты частицы на неопределённость её импульса не меньше постоянной Планка:**

$$\Delta y \Delta p_y \geq h. \quad (102)$$

Принципиальный вывод, следующий из соотношений неопределённостей Гейзенберга, состоит в том, что *нельзя независимо рассматривать корпускулярные и волновые характеристики микрочастиц: они взаимосвязаны. Одновременное точное определение положения и импульса частицы невозможно.*

Этот вывод не согласуется с привычными представлениями классической механики об определённой координате и скорости (импульсе) частицы. То же самое можно сказать и о невозможности одновременного точного измерения времени пребывания частицы в некотором энергетическом состоянии и её энергии. Однако здравый смысл основан на представлениях, почерпнутых из повседневного опыта. В то же время непосредственное наблюдение поведения микрочастиц невозможно. Поэтому, имея дело с явлениями, далёкими от наших повседневных наблюдений, учёным зачастую приходится делать выводы, противоречащие так называемому здравому смыслу.

### В О П Р О С Ы

1. В чём состоит гипотеза де Бройля?
2. Чему равна длина волны де Бройля?
3. Какие эксперименты подтверждают наличие волновых свойств у микрочастиц?
4. Получите и сформулируйте соотношение неопределённостей Гейзенберга для времени и энергии.
5. Какой принципиальный вывод следует из соотношений неопределённостей Гейзенберга?

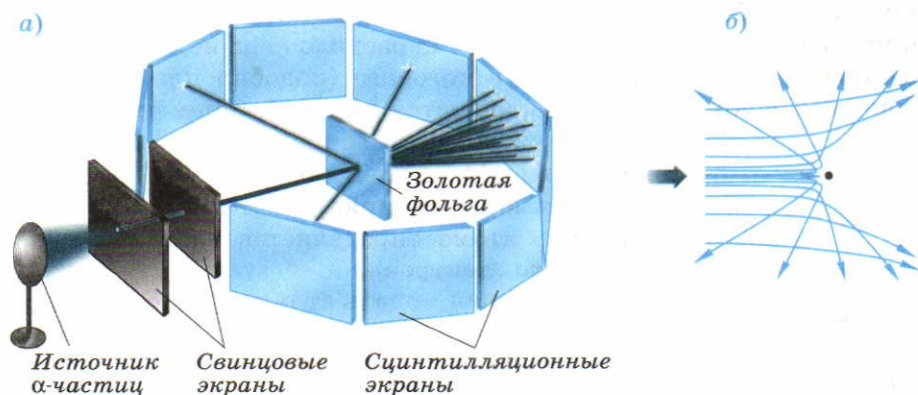
## § 46. Планетарная модель атома

**Опыт Резерфорда.** Наименьшей частью химического элемента, определяющей его основные свойства, является атом. Человеческий глаз не в состоянии его увидеть, а тем более различить его внутреннюю

структуру. Судить о том, как масса и заряд распределены внутри отдельного атома, можно, например, по отклонению заряженных частиц, пролетающих мимо атома. Подобным образом, наблюдая на просвет стекло, мы обнаруживаем в нём неоднородности и дефекты из-за разного преломления на них света.

В первом эксперименте по изучению внутренней структуры атома, осуществлённом в 1910—1911 гг. английским физиком **Э. Резерфордом** и его студентами **Э. Марсденом** и **Х. Гейгером**, золотая фольга облучалась  $\alpha$ -частицами, пролетающими через щели в свинцовых экранах со скоростью  $10^7$  м/с (рис. 123, а). Альфа-частицы, испускаемые радиоактивным источником, представляют собой ядра атома гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов.

После взаимодействия с атомами фольги  $\alpha$ -частицы попадали на экраны, покрытые слоем сернистого цинка ZnS. Ударяясь об экраны,  $\alpha$ -частицы вызывали слабые вспышки света (сцинтилляции). По количеству вспышек определялось число частиц, рассеянных фольгой на определённый угол. Подсчёт показал, что большинство  $\alpha$ -частиц проходит фольгу практически беспрепятственно, отклоняясь на углы менее  $1^\circ$ . Однако некоторые  $\alpha$ -частицы (примерно одна из 20 000) резко отклонялись от первоначального направления, даже отражаясь назад (на угол  $180^\circ$ ) (рис. 123, б). Столкновение  $\alpha$ -частицы с электроном не может так существенно изменить её траекторию, так как масса электрона в 7300 раз меньше массы  $\alpha$ -частицы. Резерфорд предположил, что отражение  $\alpha$ -частиц обусловлено их отталкиванием положительно



## ▲ 123

Опыт Резерфорда:

а) принципиальная схема установки;

б) рассеяние  $\alpha$ -частиц атомными ядрами



заряженными частицами, обладающими массой, соизмеримой с массой  $\alpha$ -частицы. Малая доля частиц в общем потоке, испытывающих значительное рассеяние, означает, что положительный заряд атома сосредоточен в объеме, очень малом по сравнению с объемом атома, или в ядре атома.

**Планетарная модель атома.** Опыты Резерфорда позволяют оценить максимальный размер  $R$  атомного ядра. При центральном столкновении  $\alpha$ -частицы (с зарядом  $+2e$ ) с ядром, имеющим заряд  $+Ze$ , она останавливается силами кулоновского отталкивания на расстоянии  $r$  от центра ядра ( $r > R$ ). В точке остановки наибольшего сближения кинетическая энергия  $E_k$   $\alpha$ -частицы переходит в потенциальную:

$$E_k = k \frac{Ze \cdot 2e}{r},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ .

Следовательно, размер атомного ядра  $R$  определится соотношением

$$R < \frac{2k \cdot Ze^2}{E_k}.$$

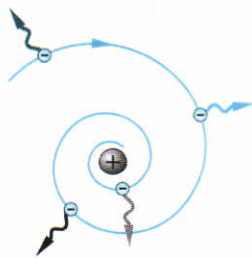
В опытах Резерфорда  $E_k \approx 5 \text{ МэВ}$ , заряд ядра золота  $Z = 79$ . Тогда размер ядра равен

$$R < \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{5 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,3 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$

*Линейный размер ядра, по крайней мере, в 10 000 раз меньше размера атома.* Из опытов Резерфорда непосредственно следует *планетарная модель атома*. В центре атома расположено положительно заряженное атомное ядро, вокруг которого (подобно планетам, обращающимся вокруг Солнца) вращаются под действием кулоновских сил притяжения отрицательно заряженные электроны. Атом электронейтрален: заряд ядра равен суммарному заряду электронов.

Размер атома определяется радиусом орбиты валентного электрона.

Планетарная модель атома, обоснованная опытами Резерфорда, проста, но не позволяет объяснить устойчивость атомов. Электроны, вращающиеся вокруг ядра, обладают центростремительным ускорением, а ускоренно движущийся заряд излучает электромагнитные волны (см. (75)). Теряя энергию на излучение, электроны должны упасть на ядро (рис. 124) (подобно тому, как ис-



## ▲ 124

Падение электрона на ядро

кусственный спутник падает на Землю в результате трения о воздух в атмосфере), а атом прекратить существование. При этом частота излучаемого света должна увеличиваться.

В действительности атомы устойчивы и в состоянии с минимальной энергией могут существовать неограниченно долго.

### В О П Р О С Ы

1. Опишите принципиальную схему установки в опыте Резерфорда.
2. Сформулируйте основной результат опыта Резерфорда.
3. Оцените максимальный размер атомного ядра.
4. В чём состоит планетарная модель атома?
5. В чём логическая непоследовательность планетарной модели атома?

## § 47. Теория атома водорода

**Первый постулат Бора.** Кризис в теории атома был преодолен в 1913 г. датским физиком **Н. Бором**. Разрабатывая теорию атома водорода, Бор использовал планетарную модель Резерфорда. Согласно этой модели на электрон, вращающийся вокруг ядра с зарядом  $+e$  по окружности радиусом  $r$  со скоростью  $v$ , действует кулоновская сила  $F_k = ke^2/r^2$ . Эта сила сообщает электрону центростремительное ускорение  $a_n = v^2/r$ . По второму закону Ньютона

$$m_e \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}. \quad (103)$$

### Первый постулат Бора

*В устойчивом атоме электрон может двигаться лишь по особым, стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии.*

При движении электрона по  $n$ -й стационарной орбите ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) радиусом  $r$  сохраняется не только его энергия, но и, согласно правилу квантования орбит Бора, момент импульса  $L = m_e v r$ .

Момент импульса — векторная физическая величина. При вращении по орбите радиусом  $r$  частицы массой  $m$ , движущейся со скоростью  $v$ , вектор  $\vec{L}$  момента импульса направлен перпендикулярно плоскости орбиты по правилу буравчика (рис. 125). Если вращать рукоятку буравчика по направлению движения частицы по орбите, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением орбитального момента импульса.

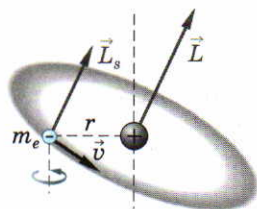


## Правило квантования орбит Бора

**На стационарной орбите момент импульса электрона квантуется (кратен постоянной Планка  $\hbar$ ):**

$$m_e v r = n \hbar, \quad (104)$$

где  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка («аш перечёрк-нутое»);  $n$  — *главное квантовое число*;  $n = 1, 2, 3, \dots$ .



## ▲ 125

Орбитальный  $\vec{L}$  и спиновый  $\vec{L}_s$  момент импульса электрона

Равенство (104) Бор определял как условие квантования орбитального момента импульса. Орбитальный момент импульса электрона кратен  $\hbar$ . Кроме движения вокруг ядра по орбите электрон вращается вокруг собственной оси. При этом его собственный, или спиновый, момент импульса  $L_s = \hbar/2$  (см. рис. 125). Говорят, что электрон обладает *полуцелым спином* (в единицах  $\hbar$ ). Являясь вращающейся вокруг своей оси заряженной частицей, электрон создаёт собственное магнитное поле (подобно току, протекающему по кольцевому проводнику).

Из системы двух уравнений (102), (103) можно найти две неизвестные величины  $r$  и  $v$ . Возможные значения радиусов стационарных орбит даются выражением

$$r_n = r_1 n^2, \quad (105)$$

где  $r_1$  — радиус первой боровской орбиты,  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

*Радиусы стационарных орбит квантованы, т. е. имеют дискретные значения, пропорциональные квадрату главного квантового числа.*

Атом имеет минимальный размер, когда  $n = 1$ . Радиус первой орбиты электрона, ближайшей к ядру, равен

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Первые пять боровских орбит изображены на рисунке 126.

**Энергетический спектр атома водорода.** Энергия электрона в атоме складывается из его кинетической энергии и потенциальной кулоновской энергии взаимодействия с ядром (см. Ф-10, (146)):

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{k e^2}{r}. \quad (106)$$



Нуль потенциальной энергии электрона выбран на бесконечном расстоянии от ядра. Знак «минус» соответствует энергии притяжения отрицательного и положительного зарядов. Возможная величина энергии электрона в атоме:

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (107)$$

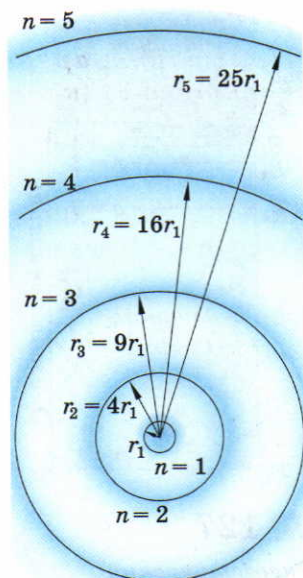
где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Двигаясь по орбите вокруг ядра, электрон связан с атомом, или, говорят, находится в связанном состоянии.

Связанные состояния электрона — энергетические состояния с отрицательной энергией электрона.

Согласно формуле (107), энергетический спектр связанных состояний дискретен.

Энергия электрона в атоме принимает любые, а дискретные значения, т. е. квантуется.



## 126

Орбиты электрона в атоме водорода

**Энергетический уровень** — энергия, которой обладает атомный электрон в определённом стационарном состоянии.

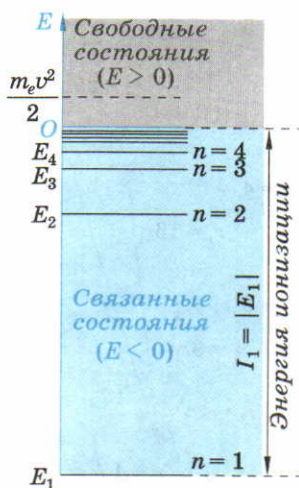
Атом водорода имеет определённый спектр энергий. Состояние атома с  $n = 1$  называют *основным состоянием*.

**Основное состояние атома (молекулы)** — состояние с минимальной энергией.

Энергия основного состояния электрона в атоме водорода

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ.}$$

В основном состоянии электрон находится ближе всего к ядру и его энергия связи с ядром максимальна по модулю.



## ▲ 127

*Энергетический спектр атома водорода; свободные и связанные состояния*

Возбуждённые состояния атома — состояния с  $n > 1$ . Чем больше главное квантовое число  $n$ , тем дальше от ядра находится электрон, тем выше его энергетический уровень.

Энергетические уровни атома принято изображать горизонтальными линиями, перпендикулярными оси энергий (рис. 127). При  $n \rightarrow \infty$  электрон удаляется от ядра на бесконечно большое расстояние, а его энергия связи с ядром стремится к нулю. Это означает, что при  $E = 0$  электрон уже не связан с ядром, становясь свободной частицей.

Свободные состояния электрона — энергетические состояния с положительной энергией электрона.

На рисунке 127 показано свободное состояние электрона с кинетической энергией  $m_e v^2/2$ . В свободном состоянии скорость электрона и его кинетическая энергия могут быть любыми.

Энергетический спектр свободных состояний непрерывен.

## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте первый постулат Бора.
2. Сформулируйте правило квантования.
3. Как квантуются радиусы стационарных орбит в атоме водорода?
4. Как квантуется энергия электрона в атоме водорода? Чему равна энергия электрона в основном состоянии атома?
5. Какие энергетические состояния электрона в атоме называют связанными; свободными? Кратко охарактеризуйте их.

## § 48. Поглощение и излучение света атомом

**Второй постулат Бора.** Для вырывания электрона из атома требуется дополнительная энергия, чтобы преодолеть кулоновское притяжение электрона к ядру.

**Энергия ионизации** — минимальная энергия, которую нужно затратить для перевода электрона из основного состояния атома в свободное состояние:

$$I_1 = |E_1|.$$



Ионизация атома может происходить, например, под действием падающего на него фотона с энергией  $h\nu_1 \geq I_1$ . При этом электрон поглощает фотон, покидая атом. Если энергия фотона недостаточна для ионизации атома ( $h\nu < I_1$ ), электрон, находящийся на первой боровской орбите (в основном состоянии с энергией  $E_1$ ), под действием фотона может перескочить на другую орбиту (соответствующую возбуждённому состоянию с энергией  $E_m$ ). Согласно закону сохранения энергии, этот переход электрона из основного состояния в возбуждённое возможен, если частота  $\nu_m$  поглощаемого фотона удовлетворяет соотношению

$$h\nu_{m1} = E_m - E_1.$$

Переходы атомного электрона из основного состояния в возбуждённое при поглощении света разных частот показаны стрелками на рисунке 128.

При наличии фотонов соответствующих частот возможно поглощение света, приводящее к переходам между возбуждёнными состояниями, а также к ионизации атома, находящегося в возбуждённом состоянии.

### Второй постулат Бора

**Излучение света атомом происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией  $E_m$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$ .**

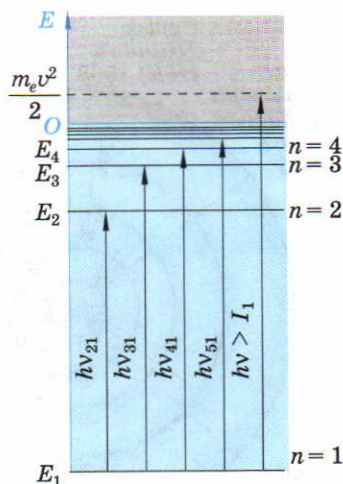
Энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n. \quad (108)$$

Подставляя значения энергии атома в начальном и конечном состояниях, получаем

$$\nu_{mn} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi \hbar^3} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (109)$$

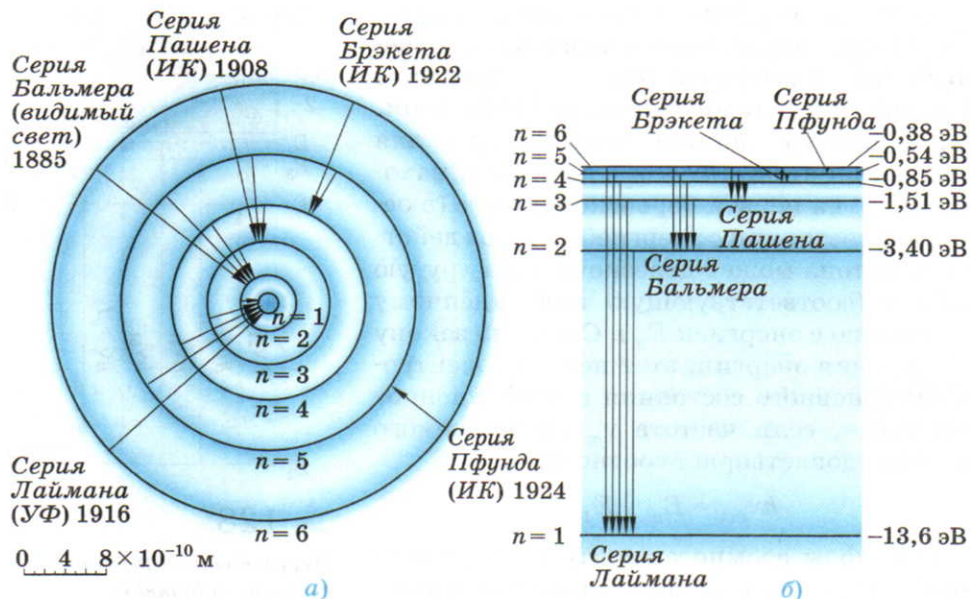
где  $n = 1, 2, 3, \dots; m > n$ .



### 128

Переходы электрона в атоме водорода при поглощении света





## ▲ 129

Серии излучения атома водорода:

- а) переходы между орбитами стационарных состояний;  
 б) переходы между энергетическими уровнями

Все возможные частоты, определяемые этим выражением, дают спектр излучения атома водорода, хорошо согласующийся с экспериментальными данными.

Спектр составляют ряд серий излучения, каждая из которых образуется при переходах атома в одно из фиксированных нижних энергетических состояний  $n$  из всех возможных верхних энергетических состояний  $m$  ( $m > n$ ).

Переходы в первое возбуждённое состояние ( $n = 2$ ) с верхних уровней образуют *серия Бальмера*, наблюдаемую в видимом свете. На рисунке 129 показаны серии излучения атома водорода в разных диапазонах, а также указаны фамилии учёных, наблюдавших эти серии впервые, и даты их открытия.

На рисунке X, а на цветной вклейке (с. 193) приведена серия Бальмера, состоящая из видимых спектральных линий, излучаемых при переходах электрона с энергетических уровней  $E_m$  ( $m > 2$ ) на уровень  $E_2$ . Спектр поглощения вещества определяется в результате сравнения спектра излучения, падающего на вещество, со спектром излучения, прошедшего через него. Атом вещества поглощает излучение той же

частоты, которую излучает. Спектр поглощения водорода при освещении его солнечным светом показан на рисунке X, б на цветной вклейке. Теория Бора не позволяет объяснить энергетический спектр сложных атомов из-за её внутренней противоречивости — объединения законов классической физики и противоречащих ей постулатов. Построить последовательную теорию явлений микромира удалось позднее с помощью квантовой теории.

**Спектральный анализ.** Атомы каждого химического элемента излучают определённые длины волн и имеют *линейчатый спектр*, характерный именно для этого элемента (см. рис. X, а на цветной вклейке).

**Линейчатый спектр — спектр излучения, состоящий из отдельных узких спектральных линий различной интенсивности.**

Исследование линейчатого спектра позволяет определить, из каких именно химических элементов состоит излучающее вещество и в каком количестве в нём содержится каждый элемент. *Спектральный анализ — метод определения химического состава и других характеристик вещества по его спектру.*

Высокая чувствительность этого метода позволяет определять в веществе примеси массой до  $10^{-10}$  г, а также состав небесных тел, удалённых от Земли на миллиарды световых лет. Подобно дактилоскопическим отпечаткам, линейчатые спектры неповторимо индивидуальны.

В настоящее время определены эталоны и составлены таблицы спектров всех атомов для сравнения с ними наблюдаемых спектров. Спектральный анализ проводится и по спектрам поглощения. Например, солнечная атмосфера избирательно поглощает свет, что приводит к появлению линий поглощения на фоне непрерывного спектра фотосферы. Земная атмосфера также избирательно поглощает излучение разных частот (длин волн). Ультрафиолетовое, рентгеновское, гамма-излучение поглощаются в верхних слоях атмосферы (рис. XI на цветной вклейке, с. 193). На высоте 15—150 км располагается озоновый слой, поглощающий коротковолновую часть ультрафиолетового излучения Солнца. Защищая флору и фауну Земли от губительного воздействия коротковолнового облучения, атмосфера одновременно лишает физиков и астрономов огромной информации о структуре Вселенной, содержащейся в спектрах этого диапазона. Поэтому наиболее содержательные и масштабные исследования Вселенной начались с 60-х гг. XX в. с момента вывода на орбиты вокруг Земли искусственных спутников. Исследование и анализ спектров позволяют опреде-



лять помимо химического состава объектов их температуру, давление, скорость движения, напряжённость электрического поля и индукцию магнитного поля.

### В О П Р О С Ы

1. Какие переходы электрона в атоме возможны при поглощении света?
2. Какую энергию называют энергией ионизации?
3. Сформулируйте второй постулат Бора.
4. Запишите выражения для спектра электромагнитных волн, излучаемых и поглощаемых атомом водорода.
5. На каких физических принципах основан спектральный анализ? Приведите примеры избирательного поглощения электромагнитного излучения атмосферой Земли.

### З А Д А Ч И

1. Найдите красную границу  $\lambda_{\max}$  для ионизации излучением атома водорода в основном состоянии.
2. Какая длина волны в серии Бальмера соответствует переходу с уровня  $k = 4$  на уровень  $n = 2$ ? Определите цвет излучения линии.
3. Излучение какой длины волны поглощает электрон при переходе из основного состояния атома водорода в первое возбуждение?

## § 49. Лазер

**Поглощение и излучение света атомами.** Излучение источников света возникает согласно второму постулату Бора при переходе атомного электрона (с энергией  $E_2$ ) с более отдалённой от ядра орбиты на менее удалённую (с энергией электрона  $E_1$ ):

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

Чем больше в веществе концентрация атомов  $n_2$ , находящихся в возбуждённом состоянии, тем больше число электронов с энергией  $E_2$  на отдалённой орбите, тем интенсивнее излучение источника. В традиционных источниках света, таких как лампа накаливания, валентные электроны атомов вещества возбуждаются независимо друг от друга с уровня  $E_1$  на уровень  $E_2$  электронами, создающими электрический ток. Поэтому фотоны, излучаемые при обратных переходах валентных электронов, *некогерентны друг с другом*.

В *лазере* — наиболее мощном искусственном источнике направленного излучения — мощное излучение возникает при прохождении через вещество электромагнитной волны.

Характеристики этого излучения определяют три основных процесса взаимодействия излучения с атомами.



1. *Поглощение света.* Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией  $E_1$ , может поглотить фотон, перейдя в возбуждённое состояние с энергией  $E_2 > E_1$  (рис. 130, а). Интенсивность поглощённого излучения пропорциональна концентрации  $n_1$  атомов, находящихся в основном состоянии.

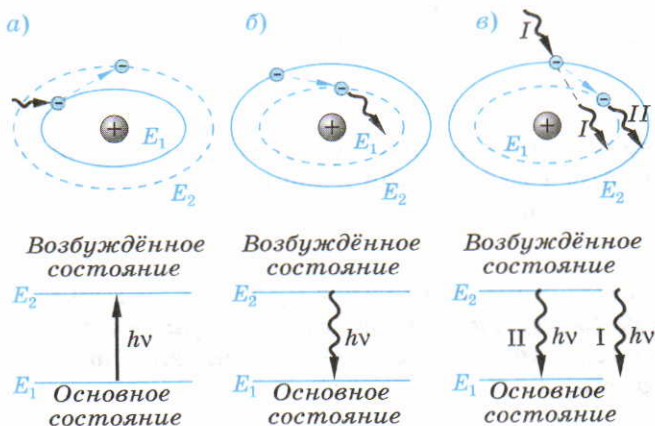
2. *Спонтанное излучение.* В отсутствие внешних полей или столкновений с другими частицами электрон, находящийся в возбуждённом состоянии, через время порядка  $10^{-8}$ — $10^{-7}$  с самопроизвольно (спонтанно) возвращается в основное состояние (рис. 130, б).

**Спонтанное излучение — излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из возбуждённого состояния в основное.**

Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, так как каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

3. *Индукцированное излучение.* В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбуждённый атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 130, в).

**Индукцированное (вынужденное) излучение — излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.**



### 130

Процессы взаимодействия атома с фотоном:

- а) поглощение фотона;
- б) спонтанное излучение;
- в) вынужденное излучение

Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации  $n_2$  атомов, находящихся в возбуждённом состоянии. При этом у световой волны, возникшей при *индуцированном излучении*, частота, фаза, поляризация и направление распространения оказываются такими же, как и у волны, падающей на атом. Это означает, что к первичному фотону I, падающему на атом от внешнего источника, добавляется идентичный фотон II индуцированного излучения (рис. 129, в). Тем самым увеличивается интенсивность внешнего излучения — возникает оптическое усиление.

**Принцип действия лазера.** В 1939 г. российский физик **В. А. Фабрикант** наблюдал экспериментально усиление электромагнитных волн (оптическое усиление) в результате процесса индуцированного излучения.

Российские учёные **Н. Г. Басов** и **А. М. Прохоров** и американский физик **Ч. Таунс**, создавшие в 1954 г. квантовый генератор излучения, работающий в сантиметровом диапазоне, были удостоены в 1964 г. Нобелевской премии по физике. Первый лазер, работающий на кристалле рубина в видимом диапазоне, был создан в 1960 г. американским физиком **Т. Мейманом**. Слово «лазер» образовано начальными буквами английских слов light amplification by stimulated emission of radiation («усиление света с помощью вынужденного излучения»).

**Лазер — источник когерентного монохроматического поляризованного и узконаправленного потока излучения, генерируемого в процессе индуцированного излучения.**

Усиление излучения, падающего на среду, возникает тогда, когда интенсивность индуцированного излучения превысит интенсивность поглощённого излучения. Это произойдёт в случае *инверсной населённости*, если в возбуждённом состоянии находится больше частиц, чем в основном

$$n_2 > n_1. \quad (110)$$

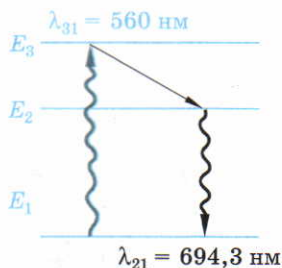
В состоянии термодинамического равновесия, электрон с большей вероятностью будет находиться в состоянии с меньшей энергией  $E_1$ , т. е.  $n_1 > n_2$ , усиления не происходит.

**Инверсная населённость энергетических уровней — неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбуждённом состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.**



Спонтанные переходы являются фактором, препятствующим накоплению атомов в возбуждённом состоянии. Этим можно пренебречь, если возбуждённое состояние метастабильно.

**Метастабильное состояние — возбуждённое состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго (например,  $10^{-3}$  с) по сравнению с обычным возбуждённым состоянием ( $10^{-8}$  с).**



### 131

Оптические процессы в рубиновом лазере

Рассмотрим принцип действия рубинового лазера. Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома  $\text{Cr}^{3+}$ .

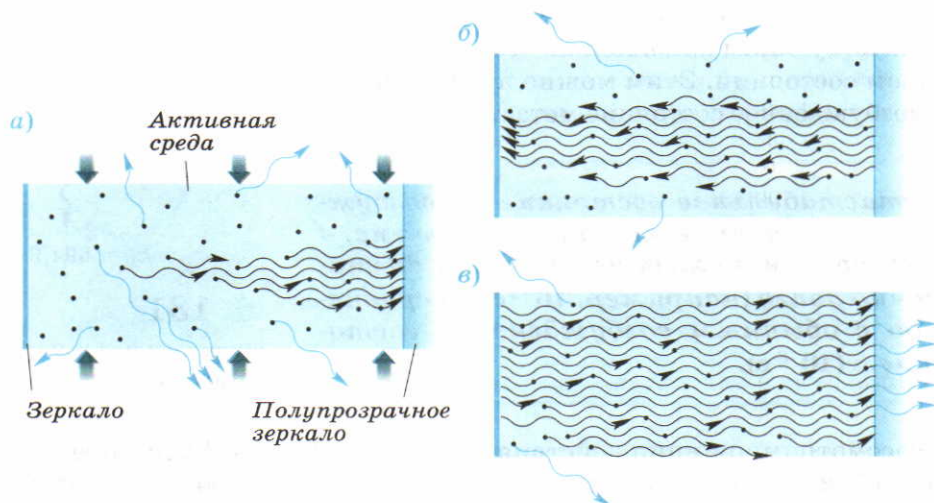
С помощью мощного импульса лампы-вспышки («оптической накачки») ионы хрома переводятся из основного состояния  $E_1$  в возбуждённое  $E_3$  (рис. 131). Через  $10^{-8}$  с ионы, передавая часть энергии кристаллической решётке, переходят на метастабильный энергетический уровень  $E_2 < E_3$ , на котором они начинают накапливаться. Малая вероятность спонтанного перехода с этого уровня в основное состояние приводит к инверсной населённости:  $n_2 > n_1$ . Случайный фотон с энергией  $h\nu = E_2 - E_1$  может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов (рис. 132, а). Индуцированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического кристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается (рис. 132, б).

Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — частично прозрачным (рис. 132, в). Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

В настоящее время существует много различных типов и конструкций лазеров. Основные особенности лазерного излучения следующие:

- лазерное излучение обладает исключительной монохроматичностью и когерентностью;
- пучок света лазера имеет очень малый угол расхождения (около  $10^{-5}$  рад);
- лазер — наиболее мощный искусственный источник света. Напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, может превышать напряжённость поля внутри атома.





### ▲ 132

*Оптическое усиление:*

*а) оптическая «накачка»;*

*б) оптическое усиление;*

*в) генерация лазерного излучения*

**Применение лазеров.** Лазеры нашли применение в различных областях науки, техники и медицины. Очень перспективно применение лазерного излучения для космической связи, в светолокаторах, измеряющих большие расстояния с точностью до миллиметров, для передачи телевизионных и компьютерных сигналов по оптическому волокну. Лазеры используются при считывании информации с компакт-дисков, со штрихкодов товаров. С помощью луча лазеров малой интенсивности можно проводить хирургические операции, например «приваривать» отслоившуюся от глазного дна сетчатку, делать сосудистые операции. Излучение мощных лазеров сваривает и разрезает металлические листы. Перспективно использование мощного лазерного излучения для осуществления управляемой термоядерной реакции.

Лазеры применяются также для топографической съёмки, потому что луч лазера задаёт идеальную прямую линию. Направление тоннеля под проливом Ла-Манш задавалось лазерным лучом. С помощью лазерного излучения получают голографические трёхмерные объёмные изображения.

Создание лазеров — результат использования фундаментальных физических законов в прикладных исследованиях. Оно привело к гигантскому прогрессу в различных областях техники и технологии.

В О П Р О С Ы

1. Какие возможны процессы взаимодействия атома с фотоном?
2. Какой источник излучения называют лазером?
3. Какую населённость энергетических уровней атома (молекулы) называют инверсной? Какое состояние электрона в атоме называют метастабильным?
4. Опишите принцип действия рубинового лазера. Охарактеризуйте основные особенности лазерного излучения.
5. Как используются лазеры в различных областях науки, техники и медицины?

**ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ**

Определите задерживающее напряжение для фотоэлектронов, вырываемых с поверхности калия при его освещении излучением с длиной волны  $\lambda = 330$  нм. Для калия работа выхода  $A_{\text{вых}} = 2$  эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж), постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Решение**

Энергия поглощённого фотона  $h\nu$  идёт на совершение работы выхода и на сообщение кинетической энергии вылетевшему фотоэлектрону. Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта,

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

При задерживающем напряжении, соответствующем закону сохранения механической энергии  $eU_3 = \frac{mv^2}{2}$ , фототок становится равным нулю. В этом случае уравнение Эйнштейна имеет вид:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + eU_3.$$

Используя связь частоты  $\nu$  излучения с длиной волны  $\lambda$  ( $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ), получаем:

$$h \frac{c}{\lambda} = A_{\text{вых}} + eU_3.$$

Тогда

$$U_3 = \left( h \frac{c}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right) / e.$$

$$U_3 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{330 \cdot 10^{-9}} - 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,8 \text{ (В)}.$$

**Ответ:**  $U_3 = 1,8$  В.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Энергия кванта излучения** прямо пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$E = h\nu,$$

где  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

Фотон — элементарная частица, переносчик электромагнитного взаимодействия.

Квант — порция энергии, которой обладает фотон.

- **Фотоэффект** — явление испускания электронов твёрдыми и жидкими веществами под действием света.

- Законы фотоэффекта:

1. Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.

- Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2}.$$

Энергия фотона идёт на совершение работы выхода и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии. Работа выхода — минимальная работа, которую нужно совершить для удаления электрона из металла.

- Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

- **Корпускулярно-волновой дуализм** — проявление в поведении одного и того же объекта как корпускулярных, так и волновых свойств. Корпускулярно-волновой дуализм — универсальное свойство любых материальных объектов.

- **Волновая теория** правильно описывает свойства света при больших интенсивностях, т. е. когда число фотонов велико.

- **Квантовая теория** используется при описании свойств света при малых интенсивностях, т. е. когда число фотонов мало.

- Волновые свойства любой частицы, обладающей импульсом  $p$ , характеризует длина волны де Бройля:

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

В процессе измерения меняется состояние микрообъекта. Одновременное точное определение координаты и импульса частицы невозможно.

- **Соотношение неопределённостей Гейзенберга:**

Произведение неопределённости координаты частицы на неопределённость её импульса не меньше постоянной Планка:

$$\Delta y \Delta p_y \geq h.$$

- **Постулаты Бора:**

1. В атоме, находящемся в стационарном состоянии, электрон может двигаться лишь по особым, стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии.

2. Излучение света атомом происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$ .



Энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

**Правило квантования орбит Бора.** На стационарной орбите момент импульса электрона квантуется (кратен постоянной Планка  $\hbar$ )

$$m_e v r = n \hbar,$$

где  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка («аш перече́рное»);  $n = 1, 2, 3, \dots$

- **Основное состояние атома** — состояние с минимальной энергией.
- **Спектральный анализ** — метод определения химического состава и других характеристик вещества по его спектру. Основные излучательные процессы атомов: поглощение света, спонтанное и вынужденное излучения.
- **Поглощение света** сопровождается переходом атома из основного состояния в возбуждённое.

- **Спонтанное излучение** — излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.
- **Индукцированное излучение** — излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.
- **Лазер** — источник когерентного излучения, генерируемого в процессе индуцированного электромагнитного излучения.
- **Инверсная населённость** энергетических уровней — неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбуждённом состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.
- **Метастабильное состояние** — возбуждённое состояние атома, в котором он может находиться значительно дольше, чем в других состояниях.

# ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

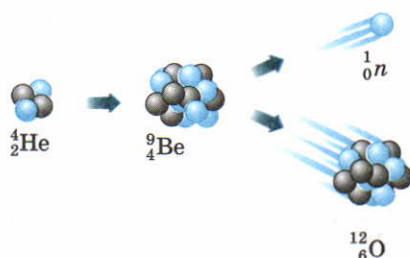
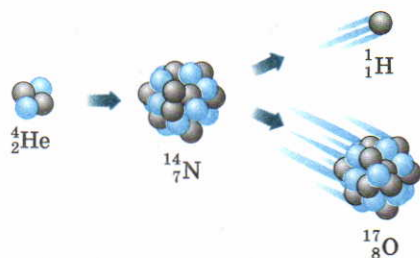


## Физика атомного ядра

### § 50. Состав атомного ядра

**Протон и нейтрон.** Опыты Резерфорда, проведённые в 1910 г. (см. § 46), показали, что атомное ядро, находящееся в центре атома, в 10 000 раз меньше размера самого атома и сосредоточивает 99,9% массы атома. Последующее изучение состава ядра проводилось экспериментально с помощью бомбардировки ядра  $\alpha$ -частицами. При подобной бомбардировке из ядра вылетали частицы, входящие в его состав. Первой такой частицей, открытой Резерфордом в 1919 г. при бомбардировке ядер В, F, Na, Al, P, Ne, Mg и других элементов (рис. 133), был протон (от греч. *protos* — первый, первичный), или ядро самого лёгкого изотопа атома водорода  ${}^1_1\text{H}$ . Протон  $p$  имеет положительный заряд, равный элементарному электрическому заряду электрона,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса протона  $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,007276470 а. е. м. Протоны встречаются в земных условиях в свободном состоянии как ядра атома водорода. Однако считать, что атомное ядро любого атома (за исключением  ${}^1_1\text{H}$ ) состоит только из протонов, было бы неправильно.

В 1932 г. английский физик **Джеймс Чедвик** установил, что при облучении ядер атома бериллия  $\alpha$ -частицами (рис. 134) из ядра вылетают нейтральные частицы массой, близкой к массе протона. Эта частица была названа *нейтроном* (от лат. *neutron* — ни тот ни другой, или нейтральный). Такое название подчёркивало отсутствие у нейтрона электрического заряда. Масса свободного нейтрона  $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,008664902 а. е. м. превосходит массу протона на 2,5 массы электрона, отличаясь от массы протона всего на 0,14%. Нейтроны в свободном виде в земных условиях практически не встречаются из-за их неустойчивости. Нейтрон достаточно быстро са-



### ▲ 133

Образование протона при бомбардировке ядер азота  $\alpha$ -частицами

### ▲ 134

Образование нейтрона при бомбардировке ядер бериллия  $\alpha$ -частицами

мопроизвольно распадается: среднее время жизни нейтрона близко к 15,3 мин.

По современным представлениям протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — *нуклона* (от лат. nucleus — ядро).

*Протон — нуклон в заряженном состоянии, нейтрон — в нейтральном.* Для обозначения протона в ядерных реакциях используют символ  ${}^1_1\text{p}$ , а нейтрона  ${}^1_0\text{n}$ . Нижний индекс характеризует электрический заряд частицы, кратный заряду  $(+e)$  протона (или зарядовое число  $Z$ ), верхний — число нуклонов, которое содержит частица (или массовое число  $A$ ).

Подобно электрону, протон и нейтрон имеют спиновый момент импульса, равный  $\hbar/2$ , т. е. *протон и нейтрон обладают полуцелым спином (в единицах  $\hbar$ )*.

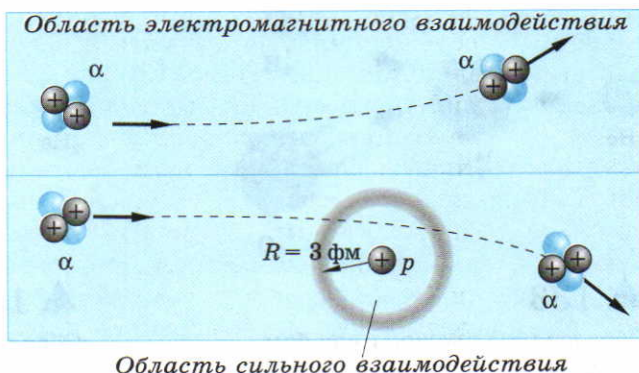
**Протонно-нейтронная модель ядра.** Согласно протонно-нейтронной модели ядра, предложенной в 1932 г. российским физиком **Д. Д. Иваненко** и **В. Гейзенбергом**, ядро атома любого химического элемента состоит из двух видов элементарных частиц: протонов и нейтронов. Вследствие электронейтральности атома число  $Z$  протонов в ядре (*зарядовое число*), имеющих заряд  $(+Ze)$ , равно числу  $Z$  электронов с полным зарядом  $(-Ze)$ , движущихся вокруг ядра. Например, один электрон атома водорода удерживается вблизи ядра одним протоном. При этом в ядре различных *изотопов* (от греч. isos — одинаковый, topos — место) атома водорода может находиться не только протон, но и разное число  $N$  нейтронов.

**Сильное взаимодействие нуклонов.** Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате сильного взаимодействия, существующего между этими частицами. Наличие такого взаимодействия было под-



## 135

Электромагнитное и сильное взаимодействия  $\alpha$ -частицы с протоном



тверждено в 1919 г. опытами Резерфорда. В этих опытах бомбардировке  $\alpha$ -частицами подвергались лёгкие ядра атомов (с малым  $Z$ ) для уменьшения кулоновского отталкивания. При бомбардировке ядер атома водорода (протонов)  $\alpha$ -частицы испытывали кулоновское отталкивание от протона, находясь от него на расстоянии, превышающем 3 фм (1 фм =  $10^{-15}$  м). На меньших расстояниях пролёта от протона наблюдалось притяжение  $\alpha$ -частиц к протону (рис. 135), обусловленное сильным взаимодействием нуклонов друг с другом. Нейтрон начинает притягиваться к протону, находясь от него на расстоянии, меньшем 2 фм. На расстоянии, меньшем 0,4 фм, действуют мощные силы отталкивания между ними.

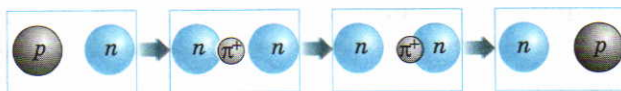
Притяжение между протоном и нейтроном объясняется их постоянным обменом друг с другом виртуальной (экспериментально ненаблюдаемой при таком взаимодействии) частицей —  $\pi^+$ -мезоном (рис. 136).

Подобный обмен условно можно продемонстрировать на следующем примере. Один из двух людей, стоящих друг напротив друга, с очень тяжёлым шаром в руках, будучи не в состоянии удержать равновесие, наклоняется вперёд. В этот момент второй человек, до этого лишь придерживавший шар, его подхватывает и ситуация вскоре зеркально повторяется. Предложенный пример, конечно, является лишь иллюстрацией.

Взаимодействие протонов происходит в результате обмена виртуальными нейтральными  $\pi^0$ -мезонами (пионами). Процесс обмена нуклонов виртуальными частицами изображают на диаграммах Фейнмана (Р. Фейнман — американский физик), на которых реальной час-

## 136

Обменное взаимодействие протона и нейтрона



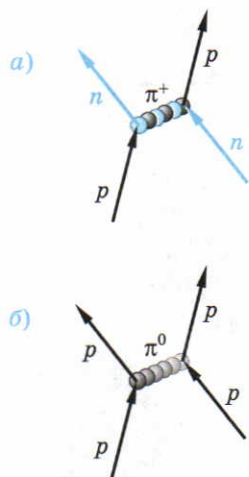
тице сопоставляется прямая линия, а виртуальной — последовательные положения частицы (или волнистая линия) (рис. 137).

Ядерные силы взаимодействия зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. При антипараллельных спинах энергия взаимодействия нуклонов оказывается меньше, чем при параллельных. Значит, образование пары нуклонов с антипараллельными спинами энергетически более выгодно и соответственно более вероятно, чем возникновение пары таких нуклонов с параллельными спинами. *Парное расположение нуклонов с антипараллельными спинами в одном энергетическом состоянии ядра энергетически выгодно.*

**Состав ядра.** Рассмотрим состав ядра некоторых химических элементов, чтобы выявить основные закономерности его образования.

В электронной оболочке гелия находятся два электрона, а в ядре соответственно два протона. Однако ядро, состоящее из двух протонов, неустойчиво из-за кулоновского отталкивания протонов (такое ядро существует менее  $10^{-18}$  с). Два нейтрона, входящие в состав ядра  ${}^4_2\text{He}$ , стабилизируют ядро. Силы их ядерного притяжения между собой и к протонам препятствуют кулоновскому отталкиванию протонов. В основном энергетическом состоянии ядра  ${}^4_2\text{He}$ , обладающего минимальной энергией, находятся две пары протонов и нейтронов с противоположными спинами (рис. 138). Подобное парное размещение нуклонов соответствует максимальному заполнению соответствующей энергетической оболочки. Энергия ядер, как и атомов, квантуется, т. е. ядра обладают дискретным спектром энергетических состояний.

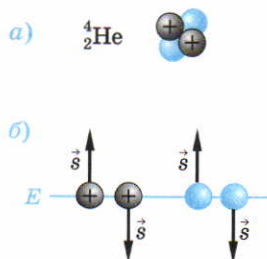
Наиболее стабильными являются *чётно-чётные ядра*, состоящие из чётного числа протонов и чётного числа нейтронов. Известно около 160 стабильных чётно-чётных ядер. Особой устойчивостью среди чётно-чётных



### 137

*Нуклон-нуклонное взаимодействие в результате обмена пионами:*

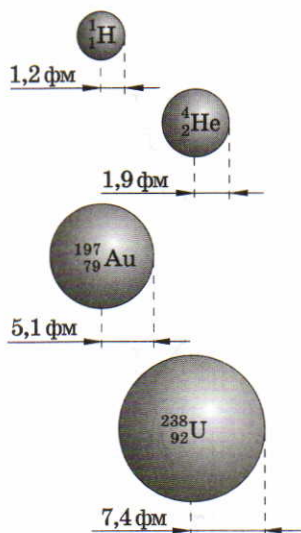
а) протон-нейтронное взаимодействие;  
б) протон-протонное взаимодействие



### 138

*Ядро атома гелия:*  
а) нуклоны в ядре;  
б) нуклоны в основном энергетическом состоянии





### ▲ 139

Относительные размеры ядер

ядер отличаются «магические» ядра — ядра, у которых число  $Z$  протонов или  $N$  нейтронов равно одному из чисел 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Сами эти числа также называют магическими. Магические числа отражают периодичность заполнения нуклонами энергетических оболочек ядра, подобную периодичности заполнения электронами электронных оболочек атомов, отражённой в периодической системе Менделеева. Подобную теоретическую модель строения ядра называют оболочечной моделью.

**Размер ядра.** Предполагая, что нуклоны плотно упакованы в ядре с массовым числом  $A$ , можно оценить радиус ядра  $R$ . Условно вводя радиус нуклона  $r_0$ , можно утверждать, что объём ядра складывается из объёма отдельных нуклонов

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \left(\frac{4}{3}\pi r_0^3\right)A.$$

Следовательно, радиус ядра равен

$$R = r_0 A^{1/3}. \quad (111)$$

Эксперименты показывают, что  $r_0 = 1,2$  фм. На рисунке 139 показаны относительные размеры ядер водорода, гелия, золота и урана.

Зная радиус ядра, можно оценить плотность ядерного вещества, зная, что  $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ,

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m_{\text{я}}}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{A \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 \cdot A} = \\ &= \frac{1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi (1,2 \cdot 10^{-15})^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Для сравнения плотность воды  $10^3 \text{ кг/м}^3$ . Один кубический сантиметр ядерного вещества имел бы массу 230 млн т. Из ядерного вещества состоят нейтронные звёзды — гигантские ядра, удерживаемые гравитационным притяжением.

### В О П Р О С Ы

1. Приведите основные характеристики протона и нейтрона. Охарактеризуйте протонно-нейтронную модель ядра.



2. Как осуществляется сильное обменное взаимодействие протона и нейтрона в ядре?
3. Почему парное расположение нуклонов на энергетическом уровне в ядре энергетически выгодно?
4. Какие ядра относят к магическим?
5. Объясните зависимость радиуса ядра от массового числа.

### З А Д А Ч И

1. Сколько протонов и нейтронов содержит изотоп  ${}^{15}_7\text{N}$ ?
2. Сколько нейтронов в ядре  ${}^{15}\text{O}$ ?
3. Рассчитайте радиус ядра атома серебра  ${}^{108}_{47}\text{Ag}$ .

## § 51. Энергия связи нуклонов в ядре

**Удельная энергия связи.** Чем больше протонов в ядре, т. е. чем больше заряд  $Ze$  ядра, тем сильнее кулоновское отталкивание между протонами. Для того чтобы они не разлетались под действием кулоновских сил, требуется большее число нейтронов для стабилизации ядра. При малых  $Z$  число нейтронов  $N \approx Z$ , а при больших  $Z$  (в ядрах тяжёлых элементов) даже значительное число нейтронов в ядре ( $N \approx 1,6Z$ ) уже не может препятствовать его распаду. Последним стабильным ядром, имеющим максимальное число протонов, является свинец ( $Z = 82$ ).

Энергия связи ядра равна минимальной работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на составные части — протоны и нейтроны. Такая энергия выделяется при образовании ядра из протонов и нейтронов и определяет уменьшение массы ядра по сравнению с массой протонов и нейтронов, входящих в его состав, или *дефект массы*.

**Удельная энергия связи — энергия связи, приходящаяся на один нуклон.**

Рассчитаем среднюю (удельную) энергию связи нуклона в атоме углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ . Для этого найдём сначала полную энергию связи  $E_{\text{св}}$  всех нуклонов в ядре, определяемую через дефект массы  $\Delta m$ :

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2.$$

Известно, что  $m_a = 12$  а. е. м.,  $m_p = 1,007276$  а. е. м.,  $m_n = 1,008665$  а. е. м.,  $m_e = 0,000549$  а. е. м. Масса ядра

$$m_{\text{я}} = (m_a - 6m_e) = 11,996706 \text{ а. е. м.}$$

Масса нуклонов

$$6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ а. е. м.}$$

Дефект массы

$$\Delta m = 6(m_p + m_n) - m_{\alpha} = 0,09894 \text{ а. е. м.}$$

Энергия связи всех нуклонов в ядре

$$E_{\text{св}} = 0,09894 \text{ а. е. м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а. е. м.} = 92,16 \text{ МэВ.}$$

Удельная энергия связи нуклона

$$(E_{\text{св}})_1 = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{92,16}{12} = 7,68 \text{ МэВ/нуклон.}$$

Внутриядерная энергия оказывается в миллион раз больше внутриатомной, т. е. энергии электрона в атоме. Соответственно при ядерной реакции может выделяться энергия в  $10^6$  раз больше, чем при химической реакции.

Зависимость удельной энергии нуклона в ядре от массового числа приведена на рисунке 140.

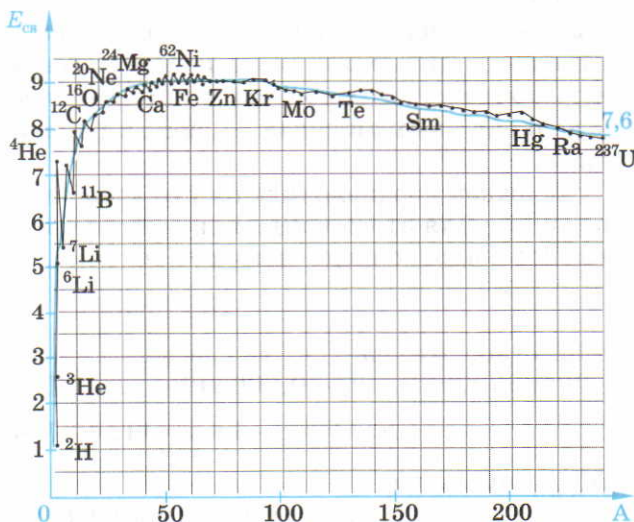
Для небольших ядер удельная энергия связи мала из-за малого числа нуклонов. Наибольшей энергией связи обладают стабильные ядра с массами, кратными целому числу массы  $\alpha$ -частицы ( ${}^4_2\text{He}$ ).

Максимальная энергия связи 8,795 МэВ у  ${}^{62}_{28}\text{Ni}$ , наиболее стабильного из всех ядер.

Высокая энергия связи ядра железа объясняет широкую распространённость железа во Вселенной. У тяжёлых элементов при больших  $Z$  энергия связи нуклона уменьшается из-за кулоновского отталкивания протонов. Слабая зависимость энергии связи нуклона от полного

140

Удельная энергия связи  
нуклона в ядре



числа  $A$  нуклонов в ядре подтверждает, что нуклоны связаны короткодействующими силами. Лишний нуклон взаимодействует лишь с ближайшими соседями. При далекодействующих силах (таких, как гравитационные) энергия связи зависит от размеров: камень в 6 раз труднее оторвать от поверхности Земли, чем от поверхности Луны.

Ядерные силы напоминают быстро убывающие с расстоянием силы взаимодействия между молекулами жидкости. Энергия связи молекул не зависит от массы жидкости. Удельная теплота парообразования воды одинакова при испарении воды из чашки и из озера.

Подобно молекулам, находящимся на поверхности воды, нуклоны втягиваются внутрь ядра, испытывая поверхностное натяжение. Вот почему ядра имеют сферическую форму. Ядро является как бы каплей ядерного вещества.

**Синтез и деление ядер.** При соединении двух лёгких ядер, например  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$ , может образоваться тяжёлое ядро с большой энергией связи (вблизи максимума удельной энергии связи). При таком процессе ядерного синтеза выделяется значительная энергия, равная разности энергий связи тяжёлого ядра и двух лёгких ядер.

При расщеплении очень тяжёлых ядер, например  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , т. е. при ядерном делении, образуются ядра более лёгких элементов с большими энергиями связи (вблизи максимума удельной энергии связи). При таком ядерном расщеплении также выделяется энергия. Водород  ${}^1_1\text{H}$  и уран  ${}^{238}_{92}\text{U}$  обладают минимальной удельной энергией связи (соответственно для лёгких и тяжёлых элементов), поэтому при синтезе и расщеплении именно этих ядер выделяется максимальная энергия.

### В О П Р О С Ы

1. Почему у тяжёлых элементов доля нейтронов в ядре больше, чем у лёгких?
2. Проведите оценку энергии связи нуклона в ядре.
3. Какую энергию называют удельной энергией связи? Как зависит удельная энергия связи от массового числа?
4. Почему при синтезе лёгких ядер выделяется значительная энергия?
5. Почему при делении тяжёлых ядер выделяется энергия?

### З А Д А Ч И

1. Найдите энергию связи последнего нейтрона в ядре изотопа  ${}^{16}_8\text{O}$  ( $m_1 = 15,994915$  а. е. м.). Масса изотопа  ${}^{15}_8\text{O}$   $m_2 = 15,003076$  а. е. м.
2. Рассчитайте энергию связи нуклонов в ядре атома азота  ${}^{14}_7\text{N}$  ( $m_a = 14,003242$  а. е. м.).
3. Рассчитайте удельную энергию связи ядра атома лития  ${}^7_3\text{Li}$  ( $m_a = 7,017601$  а. е. м.).



## § 52. Естественная радиоактивность

**Радиоактивный распад.** Примерно 90% из 2500 ядер изотопов, известных в настоящее время, нестабильны. Они распадаются на другие ядра и частицы. Подобный процесс распада называют *радиоактивностью* (от лат. radio — излучаю).

**Радиоактивность — явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц.**

Устойчивыми, стабильными являются лишь атомные ядра с энергией связи нуклонов, большей суммарной энергии связи нуклонов в продуктах распада.

Различают *естественную* и *искусственную* радиоактивность.

- Естественная радиоактивность — радиоактивность, наблюдаемая у неустойчивых изотопов, существующих в природе.
- Искусственная радиоактивность — радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях.

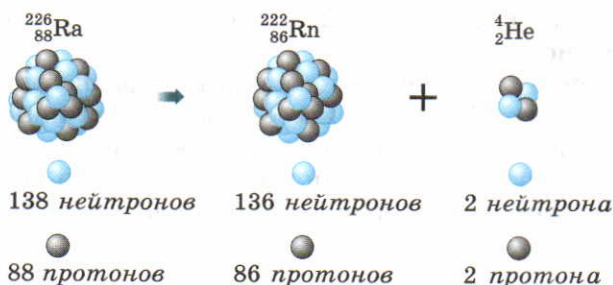
Нестабильными, или радиоактивными, являются тяжёлые ядра с зарядовым числом  $Z > 83$  или массовым числом  $A > 209$ , которые могут спонтанно распадаться.

**Радиоактивный распад — радиоактивное (самопроизвольное) превращение исходного (материнского) ядра в новые (дочерние) ядра.**

Причиной радиоактивного распада является нарушение баланса между количеством  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов в ядре. Во всех стабильных ядрах (за исключением  ${}^1_1\text{H}$ ) число нейтронов больше (не меньше) числа протонов:  $N \geq Z$ . Поле ядерного притяжения нейтронов компенсирует кулоновское отталкивание протонов. При нарушении требуемого баланса ядро обладает избыточной энергией, избавиться от которой оно может в результате перехода в состояние с меньшей энергией.

**Альфа-распад.** Если ядро содержит избыточное число протонов, возникает *альфа-распад*.

**Альфа-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием  $\alpha$ -частицы.**



141  
Альфа-распад радия

При альфа-распаде радиоактивное (материнское) ядро  $X$  превращается в новое (дочернее) ядро  $Y$ , испуская при этом  $\alpha$ -частицу (ядро атома  $^4_2\text{He}$  —  $Z = 2$ ;  $A = 4$ ).

С учётом законов сохранения электрического заряда и массы (числа нуклонов) запишем уравнение альфа-распада:

$$^A_Z X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2} Y + ^4_2 \text{He}.$$

В результате альфа-распада образуется химический элемент с порядковым номером в таблице Менделеева, уменьшенным на две единицы, и массовым числом — на четыре единицы. Относительная доля протонов в ядре после распада уменьшается:  $\frac{Z-2}{N-2} < \frac{Z}{N}$ .

Широко применяемым источником  $\alpha$ -частиц является радий —  $^{226}_{88}\text{Ra}$ .

При распаде он превращается в радон (рис. 141):



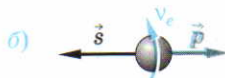
**Бета-распад.** Если ядро содержит избыточное число нейтронов, возникает *бета-распад*.

**Бета(минус)-распад** — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона и антинейтрино.

При бета(минус)-распаде радиоактивное (материнское) ядро  $X$  превращается в новое (дочернее) ядро  $Y$  с испусканием электрона (сначала испускаемые электроны при таком распаде называли бета-лучами). В результате бета-распада образуется элемент с порядковым номером в таблице Менделеева больше на единицу

$$^A_Z X \rightarrow ^A_{Z+1} Y + ^0_{-1} e + ?$$





## ▲ 142

Спины античастиц:

а) антинейтрино;

б) нейтрино

Электрон не содержит нуклонов, поэтому его массовое число равно нулю.

Появление вопросительного знака в уравнении реакции не случайно. В процессе бета-распада один из нейтронов превращается в протон. При этом вследствие закона сохранения электрического заряда образуется электрон и ещё одна частица (рис. 142, а):

$${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}_e. \quad (113)$$

Позднее эту частицу, появляющуюся всегда вместе с электроном, стали называть электронное антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$  (волнистой линией сверху символа обозначают античастицы). Название «нейтрино» происходит от итальянского *neutrino* — «нейтрончик». Отличается электронное антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$  от нейтрино  $\nu_e$  ориентацией спина (рис. 142). Спин  $\vec{s}$  нейтрино направлен противоположно его импульсу  $\vec{p}$  (направлению скорости движения), а спин антинейтрино сонаправлен с ним. На рисунке 142, б условно показано направление вращения нейтрино относительно направления скорости его движения. Нейтрино и антинейтрино обладают полужелым спином  $\hbar/2$ .

Соответственно антинейтрино возникает и в процессе бета-распада:



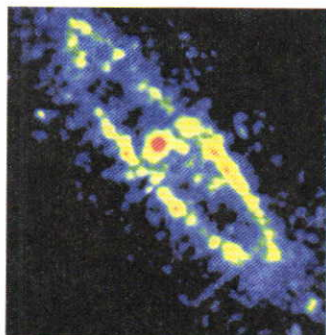
В процессе бета-распада уменьшается относительное число нейтронов. Например, ядро атома углерода  ${}_{6}^{14}\text{C}$  превращается в ядро азота  ${}_{7}^{14}\text{N}$ :  ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}_e$ .

**Гамма-излучение.** Альфа-распад  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  может проходить в два этапа: сначала образуется дочернее ядро  ${}_{86}^{222}\text{Rn}^*$  в возбуждённом состоянии с энергией  $E^*$ , которое затем, испуская  $\gamma$ -квант с энергией 0,186 МэВ, переходит в основное состояние  ${}_{86}^{222}\text{Rn}$  с энергией  $E$  (рис. 143).

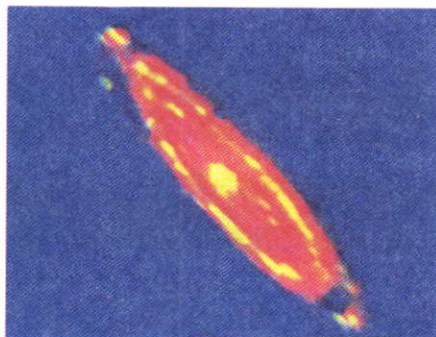
**Гамма-излучение — электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбуждённого в более низкое энергетическое состояние.**

Электрон и антинейтрино не входят в состав ядра атома, а рождаются в процессе бета-распада. Фотон также не является составной частью атома, а возникает лишь при переходе ядра атома из одного квантово-





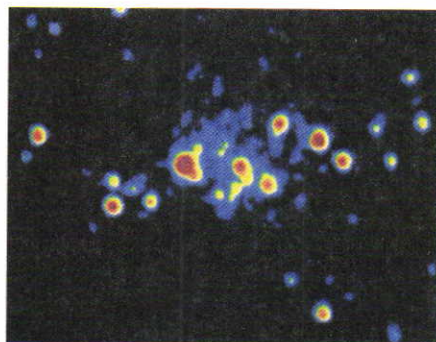
а)



б)



в)



г)

## ▲ VIII

Излучение туманности Андромеды:

а) в радиодиапазоне;

б) в ИК-диапазоне;

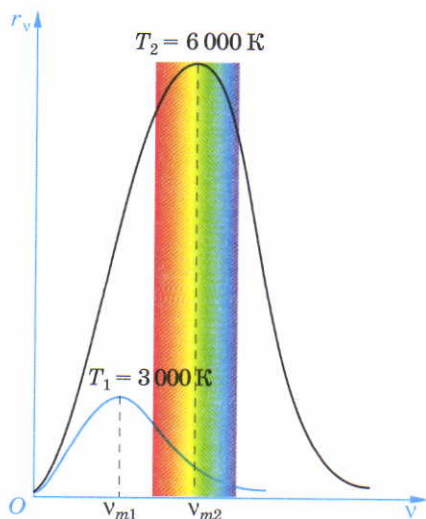
в) в видимом свете;

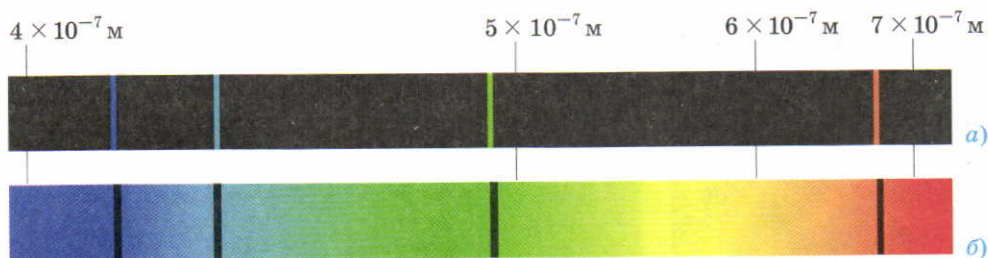
г) в рентгеновском диапазоне

## ▶ IX

Тепловое излучение чёрного тела.

Закон теплового излучения





X

Серия Бальмера для атома водорода:

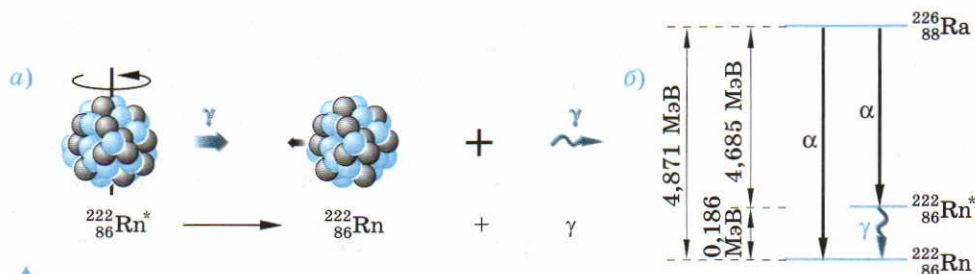
а) спектр излучения;

б) спектр поглощения



XI

Поглощение космического излучения атмосферой Земли



## ▲ 143

- а) Переход ядра  $Rn^*$  из возбуждённого в более низкое энергетическое состояние;  
 б) энергетический спектр при альфа-распаде радия

го состояния в другое. Появление новых элементарных частиц в ходе ядерных реакций отражает их фундаментальное свойство — *взаимо-превращаемость*.

## В О П Р О С Ы

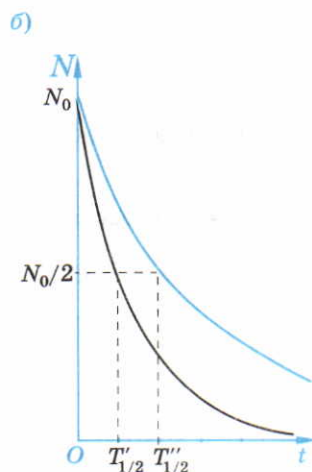
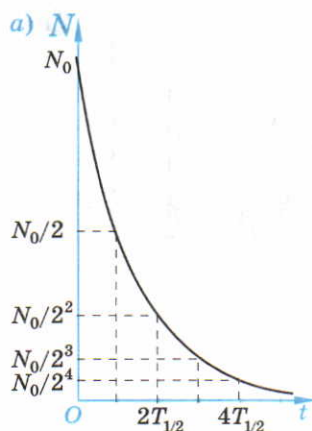
1. Какое физическое явление называют радиоактивностью? Какие различают виды радиоактивности?
2. Что является причиной радиоактивного распада?
3. Какой радиоактивный распад называют альфа-распадом? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате альфа-распада?
4. Какой радиоактивный распад называют бета-распадом? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате бета-распада?
5. Как возникает гамма-излучение?

## § 53. Закон радиоактивного распада

**Период полураспада.** Радиоактивный распад — статистический процесс. Нельзя сказать, какие именно атомы в радиоактивном образце, состоящем в начальный момент времени ( $t = 0$ ) из  $N_0$  атомов, распадутся за определённое время. Но можно практически с полной достоверностью предсказать, сколько атомов независимо друг от друга распадётся за этот промежуток времени. Например, половина атомов радона распадётся за 3,82 дня. Чем больше первоначальное число атомов  $N_0$ , тем точнее будет выполняться это вероятностное предсказание.

*Период полураспада — промежуток времени, за который распадётся половина первоначального числа атомов.*





Период полураспада определяет скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем быстрее происходит распад.

Найдём закон радиоактивного распада, т. е. число  $N$  нераспавшихся атомов в произвольный момент времени  $t$ . Предположим, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) образец содержит  $N_0$  атомов. Тогда по истечении периода полураспада  $T_{1/2}$  нераспавшимися останутся  $N_0/2$  атомов. Атомы распадаются независимо друг от друга. Существует вероятность распада каждого атома в отдельности, поэтому *период полураспада не зависит от начального числа частиц*. Спустя ещё один полупериод (в момент времени  $t_2 = 2T_{1/2}$ ) число нераспавшихся (радиоактивных) атомов

$$\frac{N_0}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{N_0}{2^2}.$$

Через  $n$  периодов полураспада в момент времени  $t = nT_{1/2}$  таких атомов останется

$$N = \frac{N_0}{2^n}.$$

Учитывая, что  $n = t/T_{1/2}$ , получаем закон радиоактивного распада — закон убывания числа радиоактивных атомов со временем

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (115)$$

## 144

**Закон радиоактивного распада:**

а) число нераспавшихся атомов как функция времени;

б) число нераспавшихся атомов в двух образцах с разным периодом полураспада

Период полураспада для разных веществ меняется в широких пределах, например от  $10^{-16}$  с для  ${}^8_4\text{Be}$  до  $3,7 \cdot 10^{10}$  лет для  ${}^{87}_{37}\text{Rb}$ .

Зависимость числа радиоактивных атомов от времени для изотопа с периодом полураспада  $T_{1/2}$  приведена на рисунке 144, а. Графиком этой зависимости является экспонента.

Чем больше период полураспада, тем медленнее происходит распад. В произвольный момент времени число нераспавшихся атомов в образце 2 превышает их число в образце 1

(в предположении, что начальное число  $N_0$  атомов было одинаковым в обоих образцах) (рис. 144, б).

**Активность радиоактивного вещества.** Скорость радиоактивного распада характеризует *активность радиоактивного вещества*.

**Активность радиоактивного вещества — число распадов радиоактивных ядер за 1 с.**

Единица активности — *беккерель* (1 Бк).

1 Бк — активность радиоактивного вещества, в котором за 1 с происходит один распад.

Можно показать, что

$$A = \frac{N}{1,44T_{1/2}}. \quad (116)$$

Активность пропорциональна числу нераспавшихся атомов, которое убывает с течением времени. Следовательно, активность радиоактивного вещества убывает с течением времени. Чем быстрее распадаются ядра, тем меньше период полураспада, а значит, тем больше активность вещества. Активность одного грамма радия равна  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Эта величина часто используется на практике в качестве единицы активности — *кюри* (1 Ки);  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ . Промежуток времени  $t = 1,44T_{1/2}$  характеризует *среднее время жизни радиоактивного изотопа*.

Явление радиоактивного распада используется в *изотопной хронологии*, т. е. при определении возраста горных пород, минералов, следов древних культур.

В 1960 г. за разработку радиоуглеродного метода геохронологии американский физик **Фрэнк Либби** был удостоен Нобелевской премии. Радиоуглеродный метод позволяет с большой точностью определять как возраст древнейших памятников культуры, так и время вымирания доисторических животных.

### В О П Р О С Ы

1. Дайте определение периода полураспада. Почему период полураспада не зависит от начального числа частиц?
2. Выведите закон радиоактивного распада.
3. Постройте график зависимости числа нераспавшихся атомов от времени при двух различных значениях периода полураспада.
4. Какая физическая величина характеризует скорость радиоактивного распада? В каких единицах она измеряется?
5. Как используется явление радиоактивного распада?



## З А Д А Ч И

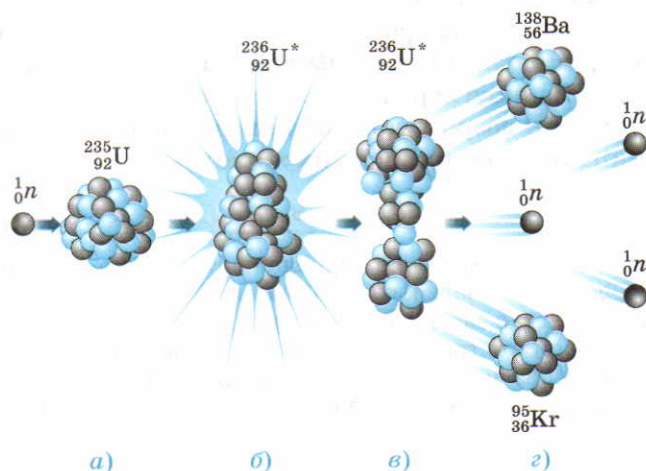
1. Конечным продуктом радиоактивного распада  $^{238}_{92}\text{U}$  является свинец  $^{206}_{82}\text{Pb}$ . Период полураспада  $^{238}_{92}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет. Определите возраст минерала, в котором число атомов урана и свинца одинаково.
2. Изотоп протактиния  $^{234}_{91}\text{Pa}$  имеет период полураспада  $T_{1/2} = 1,18$  мин. Какая часть изотопов останется нераспавшейся через час?
3. Радиоактивный фосфор  $^{32}_{15}\text{P}$ , использующийся для диагностики болезней кровообращения, имеет период полураспада 14,3 дня. Найдите активность образца с числом атомов  $N = 5 \cdot 10^{16}$ .

## § 54. Искусственная радиоактивность

**Деление ядер урана.** Ядра тяжёлых элементов могут делиться на ядра меньшей массы при внешнем воздействии. В 1938 г. немецкие учёные **Отто Ган** и **Франц Штрассман** наблюдали деление ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  под действием медленных нейтронов. Использование именно нейтронов для деления ядер обусловлено их электронейтральностью. Отсутствие кулоновского отталкивания протонами ядра позволяет нейтронам беспрепятственно проникать в атомное ядро (рис. 145, а). Временный захват нейтрона нарушает хрупкую стабильность ядра, обусловленную тонким балансом сил кулоновского отталкивания и ядерного притяжения (рис. 145, б). Возникающие пространственные колебания нуклонов возбуждённого ядра (обозначаемого со \*)  $^{236}_{92}\text{U}^*$  являются неустойчивыми. Избыток нейтронов в центре ядра означает избыток протонов на периферии (рис. 145, в). Их взаимное отталкива-

145

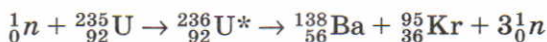
Процесс деления ядра:  
 а) взаимодействие нейтрона с ядром;  
 б) захват нейтрона ядром;  
 в) колебание возбуждённого ядра;  
 г) образование осколков деления



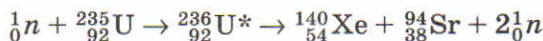


ние приводит к искусственной радиоактивности изотопа  $^{236}_{92}\text{U}^*$ , т. е. к его делению на ядра меньшей массы, называемые *осколками деления* (рис. 145, г). Массы осколков деления отличаются друг от друга примерно в 1,5 раза. Большинство крупных осколков имеют массовое число  $A$  в пределах 135—145, а мелкие — от 90 до 100. В результате реакции деления ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  образуются два или три нейтрона.

Типичными примерами таких реакций являются следующие ядерные реакции:



(с образованием трёх нейтронов);



(с образованием двух нейтронов).

Согласно закону сохранения электрического заряда и массы (числа нуклонов) до и после реакции сумма нижних и верхних индексов в левой и правой частях уравнений реакции одинакова.

Относительная доля нейтронов в более лёгких, чем уран, осколках деления оказывается такой же, как и у урана. Однако у стабильных ядер лёгких элементов относительная доля нейтронов должна быть меньше. Поэтому осколки деления, возникающие в этих реакциях, содержат избыточное число нейтронов и являются радиоактивными. В результате серии радиоактивных превращений они превращаются в стабильные изотопы. Реакция деления ядер урана сопровождается выделением значительной энергии. Выделение энергии обусловлено разницей удельных энергий связи ядер урана и осколков реакции. Удельная энергия связи нуклона в ядре урана  $^{235}_{92}\text{U}$  около 7,6 МэВ, а осколков реакции около 8,5 МэВ (см. рис. 140). Поэтому в результате реакции деления выделяется энергия  $(8,5 - 7,6) \text{ МэВ} = 0,9 \text{ МэВ}$ , приходящаяся на один нуклон. Учитывая, что полное число нуклонов около 235, можно оценить *полный энергетический выход реакции деления*, т. е. энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана, равна

$$Q = 0,9 \cdot 235 \approx 210 \text{ МэВ} \approx 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.}$$

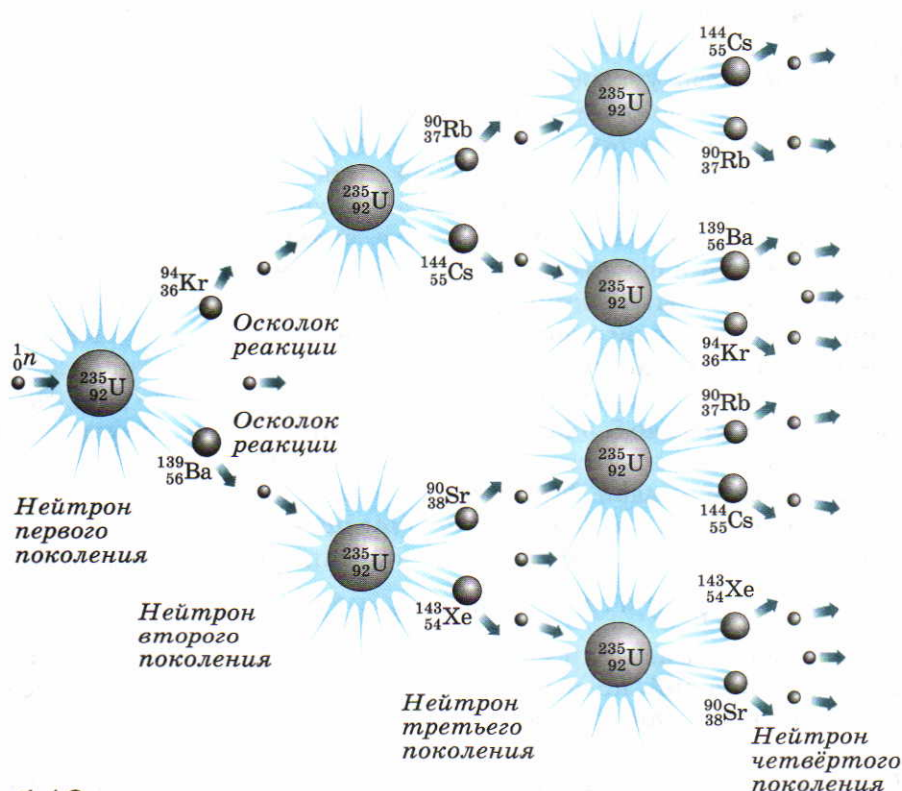
Такая энергия в десятки миллионов раз превосходит энергию химических превращений, но она незначительна в масштабах повседневного опыта. Ведь для подъёма груза массой 1 кг на 1 м требуется энергия 9,8 Дж.

Однако число атомов и ядер очень велико. В 1 кг урана содержится  $2,5 \cdot 10^{24}$  атомов. Поэтому при делении всех ядер этих атомов выделяется энергия  $8 \cdot 10^{13}$  Дж, эквивалентная энергии взрыва 20 килотонн

взрывчатого вещества тринитротолуола. С помощью такой энергии можно вскипятить около 2000 тонн воды.

При делении ядра урана энергия выделяется в основном (около 90%) в виде кинетической энергии разлетающихся осколков. Остальная энергия (около 10%) уносится возникающими нейтронами.

**Цепная реакция деления.** Любой из двух нейтронов второго поколения, вылетающих из ядра  $^{235}_{92}\text{U}$  в процессе деления, может в свою очередь вызвать деление соседнего ядра. Четыре образующихся нейтрона третьего поколения способны вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер начинает лавинообразно нарастать. Возникает *цепная реакция деления* (рис. 146). Цепная реакция может возникать также при делении искусственно созданных изотопов урана  $^{233}_{92}\text{U}$  и плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$ .



## ▲ 146

Цепная реакция деления ядер урана  $^{235}_{92}\text{U}$



Деление ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  происходит под действием медленных (тепловых) нейтронов с энергией порядка 0,1 эВ. Эффективность воздействия таких нейтронов на ядро связано с большим временем их взаимодействия из-за малой скорости относительного движения. Для деления ядер урана  $^{238}_{92}\text{U}$ , наиболее часто встречающегося в природе (составляющего 99,275% естественного урана), требуются быстрые нейтроны с энергией, превышающей 1 МэВ.

**Скорость цепной реакции. Критическая масса.** Скорость цепной реакции деления ядер характеризуют коэффициентом размножения нейтронов.

*Коэффициент размножения нейтронов — отношение числа нейтронов в данном поколении цепной реакции к их числу в предыдущем поколении:*

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}},$$

где  $N_i, N_{i-1}$  — число нейтронов в  $i$  и  $i - 1$  поколениях.

Необходимое условие для развития цепной самоподдерживающейся реакции  $k \geq 1$ .

При  $k = 1$  реакция протекает стационарно: число нейтронов сохраняется неизменным.

При  $k > 1$  реакция нестационарна: число нейтронов лавинообразно нарастает.

Число нейтронов, образующихся при делении ядер, зависит от объёма урановой среды. Чем больше этот объём, тем большее число нейтронов выделяется при делении ядер. Начиная с некоторого минимального критического объёма урановой среды, имеющего определённую критическую массу, реакция деления ядер становится самоподдерживающейся ( $k = 1$ ). Самоподдерживающаяся реакция деления ядер возникает, если за время пролёта нейтроном среды с линейным размером  $l$  успеет образоваться новый нейтрон в результате реакции деления.

Расчёты дают значение критической массы для  $^{235}_{92}\text{U}$  около 47 кг.

Значение критической массы зависит от формы, структуры и внешнего окружения активной зоны. Если уран прослоен полиэтиленовыми плёнками, замедляющими выход нейтронов из зоны реакции, и окружён бериллиевой оболочкой, мешающей вылету электронов наружу, критическая масса  $^{235}_{92}\text{U}$  уменьшается до сотен граммов.



## В О П Р О С Ы

1. Почему для деления ядер используют нейтроны? Приведите примеры реакции деления ядра.
2. Какую энергию называют энергетическим выходом реакции? Как оценить энергетический выход для реакции деления?
3. Какой величиной характеризуют скорость цепной реакции? Запишите необходимое условие для развития цепной реакции.
4. Какую реакцию деления называют самоподдерживающейся? Когда она возникает?
5. Какого порядка критическая масса для  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ?

## § 55. Использование энергии деления ядер.

### Ядерная энергетика

**Ядерный реактор.** Управляемые цепные реакции деления ядер осуществляются в *ядерных реакторах*.

*Ядерный реактор — устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер.*

Впервые управляемая цепная реакция деления ядер урана была осуществлена в 1942 г. в США под руководством итальянского физика **Энрико Ферми**. Цепная реакция с коэффициентом размножения нейтронов  $k = 1,0006$  длилась в течение 28 мин, после чего реактор был остановлен. В настоящее время в мире работает около тысячи ядерных реакторов различного типа и назначения.

Принципиальная схема ядерного реактора показана на рисунке 147.

Ядерное топливо (уран) располагается в активной зоне в виде вертикальных стержней 1, называемых *тепловыделяющими элементами* (ТВЭЛ). Число ТВЭЛов определяет максимальную мощность реактора. В активной зоне реактора может находиться до 90 000 ТВЭЛов.

Как мы уже отмечали, наиболее эффективное деление ядер  ${}^{235}_{92}\text{U}$  происходит под действием медленных нейтронов. Однако вторичные нейтроны, образующиеся в результате реакции деления, являются быстрыми, обладая энергией порядка МэВ. Для того чтобы их последующее взаимодействие с ядрами  ${}^{235}_{92}\text{U}$  в цепной реакции было наиболее эффективно, их замедляют, вводя в активную зону *замедлитель 2 — вещество, уменьшающее кинетическую энергию нейтронов*. В каче-

стве замедлителя часто используется обычная ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и тяжёлая ( $\text{D}_2\text{O}$ ) вода. Это связано с тем, что ядром атома водорода в молекуле воды является протон, масса которого близка к массе нейтрона. В этом случае потеря энергии нейтрона оказывается максимальной (вспомните столкновения движущихся и покоящихся бильярдных шаров (см. Ф-10, § 29)). Хорошим замедлителем считается также графит, ядра которого не поглощают нейтронов.

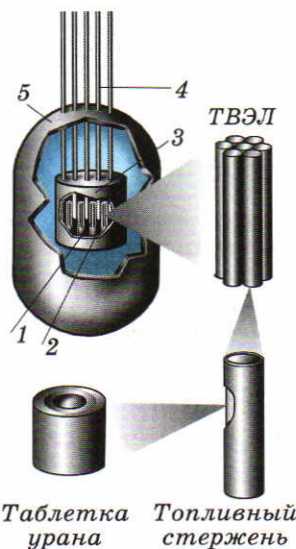
Для уменьшения утечки нейтронов и увеличения коэффициента размножения активную зону окружают *отражателем нейтронов* 3 — оболочкой, отражающей нейтроны *внутрь* зоны.

Управление скоростью цепной реакции осуществляется с помощью передвижения в активной зоне *регулирующих стержней* 4. Такие стержни изготавливают из материалов, сильно поглощающих нейтроны (кадмий, карбид бора). При увеличении глубины погружения регулирующих стержней в активную зону число поглощаемых нейтронов возрастает, вследствие чего цепная реакция ослабевает. При полностью погружённых в активную зону стержнях цепная реакция должна прекратиться.

Реактор начинает работать тогда, когда регулирующие стержни выдвинуты настолько, что коэффициент размножения нейтронов оказывается равным единице.

Для защиты персонала, обслуживающего ядерный реактор, от мощного потока нейтронов и  $\gamma$ -квантов, возникающих при делении ядер и бета-распадах осколков реакции, предусмотрена *радиационная защита* 5. Быстрые нейтроны вначале замедляются с помощью материалов из лёгких элементов, а затем поглощаются тяжёлыми элементами. Наилучшими материалами для защиты от  $\gamma$ -квантов являются материалы с большим значением  $Z$ . Поэтому в качестве радиационной защиты используется бетон с железным заполнителем и соединениями бора.

Ядерные реакторы нашли применение в силовых установках кораблей и подводных лодок. Ядерные реакторы используются для производства искусственных радиоактивных изотопов для научных исследований и в медицинских целях. Одним из важнейших получаемых изото-



▲ 147

Схема ядерного реактора



148

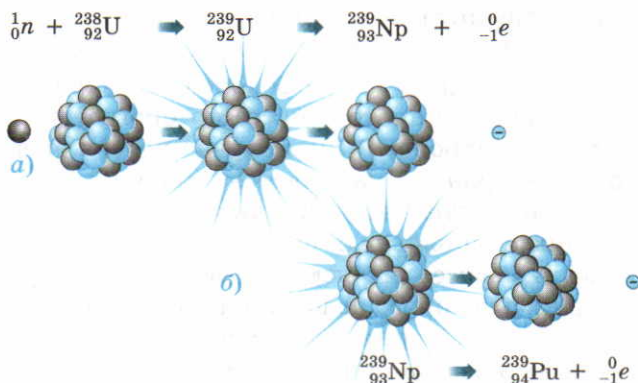
Производство плутония  
в ядерном реакторе:

а) образование непуния

$^{239}_{93}\text{Np}$ ;

б) возникновение

плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$



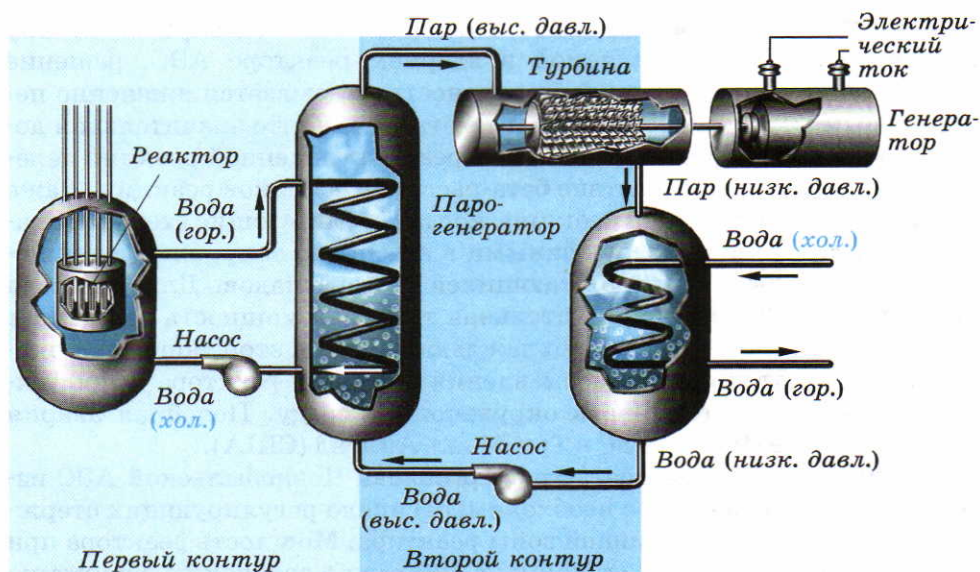
пов является плутоний  $^{239}_{94}\text{Pu}$ , используемый, как и  $^{235}_{92}\text{U}$ , в качестве ядерного топлива. Эффективность деления плутония под действием медленных нейтронов превышает эффективность деления  $^{235}_{92}\text{U}$ . Плутоний получается в результате бомбардировки нейтронами изотопа урана  $^{238}_{92}\text{U}$ , составляющего 99,27% от естественного урана, находящегося в активной зоне реактора. Сначала при захвате ядром нейтрона образуется изотоп урана  $^{239}_{92}\text{U}$  (рис. 148, а). В результате его бета-распада возникает трансурановый элемент нептуний  $^{239}_{93}\text{Np}$ . Период полураспада  $^{239}_{93}\text{Np}$  составляет 2,5 дня. В результате бета-распада нептуния (рис. 148, б) и возникает  $^{239}_{94}\text{Pu}$ . Примерно через год треть урана  $^{238}_{92}\text{U}$  в реакторе превращается в плутоний, который можно использовать как ядерное топливо в реакторах или для производства ядерного оружия. Возможность производства оружейного плутония в обычном ядерном реакторе существенно затрудняет контроль выполнения договора о нераспространении ядерного оружия.

**Атомная электростанция (АЭС).** Ядерный реактор является основным элементом атомной электростанции (АЭС), преобразующей тепловую ядерную энергию в электрическую. В результате деления ядер в реакторе выделяется тепловая энергия. Эта энергия преобразуется в энергию пара, вращающего паровую турбину. Паровая турбина в свою очередь вращает ротор генератора, вырабатывающего электрический ток.

Принципиальная схема атомной электростанции приведена на рисунке 149.

**Мощность реактора — количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени.**





## ▲ 149

### Принципиальная схема атомной электростанции

При каждом акте деления выделяется значительная энергия около  $200 \text{ МэВ} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ . Поэтому стенки ТВЭЛов сильно нагреваются. Отвод тепла из активной зоны осуществляется *теплоносителем* — водой. В мощных реакторах зона нагревается до температуры  $300^\circ\text{C}$ . Во избежание закипания вода выводится из активной зоны в парогенератор под давлением порядка  $100 \text{ атм}$  ( $10^7 \text{ Па}$ ). В парогенераторе (теплообменнике) радиоактивная вода (теплоноситель), циркулирующая в первом контуре, отдаёт тепло обычной воде, циркулирующей во втором контуре. Передаваемое тепло превращает воду во втором контуре в пар. Этот пар с температурой около  $230^\circ\text{C}$  под давлением  $30 \text{ атм}$  ( $3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) направляется на лопатки паровой турбины, а она вращает ротор генератора электрической энергии. Конденсация отработанного пара происходит в конденсаторе.

Первая в мире атомная электростанция мощностью  $5 \text{ МВт}$  была построена в  $1954 \text{ г.}$  в нашей стране (г. Обнинск).

Коэффициент полезного действия АЭС зависит, в частности, от КПД парогенератора и турбины. У современных АЭС КПД порядка одной трети. Например, мощность реактора в  $3 \text{ ГВт}$  обеспечивает мощность электрической энергии  $1 \text{ ГВт}$ .

**Ядерная безопасность АЭС.** Учитывая значительную величину тепловой энергии, выделяемой в ядерном реакторе АЭС, решение проблем контроля и ядерной безопасности оказывается жизненно необходимым. Прежде всего следует иметь в виду, что значительная доля тепловой энергии выделяется не в результате цепной реакции деления ядер  $^{235}_{92}\text{U}$ , а как следствие бета-распадов осколков реакции. Даже после завершения цепной реакции, когда регулирующие стержни оказываются полностью погружёнными в активную зону, энергия выделяется в результате продолжающихся бета-распадов. Для реактора мощностью 1 ГВт эта дополнительная тепловая мощность составляет около 200 МВт. В отсутствие охлаждающей воды этой мощности оказывается достаточно для расплавления оболочки реактора и проникновения ядерного топлива в окружающую среду. Подобная авария произошла в 1979 г. на АЭС в Три-Майл-Айленд (США).

В 1986 г. в реакторе третьего энергоблока Чернобыльской АЭС избыточное (по сравнению с необходимым) число регулирующих стержней было удалено из активной зоны реактора. Мощность реактора при этом за 4 с выросла с 1% от нормы в 100 раз по сравнению с нормальной. Взрыв пара разгерметизировал трубы системы охлаждения и повредил бетонную плиту радиационной защиты. Графитовый замедлитель от избыточного тепловыделения сгорел за несколько дней. Выброс радиоактивных веществ в атмосферу составил около  $10^{18}$  Бк. Радиоактивное заражение обширных территорий Украины, Белоруссии и России будет сказываться ещё в течение многих лет (достаточно сказать, что период полураспада плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  — 24 000 лет).

В результате работы АЭС возникают ядерные отходы. Радиоактивность отработавших ТВЭЛов остаётся высокой, представляя опасность для людей спустя 25 000 лет. Отработавшие ТВЭЛы хранят в жидком виде в цистернах из нержавеющей стали, окружённых бетоном. Наиболее активные отходы остекловывают и хранят в глубоких шахтах под землёй.

### В О П Р О С Ы

1. Какое устройство называют ядерным реактором? Когда впервые была осуществлена управляемая цепная реакция деления ядер урана  $^{235}_{92}\text{U}$ ?
2. Перечислите и объясните назначение основных элементов ядерного реактора на схеме (см. рис. 147).
3. В результате каких процессов в ядерном реакторе производится плутоний  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ? Для каких целей он может быть использован?
4. Как происходит преобразование ядерной энергии в электрическую на АЭС? Перечислите и объясните назначение основных элементов принципиальной схемы АЭС (см. рис. 148).
5. Охарактеризуйте основные меры безопасности, необходимые при работе АЭС.



## § 56. Термоядерный синтез

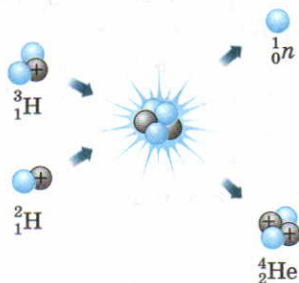
**Термоядерные реакции.** Выделение ядерной энергии может происходить не только при реакции деления ядер, но и при реакции соединения (синтеза) ядер. Выделяющаяся энергия оказывается наибольшей при синтезе ядер лёгких элементов, обладающих минимальной энергией связи (см. рис. 140). При соединении двух лёгких ядер, например дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$ , образуется более тяжёлое ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  с большой энергией связи:



При таком процессе ядерного синтеза выделяется значительная энергия (17,6 МэВ), равная разности энергий связи тяжёлого ядра  ${}^4_2\text{He}$  и двух лёгких ядер  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$ . Образующийся при реакции нейтрон (рис. 150) приобретает 70% этой энергии. Сравнение энергии, проходящейся на один нуклон в реакциях ядерного деления (0,9 МэВ), и синтеза (17,6 МэВ) показывает, что *реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых.*

Слияние ядер происходит под действием сил ядерного притяжения. Поэтому они должны сблизиться до расстояний, меньших  $10^{-14}$  м, на которых действуют ядерные силы. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Для его преодоления ядра должны обладать кинетической энергией, превышающей потенциальную энергию их кулоновского отталкивания.

Поэтому реакции слияния лёгких ядер могут протекать лишь при температурах порядка сотен миллионов градусов и поэтому называются *термоядерными* (от лат. *therme* — тепло).



▲ 150

Термоядерный синтез

**Термоядерный синтез — реакция, в которой при высокой температуре, большей  $10^7$  К, из лёгких ядер синтезируются более тяжёлые.**

Термоядерный синтез — источник энергии всех звёзд, в том числе и Солнца.

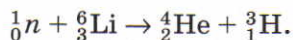
Основным процессом, в котором происходит освобождение термоядерной энергии в звёздах, является превращение водорода в гелий.



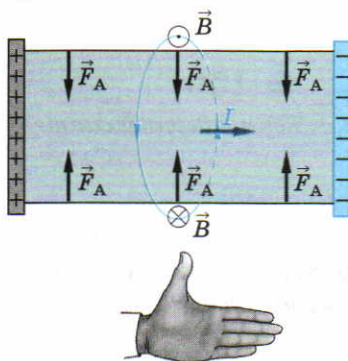
За счёт выделения энергии в этой реакции масса Солнца уменьшается каждую секунду на 4 млн т.

Большую кинетическую энергию, необходимую для термоядерного синтеза, ядра водорода получают в результате сильного гравитационного притяжения к центру звезды.

**Управляемый термоядерный синтез.** Осуществление управляемого термоядерного синтеза (УТС) предоставило бы человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Дейтерий, необходимый для наиболее эффективной реакции (134), содержится в воде морей и океанов (в виде молекул  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{D}_2\text{O}$ ). Его количества хватит на сотни миллионов лет. Тритий можно получать в ядерном реакторе в результате облучения жидкого лития (запасы которого огромны) нейтронами:



Одним из важнейших преимуществ УТС является то, что в отличие от реакций деления тяжёлых ядер в результате термоядерного синтеза не образуются радиоактивные отходы, т. е. не возникает опасность загрязнения окружающей среды. При нагревании газа до температур порядка  $10^7$  К (например, в результате электрического разряда) атомы водорода ионизируются. Поэтому сообщить ионам плазмы достаточную кинетическую энергию можно, приложив к плазме ускоряющее электрическое поле. Разность потенциалов 1 кВ сообщает ядрам дейтерия и трития энергию 1 кэВ или температуру  $1,16 \cdot 10^7$  К (1 эВ соответствует температуре 11 600 К). Такую температуру, конечно, не выдерживают никакие оболочки. Однако удержание в замкнутом объёме движущейся плазмы оказалось возможным с помощью магнитного поля (рис. 151).



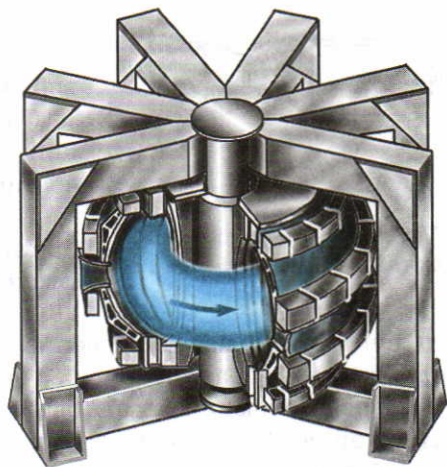
### ▲ 151

*Управляемый термоядерный синтез: удержание плазмы магнитным полем*

При движении заряженных частиц в цилиндрическом объёме плазмы возникает электрический ток. Вокруг тока создаётся магнитное поле, линии индукции которого представляют собой концентрические окружности. На ток со стороны магнитного поля действует сила Ампера, сжимающая плазму и удерживающая её в цилиндрическом объёме. Из-за неоднородности магнитного поля силы сжатия плазмы оказываются различными в разных сечениях электрического разряда. Поэтому на-

рушается конфигурация плазменного столба, разряд становится неустойчивым. Для уменьшения пространственной неоднородности разряда российские физики **А. Д. Сахаров** и **И. Е. Тамм** предложили применять плазменную конфигурацию в форме бублика (тора), которая используется в установке УТС «Токамак» (рис. 152). На этой установке удалось нагреть плазму до температуры  $1,3 \cdot 10^7$  К.

Однако удержать возникающую при этом плазму в течение необходимого для поддержания термоядерной реакции времени пока не удаётся, но существует обоснованная уверенность, что создание термоядерного реактора — дело ближайшего будущего.



▲ 152

Установка «Токамак»

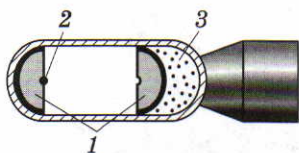
## В О П Р О С Ы

1. Почему синтез лёгких ядер энергетически более выгоден, чем реакция деления тяжёлых?
2. Почему реакции слияния лёгких ядер могут протекать лишь при температурах порядка миллионов градусов?
3. Почему реакции слияния лёгких ядер называют термоядерными? Какую ядерную реакцию называют термоядерным синтезом?
4. В чём преимущества управляемого термоядерного синтеза по сравнению с управляемым делением ядер, осуществляемым в ядерном реакторе?
5. Почему при высоких температурах только магнитное поле может удерживать плазму в замкнутом объёме?

## § 57. Ядерное оружие

**Атомная бомба.** При управляемых цепных реакциях коэффициент размножения нейтронов  $k = 1$ . Если число вторичных нейтронов превосходит число первичных, то  $k > 1$ . При этом возникает неуправляемая цепная реакция деления ядер с огромным выделением энергии — ядерный взрыв. Необходимым условием для осуществления такой реакции является наличие критической массы урана  $^{235}_{92}\text{U}$  или плутония





### ▲ 153

Принципиальная конструкция атомной бомбы

$^{239}_{94}\text{Pu}$  (см. § 54). Превышение критической массы ведёт к неуправляемой реакции взрывного типа.

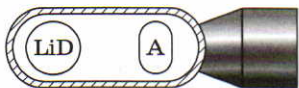
Одна из возможных конструкций атомной бомбы приведена на рисунке 153. В её состав входят два куска урана  $^{235}_{92}\text{U}$  (или плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ) 1, а также источник первичных нейтронов 2. Масса каждого из этих кусков меньше критической. Поэтому в отдельности они взорваться не могут. Однако

их суммарная масса превышает критическую. После выстреливания одного куска урана в другой с помощью запала 3 бомба взрывается.

Первая атомная бомба была испытана США в 1945 г. При взрыве атомной бомбы температура в её эпицентре достигает 100 млн К. При такой температуре резко повышается давление (до  $10^{12}$  атмосфер) и возникает мощная разрушительная ударная волна. Раскалённый газобразный шар, содержащий уран и любые другие вещества, находящиеся поблизости, быстро расширяется, сжигая и разрушая всё на своём пути. Продукты цепной реакции при взрыве радиоактивны и опасны для живых организмов. Взрыв сопровождается интенсивным световым излучением, а также мощной электромагнитной волной, выводящей из строя радиоаппаратуру и средства связи.

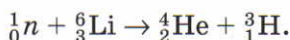
Мощность взрыва характеризуют *тротиловым эквивалентом*. Мощность первого ядерного взрыва составила 20 кт, т. е. при таком взрыве выделяется такая же энергия, как и при взрыве 20 000 т тринитротолуола.

**Водородная бомба.** Неуправляемый термоядерный синтез удалось осуществить при взрыве водородной (термоядерной) бомбы. Одна из возможных конструкций водородной бомбы приведена на рисунке 154. Термоядерным зарядом является твёрдое вещество дейтерид лития  $\text{LiD}$ . В его состав помимо дейтерия входит изотоп лития  $^6_3\text{Li}$ . В качестве запала используется атомная бомба А. Сначала происходит взрыв атомной бомбы. Он сопровождается резким ростом температуры, электромагнитным излучением, а также возникновением мощного потока нейтронов. В результате реакции нейтронов с изотопом лития образуется тритий  $^3_1\text{H}$ :



### ▲ 154

Принципиальная конструкция водородной бомбы



Наличие дейтерия и трития при высокой температуре взрыва атомной бомбы инициирует термоядерную реакцию (117), которая

и даёт основное выделение энергии при взрыве водородной (термоядерной) бомбы. Если корпус бомбы изготовлен из природного урана  $^{238}_{92}\text{U}$ , то быстрые нейтроны (уносящие 70% энергии, выделяющейся при реакции (117)) вызывают в нём новую цепную неуправляемую реакцию деления. Возникает третья фаза взрыва водородной бомбы. Подобным образом создаётся термоядерный взрыв практически неограниченной мощности (рис. 155).

Первая экспериментальная модель водородной бомбы была испытана в СССР в 1953 г.

Ядерное оружие — оружие огромной разрушительной силы, представляющее угрозу существованию человечества. Термоядерный взрыв мощностью 20 Мт уничтожает всё живое на расстоянии до 140 км от его эпицентра. Поэтому жизненно необходимыми являются международные договоры о запрещении ядерных испытаний и о нераспространении ядерного оружия и средств его доставки.



▲ 155

*Термоядерный взрыв в атмосфере*

## В О П Р О С Ы

1. При каком условии возникает неуправляемая цепная реакция деления ядер? Какое значение при этом имеет коэффициент размножения нейтронов?
2. Опишите одну из возможных конструкций атомной бомбы.
3. Какая величина характеризует мощность ядерного взрыва? Какой мощности был взрыв первой в истории атомной бомбы?
4. Чем отличается водородная бомба от атомной?
5. Опишите одну из возможных конструкций водородной бомбы. Какой мощности достигает взрыв водородной бомбы?

## § 58. Биологическое действие радиоактивных излучений

**Воздействие радиоактивного излучения на вещество.** Изучение воздействия радиоактивного излучения на живые организмы становится актуальной задачей современной цивилизации. Использование положительных полезных аспектов этого воздействия и возможное своевременное прогнозирование его негативных последствий представляет в настоящее время практический интерес.

Термин «радиоактивное излучение» подразумевает не только гамма- и рентгеновское излучение, но и продукты радиоактивных превра-



щений: электроны, протоны,  $\alpha$ -частицы, ионы тяжёлых элементов. Его называют также *ионизирующим излучением*, так как, проходя через живую ткань, оно вызывает ионизацию атомов.

Гамма-кванты и рентгеновское излучение вызывают ионизацию атомов в результате фотоэффекта. Электроны упруго и неупруго взаимодействуют с электронными оболочками атомов. Нейтроны, не имеющие электрического заряда, не взаимодействуют с электронными оболочками. При столкновениях с атомными ядрами они либо выбивают из них заряженные частицы, либо захватываются ядрами с последующим альфа- и бета-распадом. Альфа-частицы, обладающие большей массой, также вызывают ионизацию и распад ядер.

Характер воздействия ионизирующего излучения зависит от *дозы поглощённого излучения* и его вида.

**Доза поглощённого излучения** — отношение энергии излучения  $E_{\text{изл}}$ , поглощённой облучаемым телом, к его массе  $m$ :

$$D = \frac{E_{\text{изл}}}{m}.$$

Единица дозы поглощённого излучения — *грэй* (1Гр); 1 Гр = 1 Дж/кг.

1 Гр — доза поглощённого излучения, при которой веществу массой 1 кг передаётся энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

При одной и той же дозе поглощённого излучения разные виды излучения вызывают неодинаковый биологический эффект. Различие биологического действия различных видов излучения характеризуют *коэффициентом относительной биологической активности* (КОБА), или *коэффициентом качества*  $k$ . Коэффициент качества рентгеновского и гамма-излучения принят равным единице. Биологический эффект, вызываемый любым ионизирующим излучением, оценивается в сравнении с эффектом от рентгеновского и гамма-излучения. В таблице 8 приведены коэффициенты качества для различных видов ионизирующих излучений.

**Таблица 8.** Коэффициент качества ионизирующего излучения

Ионизирующее излучение	Рентгеновское излучение, $\gamma$ -излучение	$e^-$	$n$		$p$	$\alpha$
			медленные	быстрые		
$k$	1	1—1,5	3—5	10	10	20

Для оценки действия излучения на живые организмы введена специальная величина — *эквивалентная доза*.

**Эквивалентная доза поглощённого излучения — произведение дозы поглощённого излучения на коэффициент качества:**

$$H = D \cdot k.$$

Единица эквивалентной дозы — *зиверт* (1 Зв).

1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой доза поглощённого гамма-излучения равна 1 Гр.

Величина эквивалентной дозы определяет относительно безопасные и очень опасные для живого организма дозы облучения.

Допустимая доза облучения	< 0,25 Гр
Доза облучения, вызывающая лучевую болезнь	1—6 Гр
Смертельная доза облучения	6—10 Гр

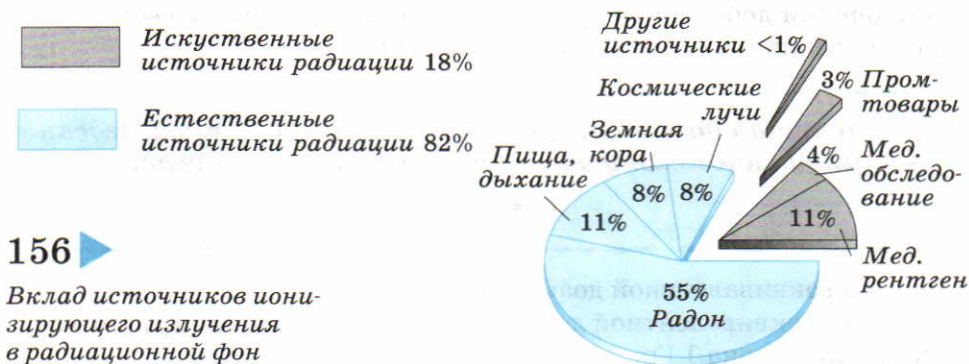
**Естественный радиационный фон.** В любом месте на поверхности Земли, под землёй, в водоёмах, в атмосфере и в космическом пространстве существует ионизирующее излучение, или естественный радиационный фон. *Среднее значение эквивалентной дозы поглощённого излучения, обусловленной естественным радиационным фоном, составляет около 2 мЗв в год.*

Наиболее значительный вклад в естественный радиационный фон вносит радиоактивный радон и продукты его распада, попадающие в организм человека при дыхании. Образуюсь в почве, инертный газ радон выходит в атмосферу. Его концентрация особенно велика в закрытых непроветриваемых помещениях. Процентный вклад различных источников ионизирующего излучения в естественный радиационный фон приведён на рисунке 156.

*Гамма-излучение естественных радиоактивных изотопов земной коры (урана, тория, калия) составляет около 8% естественного фона. Такой же процент составляет космическое излучение — поток  $\gamma$ -квантов и быстрых заряженных частиц, проникающих сквозь атмосферу к поверхности Земли. Кроме внешнего излучения, каждый организм подвергается внутреннему облучению, составляющему 11% естественного радиационного фона. Оно обусловлено естественной радиоактивностью химических элементов, попадающих в организм вместе с пищей, водой и воздухом (углерод, калий, уран, радий, радон).*

Дополнительный вклад (около 18%) в естественный радиационный фон вносят *искусственные источники радиации*, используемые в раз-





## 156

Вклад источников ионизирующего излучения в радиационной фон

витых странах (ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, рентгеновские установки).

Наличие естественного радиационного фона — необходимое условие эволюции жизни на Земле. Обязательным условием эволюции является изменчивость как следствие мутации генов. Одним из факторов, вызывающих мутации, является естественный фон ионизирующей радиации. В отсутствие естественного радиационного фона, вероятно, не было бы и жизни на Земле в её настоящем виде.

Значительные эквивалентные дозы поглощённого излучения могут вызывать в живом организме *острое поражение*, проявляющееся в нарушении функции деления клетки, образовании новых клеток. Острое поражение организма взрослого человека обнаруживается, начиная с пороговой эквивалентной дозы 0,5 Зв.

Повышенная чувствительность к облучению быстро размножающихся клеток обуславливает использование радиоактивного излучения для разрушения клеток злокачественных опухолей.

### В О П Р О С Ы

1. Как определяют дозу поглощённого излучения? В каких единицах она измеряется?
2. Что характеризует коэффициент относительной биологической активности (коэффициент качества)?
3. Дайте определение эквивалентной дозы поглощённого излучения. В каких единицах она измеряется?
4. Какое ионизирующее излучение представляет естественный радиационный фон? Чему равно среднее значение эквивалентной дозы поглощённого излучения, обусловленной естественным радиационным фоном?
5. Охарактеризуйте процентный вклад различных источников ионизирующего излучения в естественный радиационный фон.

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Период полураспада радиоактивного изотопа хрома  ${}^{51}_{24}\text{Cr}$  составляет 27,8 сут. За какое время распадётся 80% атомов?

**Решение**

Согласно закону радиоактивного распада число атомов  $N$ , нераспавшихся за время  $t$ , зависит от их числа  $N_0$  в начальный момент времени  $t = 0$  и периода полураспада  $T_{1/2}$ :

$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}.$$

Перепишем этот закон в виде:

$$2^{t/T_{1/2}} = \frac{N_0}{N}.$$

По условию задачи распалось  $0,8 N_0$  атомов. Это значит, что число нераспавшихся атомов  $N = 0,2 N_0$ . Подставляя  $N$  в закон распада, получаем:

$$2^{t/T_{1/2}} = 5.$$

Логарифмируя последнее уравнение, получаем:

$$(t/T_{1/2}) \lg 2 = \lg 5.$$

Окончательно получаем время, за которое распадётся 80% атомов:

$$t = \frac{\lg 5}{\lg 2} T_{1/2} = 64,5 \text{ сут.}$$

**Ответ:**  $t = 64,5$  сут.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Ядро атома любого химического элемента состоит из **протонов** и **нейтронов**, объединённых общим названием **нуклон**. Заряд протона положителен и равен модулю заряда электрона, нейтрон — не имеет заряда.

Химические свойства элемента определяются зарядовым числом  $Z$ , или числом протонов в ядре.

Нуклоны удерживаются в ядре в результате сильного взаимодействия.

Энергетически выгодно парное расположение нуклонов с антипа-

раллельными спинами в одном энергетическом состоянии ядра.

Наиболее стабильными являются чётно-чётные ядра (состоящие из чётного числа протонов и нейтронов), а среди них — «магические» ядра, у которых число протонов и нейтронов равно одному из чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Радиус ядра зависит от массового числа по закону:

$$R = r_0 A^{1/3},$$

где  $r_0 = 1,2$  фм.



- **Удельная энергия связи** — энергия связи, приходящаяся на один нуклон.
- **Радиоактивность** — явление самопроизвольного (спонтанного) превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц.
- **Естественная радиоактивность** — радиоактивность, наблюдаемая у неустойчивых изотопов, существующих в природе.
- **Искусственная радиоактивность** — радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях.
- **Альфа-распад** — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием  $\alpha$ -частицы.
- **Бета(минус)-распад** — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона и антинейтрино.
- **Энергия распада** — суммарная кинетическая энергия продуктов распада.
- **Гамма-излучение** — электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядер из возбуждённого в более низкое энергетическое состояние.
- **Период полураспада** — промежуток времени, за который распадается половина первоначального числа атомов.
- **Закон радиоактивного распада** — закон убывания числа  $N$  радиоактивных атомов со временем:

$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}},$$

где  $N_0$  — первоначальное число атомов (при  $t = 0$ ),  $T_{1/2}$  — период полураспада.

- **Активность радиоактивного вещества** — число распадов радиоактивных ядер за 1 с. Единица активности — *беккерель* (1 Бк).

1 Бк — активность радиоактивного вещества, в котором за 1 с происходит 1 распад:

$$A = \frac{N}{1,44 T_{1/2}}.$$

- **Энергетический выход реакции деления** — энергия, выделяющаяся при делении одного ядра.
- **Цепная реакция деления** — реакция, при которой число делящихся ядер лавинообразно нарастает. Скорость цепной реакции деления ядер характеризуют коэффициентом размножения нейтронов.
- **Коэффициент размножения нейтронов** — отношение числа нейтронов  $N_i$  в данном поколении цепной реакции к их числу  $N_{i-1}$  в предыдущем поколении:

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}.$$

При  $k = 1$  реакция протекает стационарно: число нейтронов сохраняется неизменным.

При  $k > 1$  реакция нестационарна: число нейтронов лавинообразно нарастает.

- **Критическая масса** — минимальная масса урана, начиная с которой реакция деления ядер становится самоподдерживающейся. Самоподдерживающаяся реакция деления ядер возникает, если за время пролёта нейтроном среды успевает образоваться новый нейтрон в результате реакции деления.
- **Ядерный реактор** — устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер. **Мощность реактора** — количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени.

- **Термоядерный синтез** — реакция, в которой при высокой температуре, большей  $10^7$  К, из лёгких ядер синтезируются более тяжёлые.

Характер воздействия радиоактивного излучения на живой организм зависит от дозы поглощённого излучения и его вида.

- **Доза поглощённого излучения** — отношение энергии  $E_{\text{изл}}$  излучения, поглощённой облучаемым телом, к его массе  $m$ :

$$D = \frac{E_{\text{изл}}}{m}.$$

Единица дозы поглощённого излучения — *грэй* (1 Гр); 1 Гр = 1 Дж/кг.

- **Коэффициент относительной биологической активности, или коэффициент качества  $k$** , характеризует различие биологического действия различных видов излучения.

Эквивалентная доза поглощённого излучения — произведение дозы поглощённого излучения на коэффициент качества:

$$H = Dk.$$

Единица эквивалентной дозы — *зиверт* (1 Зв).

Среднее значение эквивалентной дозы поглощённого излучения, обусловленной естественным радиационным фоном, составляет около 2 мЗв в год.





## Элементарные частицы

### § 59. Классификация элементарных частиц

**Фермионы, бозоны.** Из чего состоит окружающий мир? Что представляют из себя самые первичные фундаментальные частицы, из которых состоят все остальные? Учёные и философы пытаются ответить на эти вопросы в течение всей истории человечества. В настоящее время нет окончательных ответов, но учёными пройден большой путь и можно подвести некоторые итоги.

До 1932 г. были известны три фундаментальные частицы: электрон, протон, нейтрон, а также фотон, переносящий электромагнитное взаимодействие. Казалось, что из этих частиц можно построить целостную картину материального мира. Протоны и нейтроны, образующие ядро, вместе с электронами составляют атомы, из атомов комбинируются молекулы, которые, объединяясь друг с другом, образуют вещество.

Конечно, возникает и обратный вопрос, связанный с поиском фундаментальных частиц: сколь долго можно дробить вещество и каких энергетических затрат потребуют эти исследования? Атом можно разделить на ядро и электроны, для этого потребуется энергия порядка 10 эВ. Для расщепления ядра нужно затратить энергию, в миллион раз большую, около 10 МэВ. Чем на более мелких масштабах изучается структура, тем большая энергия (в соответствии с соотношением неопределённостей Гейзенберга) требуется для локализации частиц. При этом возникает и принципиальный вопрос: напоминает ли структура вещества бесконечную череду вложенных друг в друга матрёшек или процесс деления прерывается, когда обнаруживается неделимая элементарная частица?

**Элементарная частица — микробъект, который невозможно расщепить на составные части.**

Ряд элементарных частиц (например, адроны) имеет сложную внутреннюю структуру, но разделить их на части оказывается невозможно. Другие элементарные частицы являются бесструктурными и могут рассматриваться как первичные *фундаментальные частицы*.

**Фундаментальные частицы — бесструктурные элементарные частицы, которые до настоящего времени не удалось описать как составные.**

Начиная с 1932 г. было открыто более 400 элементарных частиц. Для их классификации используют такие физические величины, как масса частицы, величина электрического заряда, спин, время жизни, а также некоторые другие, необходимость введения которых мы обсудим позже.

По величине спина (собственного момента количества движения) все частицы делятся на два класса: *фермионы* и *бозоны* (см. табл. I на цветной вклейке, с. 256).

*Фермионы — частицы с полуцелым спином:  $\hbar/2, 3\hbar/2, \dots$* . К фермионам относятся, например, электрон  $e^-$ , протон  $p$ , нейтрон  $n$ , электронное нейтрино  $\nu_e$ .

*Бозоны — частицы с целым спином:  $0, \hbar, 2\hbar, \dots$* . К бозонам относятся, например, фотон  $\gamma$ ,  $\pi^+$ -мезон.

Для распределения фермионов по возможным энергетическим состояниям справедлив принцип Паули.

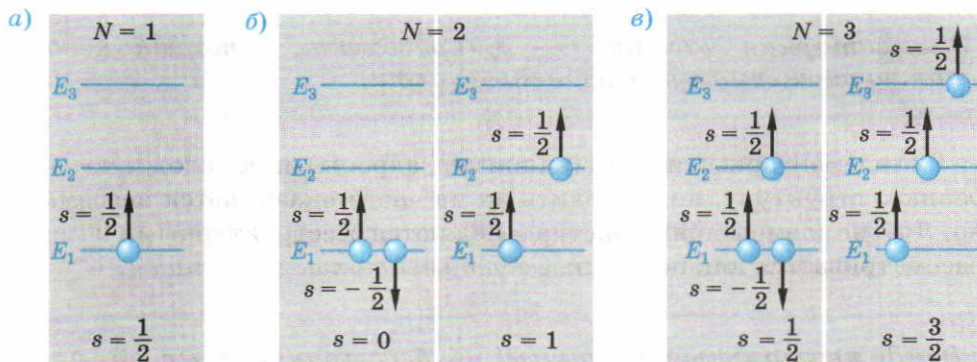
### Принцип Паули

**В одном и том же энергетическом состоянии могут находиться не более двух фермионов с противоположными спинами.**

Для бозонов принципа Паули не существует, поэтому в одном энергетическом состоянии может находиться любое число бозонов.

В соответствии с принципом Паули рассмотрим в качестве примера распределение фермионов по трём возможным энергетическим состоя-





### ▲ 157

Распределение фермионов по энергетическим уровням:

а)  $N = 1$ ; б)  $N = 2$ ; в)  $N = 3$

ниям системы  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  (рис. 157). При наличии одного фермиона наиболее вероятно, что он расположится в состоянии с минимальной энергией  $E_1$ , имея спиновое число  $s = 1/2$  (спиновый момент —  $\hbar/2$ ) (рис. 157, а). Два из возможных распределений двух фермионов по энергиям приведены на рисунке 157, б. Спин фермиона может иметь две ориентации, поэтому результирующее спиновое число может принимать значения  $S = 0$ ; 1. Это означает, что система из двух фермионов может рассматриваться как бозон, обладающий целым спином 0 или  $\hbar$ .

Спин системы из трёх фермионов принимает полуцелые значения  $\hbar/2$  и  $3\hbar/2$  (рис. 157, в).

**Античастицы.** Элементарные частицы существуют в двух разновидностях: частицы и античастицы. Каждой элементарной частице должна соответствовать *античастица*.

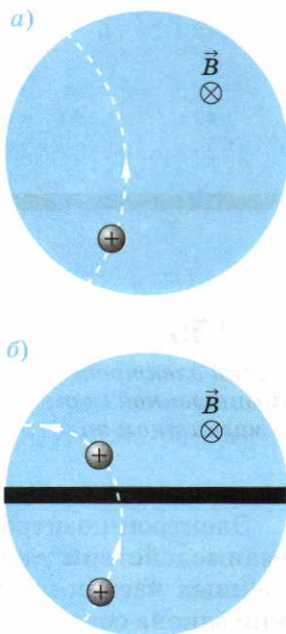
**Античастица  $\bar{a}$  (элементарной частицы  $a$ ) — элементарная частица, имеющая (по отношению к  $a$ ) равную массу, одинаковый спин, время жизни и противоположный заряд.**

Первая античастица была обнаружена в 1932 г. американским физиком **Карлом Андерсоном**. Фотографируя траекторию частиц космических лучей в камере Вильсона (в которой в месте пролёта заряженной частицы образуются ионы и конденсируется пар, заполняю-

ций камеру), Андерсон обнаружил трек, принадлежащий частице с массой электрона. В перпендикулярном магнитном поле частица двигалась по окружности радиусом  $R = m_e v / (eB)$  (см. § 15, формула (31)). Её направление движения было неизвестно и зависело от знака заряда (рис. 158, а). Если частицей был электрон, то он должен был двигаться сверху вниз. Для определения направления движения частицы Андерсон разместил на её пути свинцовую пластинку толщиной 6 мм, тормозившую частицу. Соответственно после прохождения частицей пластинки радиус окружности трека должен уменьшиться (рис. 158, б).

Результаты опыта показали, что частица движется снизу вверх, а следовательно, обладает положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона. Античастица электрона (антиэлектрон) была названа *позитроном* (от лат. *positivus* — положительный) и получила обозначение  $e^+$ .

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



▲ 158

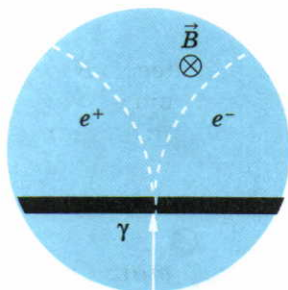
Трек позитрона в камере Вильсона в магнитном поле:  
а) без свинцовой пластинки;  
б) со свинцовой пластинкой

**Аннигиляция** — процесс взаимодействия элементарной частицы с её античастицей, в результате которого они превращаются в  $\gamma$ -кванты (фотоны) электромагнитного поля или другие частицы.

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

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma.$$





### 159

Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле

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

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

Электрически нейтральный квант превращается в частицы, общий заряд которых равен нулю. Для рождения пары у  $\gamma$ -кванта должна быть достаточная минимальная энергия, равная энергии покоя частицы, —  $m_e c^2 = 0,51$  МэВ. При больших энергиях возможно рождение частиц большей массы.

На рисунке 159 показаны треки электрона и позитрона в камере Вильсона в магнитном поле после рождения электрон-позитронной пары, возникающей при взаимодействии  $\gamma$ -кванта со свинцовой пластиной. Сила Лоренца действует на разноименно заряженные частицы в противоположные стороны, чем и объясняется их закручивание в разных направлениях.

## В О П Р О С Ы

1. Дайте определения элементарных и фундаментальных частиц.
2. Чем отличаются фермионы от бозонов?
3. Сформулируйте принцип Паули. Как распределяются фермионы по энергетическим состояниям?
4. Сформулируйте принцип зарядового сопряжения. Как была обнаружена первая античастица — позитрон?
5. Охарактеризуйте такие процессы взаимопревращения частиц, как аннигиляция и рождение пары.

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

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

При аннигиляции протона и антипротона выделяется энергия, примерно в 2000 раз большая, чем при термоядерном взрыве.

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

*Рождение пары — процесс, обратный аннигиляции.*

## § 60. Лептоны и адроны

**Лептоны.** Многочисленные элементарные частицы удобнее классифицировать по видам взаимодействий, в которых они участвуют. Так, по отношению к сильному взаимодействию все элементарные частицы делятся на две большие группы: *адроны* (от греч. hadros — большой, сильный) и *лептоны* (от греч. leptos — лёгкий).

**Лептоны — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.**

Все лептоны являются фермионами — они обладают полуцелыми спинами  $\hbar/2$ . К лептонам относят 12 частиц: электрон  $e^-$ , мюон  $\mu^-$  (в 207 раз тяжелее электрона), таон  $\tau^-$  (массой в 3492 раза большей массы электрона), электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$ , таонное  $\nu_\tau$  и соответствующие античастицы. В реакциях слабого взаимодействия соответствующее нейтрино всегда возникает вместе с определённым лептоном. Поэтому выделяют три лептон-нейтринных дублета.

Например, при бета-распаде рождается электрон и электронное антинейтрино

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

а при распаде таона возникает мюон вместе со своим антинейтрино

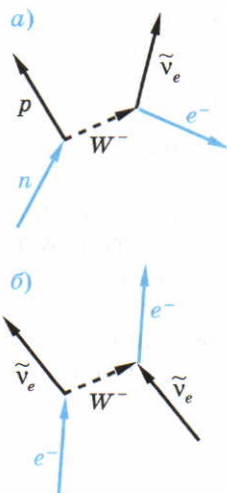
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau.$$

Как и любое взаимодействие, слабое взаимодействие лептонов обусловлено обменом виртуальных частиц.

Переносчиками слабого взаимодействия являются три промежуточных векторных бозона: два заряженных  $W^+$  и  $W^-$  (от англ. weak — слабый) и нейтральный  $Z^0$ -бозон. Массы промежуточных бозонов были определены экспериментально в 1983 г. группой европейских учёных под руководством **Карло Руббиа** и **Симона Ван дер Меера**.

Массы бозонов оказались равными  $m_W = 81$  ГэВ и  $m_Z = 91$  ГэВ.

При бета-распаде нейтрон распадается на протон и промежуточный бозон  $W^-$ , затем промежуточный бозон  $W^-$  распадается на электрон и электронное антинейтрино (рис. 160).



▲ 160

Слабое взаимодействие с участием  $W^-$ -бозона



**Адроны.** К классу адронов в настоящее время относят около 300 элементарных частиц, участвующих в сильном взаимодействии.

**Адроны — элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.**

В зависимости от значения спина адроны делятся на две группы: *мезоны* (от греч. meso — средний) и *барионы* (от греч. barys — тяжёлый).

**Мезоны — бозоны со спином, равным 0,  $\hbar$ , участвующие в сильном взаимодействии.**

**Барионы — фермионы со спином, равным  $\hbar/2$ ;  $3\hbar/2$ , участвующие в сильном взаимодействии.**

В свою очередь, в группе барионов выделяют подгруппы: *нуклоны* (протоны и нейтроны) с  $s = 1/2$  и *гипероны* (все остальные барионы) с  $s = 1/2$ ;  $3/2$  (табл. 9). За исключением протона, являющегося стабильной частицей (во всяком случае, его время жизни превышает  $10^{31}$  лет), все другие адроны распадаются. Наиболее быстрый распад (в течение  $10^{-23}$  с) адронов происходит за счёт сильного взаимодействия, более медленный ( $10^{-20}$  с) — за счёт электромагнитного и самый медленный (1 нс) — при слабом взаимодействии.

Записывая уравнение ядерных реакций, мы следили за тем, чтобы сумма нижних (зарядовое число) и верхних индексов (массовое число) была одинакова в обеих частях уравнения. Сохранение зарядового числа отражает закон сохранения электрического заряда, а сохранение массового числа — закон сохранения массы, или сохранение числа нуклонов. Нуклоны относятся к группе барионов, для которых также выполняется закон сохранения числа барионов, или закон сохранения барионного заряда.

**Таблица 9. Классификация адронов**

Адроны		
Мезоны ( $s = 0, 1$ ) $\pi^0, \pi^+, \pi^-$ , $K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0, \eta^0$	Барионы	
	Нуклоны ( $s = 1/2$ ) $p, \bar{p}, n, \bar{n}$	Гипероны ( $s = 1/2, 3/2$ ) $\Lambda^0, \bar{\Lambda}^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, \bar{\Sigma}^0$ , $\Xi^0, \bar{\Xi}^0, \Xi^-, \Xi^+, \Omega^-, \Omega^+$

## Закон сохранения барионного заряда

**Во всех взаимодействиях барионный заряд сохраняется.**

Массовое число  $A$  является барионным зарядом  $B$  ядра:  $B = A$ . Для всех барионов  $B = 1$ , у антибарионов  $B = -1$ , у частиц, не являющихся барионами,  $B = 0$ . При  $\beta$ -распаде

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Закон сохранения барионного заряда имеет вид (с учётом того, что  $e^-$  и  $\bar{\nu}_e$  не являются барионами)

$$1 = 1 + 0 + 0.$$

В О П Р О С Ы

1. На какие две группы делятся все элементарные частицы по отношению к сильному взаимодействию?
2. Какие фундаментальные частицы относят к лептонам?
3. Какие элементарные частицы относят к адронам?
4. Какие частицы переносят слабое взаимодействие? Когда они были открыты?
5. Как происходит бета-распад с участием промежуточного  $W$ -бозона?

## § 61. Кварки

**Структура адронов. Кварки.** В среднем бóльшие массы адронов по сравнению с лептонами позволили в 1963 г. американским физикам-теоретикам *Мюррею Геллману* и *Джорджу Цвейгу* предположить, что адроны являются составными частицами. В частности, нуклоны (протоны и нейтроны), согласно их гипотезе, состоят из трёх фундаментальных, электрически заряженных частиц, названных *кварками*. Наличие этих частиц можно обнаружить, например, при рассеянии частиц высоких энергий.

Экспериментальное подтверждение кварковой структуры нуклонов было получено в 1969 г. в Стэнфорде, где изучалось рассеяние электронов с энергией 20 ГэВ на протонах и нейтронах. Подобно тому как в опыте Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц было обнаружено атомное ядро в центре атома, так в Стэнфордском эксперименте было обнаружено пространственное распределение электрического заряда в нуклоне. При увеличении энергии рассеивающихся электронов до 50 ГэВ удалось установить существование трёх точечных зарядов в нуклонах. Эти частицы, свободно перемещающиеся внутри нуклона, как три пчелы в стака-



не, и есть кварки. Их заряд может быть как положительным, так и отрицательным.

Выясним основные характеристики кварков. Известно, что нуклоны имеют полуцелый спин ( $s = 1/2$ ), т. е. являются фермионами. Если предположить, что все кварки имеют одинаковый спин (т. е. являются либо бозонами, либо фермионами), то он обязательно должен быть полуцелым. Только при сложении трёх полуцелых спинов кварков можно получить полуцелый спин нуклона (см. рис. 157, в).

Найдём теперь возможные электрические заряды кварков, обозначив их соответственно  $Q$  и  $q$ . Учитывая различие электрических зарядов электронейтрального нейтрона и протона (заряд  $+e$ ), их кварковый состав должен быть различным. Если нейтрон состоит из одного кварка с зарядом  $Q$  и двух кварков с зарядом  $q$ , то протон будет иметь противоположный состав: два кварка с зарядом  $Q$  и один с зарядом  $q$ .

Тогда заряд нейтрона и протона можно представить в виде

$$\begin{cases} 0 = Q + 2q, \\ e = 2Q + q. \end{cases}$$

Решение системы двух уравнений с двумя неизвестными даёт величины зарядов кварков:

$$Q = +\frac{2}{3}e, \quad q = -\frac{1}{3}e.$$

Характерной особенностью кварков, не встречающейся у других частиц, является дробный электрический заряд. Кварк с зарядом  $+\frac{2}{3}e$  назвали  $u$ -кварком (от англ. up — вверх), а кварк с зарядом  $-\frac{1}{3}e$  —  $d$ -кварком (от англ. down — вниз).

Тогда кварковый состав протона можно представить как  $uud$ , а нейтрона —  $udd$ . Видно, что отличие состава нейтрона от протона состоит в замене одного  $u$ -кварка на  $d$ -кварк. Так как массы нейтрона и протона очень близки друг другу, то должны быть близки и массы кварков. Нейтроны чуть тяжелее протона (на  $2,5m_e$ ), поэтому  $d$ -кварк должен быть чуть тяжелее  $u$ -кварка. В качестве оценки можно считать, что масса кварка должна составлять примерно треть массы нуклонов. Действительно, масса  $u$ -кварка 330 МэВ, а  $d$ -кварка 333 МэВ. (Напомним, что масса протона 938,3 МэВ, а масса нейтрона 939,6 МэВ.)

Ещё одной важной характеристикой кварка является его *барионный заряд*.

Барионный заряд кварков принят равным  $1/3$ , что даёт для барионов (протона и нейтрона)  $B = 1$ . Сохранение барионного заряда объясняет невозможность распада протона на более мелкие частицы.

Для антикварков  $\bar{u}$  и  $\bar{d}$  электрические и барионные заряды имеют противоположные знаки.

После обнаружения элементарных частиц, состоящих из всех комбинаций  $u$ - и  $d$ -кварков, были открыты тяжёлые адроны, для объяснения свойств которых пришлось использовать ещё две пары кварков:  $s$  (от англ. strange — странный) и  $c$  (от англ. charmed — очарованный), а также  $b$  (от англ. beauty — красота) и  $t$  (от англ. truth — правда). Массы этих кварков заметно превышают массы  $u$ - и  $d$ -кварков, так как они входят в состав адронов, более тяжёлых, чем нуклоны. Все кварки — фермионы. Они имеют полуцелый спин, так как адроны являются фермионами.

Различные типы кварков называют ароматом. В таблице 10 приведены основные характеристики кварков и антикварков.

**Таблица 10. Характеристики кварков и антикварков**

Кварк (аромат) $s = 1/2$	$q$	$B$	Антикварк (аромат) $s = 1/2$	$q$	$B$
$u, c, t$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$
$d, s, b$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$

## В О П Р О С Ы

1. В чём состояла кварковая гипотеза М. Геллмана и Д. Цвейга? Какие эксперименты подтвердили существование трёх точечных зарядов в нуклонах?
2. Почему спин кварков полуцелый?
3. Приведите расчёт электрических возможных зарядов кварков. Как называли эти кварки?
4. Какие законы сохранения отражали сохранение в ядерных реакциях зарядового и массового числа? Сформулируйте закон сохранения барионного заряда. Как он подтверждает невозможность распада бариона на более мелкие частицы?
5. Приведите важнейшие характеристики основных типов кварков.

## § 62. Взаимодействие кварков

**Цвет кварков.** Согласно кварковой модели некоторые барионы должны были состоять из кварков только одного аромата (типа). Например,  $\Delta^{++}$ -барион состоял из трёх одинаковых  $u$ -кварков, являющихся фермионами, что невозможно по принципу Паули. Для выхода из затруднительного положения была выдвинута гипотеза, что эти кварки отли-



чаются *цветом*. Согласно этой гипотезе каждый тип (аромат) кварков может иметь *три цветовых заряда*: красный, зелёный и синий. Конкретный *u*-кварк определённо окрашен, он несёт один из трёх цветовых зарядов: либо красный  $u_k$ , либо зелёный  $u_z$ , либо синий  $u_c$ . Поэтому кварки, входящие в  $\Delta^{++}$ -барион, не одинаковы, а отличаются цветом. Его состав можно представить в виде  $(u_k u_z u_c)$ .

Реально, конечно, кварки не окрашены. Но эта удобная аналогия с цветом позволяет легче запомнить и оперировать сложными понятиями.

Цветовой заряд является характеристикой взаимодействия кварков, но не адронов в целом. *Все адроны цветонейтральны* (так же как электронейтрален нейтрон). Все цвета представлены в равных количествах: известно, что при смешении в необходимой пропорции красного, зелёного и синего света глаз воспринимает свет как белый.

Отдельный кварк имеет цвет и поэтому не может существовать в свободном состоянии. Воспользуемся аналогией: атом — бесцветный, а ион — цветной. Ион имеет большую энергию и старается присоединить антицветной электрон, чтобы, образовав атом, стать бесцветным.

Подобным образом цветные кварки, притягивая друг друга, образуют бесцветные комплексы, например нуклоны (рис. XII на цветной вклейке, с. 256).

Протоны и нейтроны состоят из кварков, но выделить кварки нельзя. Свободные кварки не наблюдаемы. Это принципиально ограничивает бесконечное дробление материи.

Каждый барион, являясь фермионом, состоит из трёх ароматов разного цвета. В целом барион — цветонейтрален.

Мезоны, как и все адроны, цветонейтральны. Являясь бозонами, мезоны имеют целый спин. Это означает, что мезон может состоять из двух кварков, имеющих полуцелый спин. Для того чтобы мезон имел целочисленный заряд и был цветонейтральным, он должен состоять из кварка и антикварка. При этом ароматы кварка и антикварка могут быть любыми, а цветовые заряды обязательно противоположными (цвет — антицвет). Антикварки имеют антицвет, как бы нейтрализующий цвет: антикрасный  $\bar{k}$  (фиолетовый), антизелёный  $\bar{z}$  (красный), антисиний  $\bar{c}$  (жёлтый). На рисунке XIII на цветной вклейке (с. 256) приведена кварковая структура мезонов. Барионный заряд мезона равен нулю:  $(1/3 - 1/3) = 0$ .

Таким образом, с помощью определённой комбинации разноцветных кварков можно построить любой адрон. Учитывая, что существует 6 кварков и 6 антикварков, каждый из которых может иметь 3 цвета, полное число кварков — 36.

**Фундаментальные частицы.** В настоящее время фундаментальными частицами считают кварки и лептоны.

Кварки — фундаментальные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

*Лептоны — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.* Лептонов и антилептонов — 12.

Все фундаментальные частицы являются фермионами.

Учитывая, что известно 6 кварков и 6 лептонов, можно говорить о *кварк-лептонной симметрии мира*.

Лептоны и кварки образуют начальный структурный уровень организации материи.

Окружающая Вселенная состоит из 48 фундаментальных частиц.

**Взаимодействие кварков. Глюоны.** Сильное взаимодействие между кварками осуществляется при обмене *глюонами* (от англ. glue — клей).

*Глюон — бозон со спином  $\hbar$ , переносчик сильного взаимодействия.* Глюон электрически нейтрален и не имеет массы покоя. Фотон, являясь переносчиком электромагнитного излучения, не переносит заряд. Глюон переносит цветовой заряд: цвет — антицвет. Учитывая, что существует 3 цвета и 3 антицвета, полное число их парных комбинаций (цвет — антицвет) должно равняться  $3 \cdot 3 = 9$ . Однако комбинации: красный — антикрасный, зелёный — антизелёный, синий — антисиний — бесцветны. Поэтому цветовой заряд несут лишь 6 глюонов. Как следует из теории, называемой квантовой хромодинамикой (от греч. *chroma* — цвет), бесцветных глюонов — 2. Тогда *полное число глюонов оказывается равным восьми*.

Общая закономерность в систематике элементарных частиц заключается в том, что все фундаментальные частицы (а их 48) являются фермионами, а все переносчики взаимодействия — бозонами (их 13) (табл. II на цветной вклейке, с. 257).

Поглощение или излучение глюона, несущего цветовой заряд, изменяет цвет кварка, но не его аромат. Зелёно-антисиний заряд, уносимый глюоном  $g_{\bar{3}c}$  из зелёного кварка  $u_3$ , изменяет его цвет на синий, дополнительный к антицвету (рис. XIV, *а* на цветной вклейке, с. 257). При поглощении зелёным кварком  $u_3$  глюона  $g_{\bar{3}c}$ , переносящего красно-антизелёный цветовой заряд, зелёный и антизелёный цвета нейтрализуются, а цвет кварка становится красным —  $u_k$  (рис. XIV, *б* на цветной вклейке, с. 257). Обмениваясь глюонами, кварки как бы обмениваются местами. Таким образом происходит, например, взаимодействие кварков в нейтроне (рис. XV, *а* на цветной вклейке, с. 257). Излучение красным кварком глюона, переносящего красно-антисиний заряд, приводит к цветовому обмену кварков. Процесс цветового



обмена кварков изображён на диаграмме Фейнмана (рис. XV, б на цветной вклейке, с. 257).

*При всех ядерных распадах, идущих через слабое взаимодействие, изменяются ароматы кварков.* Например, при бета-распаде в результате излучения промежуточного бозона изменяется аромат кварка с  $d$  на  $u$  (рис. XVI на цветной вклейке, с. 257). *Цветовой заряд кварка при слабом взаимодействии не изменяется.* В результате нейтрон превращается в протон.

Теория элементарных частиц в настоящее время не завершена и продолжает активно разрабатываться. Предпринимаются попытки построения единой теории всех четырёх типов взаимодействия — суперсимметрии, или супергравитации. Новые подходы позволяют глубже понять не только природу фундаментальных частиц, но и природу пространства и времени.

### В О П Р О С Ы

1. Какие цветовые заряды имеют кварки, адроны? Наблюдаемы ли кварки в свободном состоянии?
2. Почему мезон состоит из кварка и антикварка? Чему равен барионный заряд мезона?
3. Что такое кварк-лептонная симметрия? Сколько фундаментальных частиц образуют Вселенную?
4. Перечислите и охарактеризуйте частицы-переносчики фундаментальных взаимодействий.
5. Какая характеристика кварка изменяется при сильном взаимодействии (обмене глюонами) и при слабом взаимодействии (при излучении промежуточного бозона)?

### О С Н О В Н Ы Е   П О Л О Ж Е Н И Я

- **Элементарная частица** — микроскопический объект, который невозможно расщепить на составные части.
- **Фундаментальные частицы** — бесструктурные элементарные частицы, которые до настоящего момента времени не удалось описать как составные.
- **Фермионы** — частицы с полуцелым спином:  $\hbar/2$ ,  $3\hbar/2$ . К фермионам относят, например, электрон, протон, нейтрон, электронное нейтрино.
- **Бозоны** — частицы с целым спином:  $0$ ,  $\hbar$ ,  $2\hbar$ . К бозонам относят, например, фотон,  $\pi^+$ -мезон.
- **Принцип Паули:** в одном и том же энергетическом состоянии могут находиться не более двух фермионов с противоположными спинами. Для каждой элементарной частицы должна существовать античастица.
- **Античастица частицы  $a$**  — элементарная частица  $\bar{a}$ , имеющая

с частицей  $a$  равную массу покоя, одинаковый спин, время жизни и противоположный заряд.

■ **Аннигиляция** — процесс взаимодействия элементарной частицы с её античастицей, в результате которого они превращаются в  $\gamma$ -кванты (фотоны) электромагнитного поля или в другие частицы.

■ **Рождение пары** — процесс, обратный аннигиляции.

■ **Адроны** — элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

■ **Лептоны** — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.

■ **Мезоны** — бозоны со спиновым числом  $S = 0; 1$ , участвующие в сильном взаимодействии.

■ **Барионы** — фермионы со спином  $S = 1/2; 3/2$ , участвующие в сильном взаимодействии.

■ **Гипероны** — все барионы за исключением нуклонов (протонов и нейтронов).

■ **Кварки** — фундаментальные частицы, участвующие в сильном взаимодействии. Кварки являются фермионами и имеют дробный

электрический заряд  $\pm \frac{2e}{3}, \pm \frac{e}{3}$  и

дробный барионный заряд  $\pm \frac{1}{3}$ .

■ **Закон сохранения барионного заряда:** во всех взаимодействиях барионный заряд сохраняется.

■ Кварки имеют шесть ароматов  $u, d, s, c, t, b$  и три цвета — красный, зелёный и синий. Всего (вместе с антикварками) 36 кварков.

■ Все адроны цветонейтральны. Каждый барион, являясь фермионом, состоит из трёх ароматов разного цвета. Мезоны, являясь бозонами, состоят из кварка и антикварка любого аромата и противоположного цвета.

■ Окружающий мир состоит из 48 фундаментальных частиц — фермионов (36 кварков и 12 лептонов).

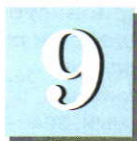
■ **Глюон** — бозон со спином  $\hbar$ , переносчик сильного взаимодействия. Всего 8 глюонов (6 из них переносят цветовой заряд, а 2 бесцветны).

Полное число переносчиков фундаментальных взаимодействий — бозонов — равно 13.



# ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОФИЗИКИ

---



## Эволюция Вселенной

### § 63. Структура Вселенной

**Астрономические структуры.** Изучение окружающего мира до сих пор проводилось нами как последовательный переход от рассмотрения макроскопических структур, размером порядка Солнечной системы  $10^{16}$  м, к анализу явлений в микромире на масштабах порядка  $10^{-18}$  м. Однако Солнечная система уникальна, но не единственна. Такие астрономические объекты, как звёзды, планеты, астероиды, кометы, метеориты, могут существовать во Вселенной и вне Солнечной системы, пространственно группируясь в астрономические структуры. В этой главе мы пойдём вверх по масштабной шкале, для того чтобы изучить мегаструктуры за пределами Солнечной системы вплоть до размеров видимой Вселенной порядка  $10^{26}$  м.

Выбор минимального пограничного масштаба ( $10^{16}$  м) оказывается не случайным. Такое расстояние характеризует *световой год* — расстояние, проходимое световым лучом за один год

$$1 \text{ св. г.} = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 9,46 \cdot 10^{15} \approx 10^{16} (\text{м}).$$

Изучение мегаструктур проводится методами *астрофизики*.

---

***Астрофизика — раздел астрономии, изучающий физические свойства астрономических объектов.***

---

Особенности эволюции объектов во Вселенной являются предметом изучения *космологии* (от греч. *κοσμολογία* — изучение мира). *Космоло-*

гия — теоретическая астрофизика мегамасштабов, изучающая строение и эволюцию Вселенной как целого.

Охарактеризуем сначала особенности распределения в пространстве астрономических объектов. В таблице 11 приведены средние размеры неоднородностей пространственного распределения объектов — основных астрономических структур — в порядке возрастания их размера.

**Таблица 11. Средний размер астрономических структур**

Астрономическая структура	Планетная система	Ближайшие звёзды	Звёздное скопление	Галактика	Скопления галактик	Сверхскопления галактик	Наблюдаемая Вселенная
Средний размер, св. лет	1	10	100	100 тыс.	10 млн	100 млн	14 млрд

На рисунке 161 показано пространственное расположение 22 ближайших к Солнечной системе звёзд. Скопление звёзд, расположенных на расстоянии не более 250 св. лет от Солнца, изображено на рисунке 162.

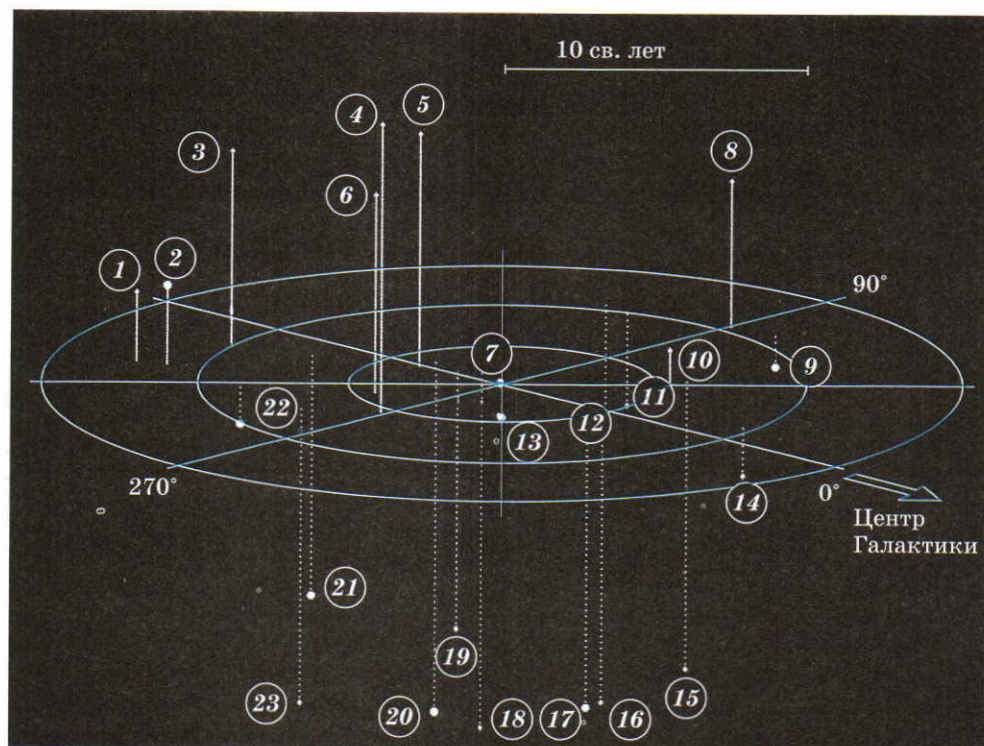
Огромные расстояния между звёздами создают ощущение статичности Вселенной при наблюдении звёздного неба невооружённым глазом. Даже при значительных (по земным масштабам) относительных скоростях движения звёзд (порядка 300 км/с) их перемещение за время порядка часа составляет около  $10^9$  м ( $3 \cdot 10^5$  м/с  $\cdot 3,6 \cdot 10^3$  с).

При расстоянии до звёзд порядка 100 св. лет ( $\approx 10^{18}$  м) угловое перемещение звезды составит лишь  $10^9/10^{18} \cdot 10^{-9}$  рад =  $(2 \cdot 10^{-4})''$ . Под таким углом зрения можно наблюдать невооружённым глазом из Москвы кедровый орешек в Хабаровске.

Следующей по размеру астрономической структурой после звёздного скопления является галактика. Солнечная система, находясь на расстоянии  $r = 28\,000$  св. лет от центра нашей Галактики — Млечного Пути (рис. 163), совершает один оборот вокруг него за период  $T = 230$  млн лет. По этим данным с помощью второго закона Ньютона можно оценить массу  $M_G$  Галактики:

$$M_G = 2 \cdot 10^{41} \text{ кг.}$$





### ▲ 161

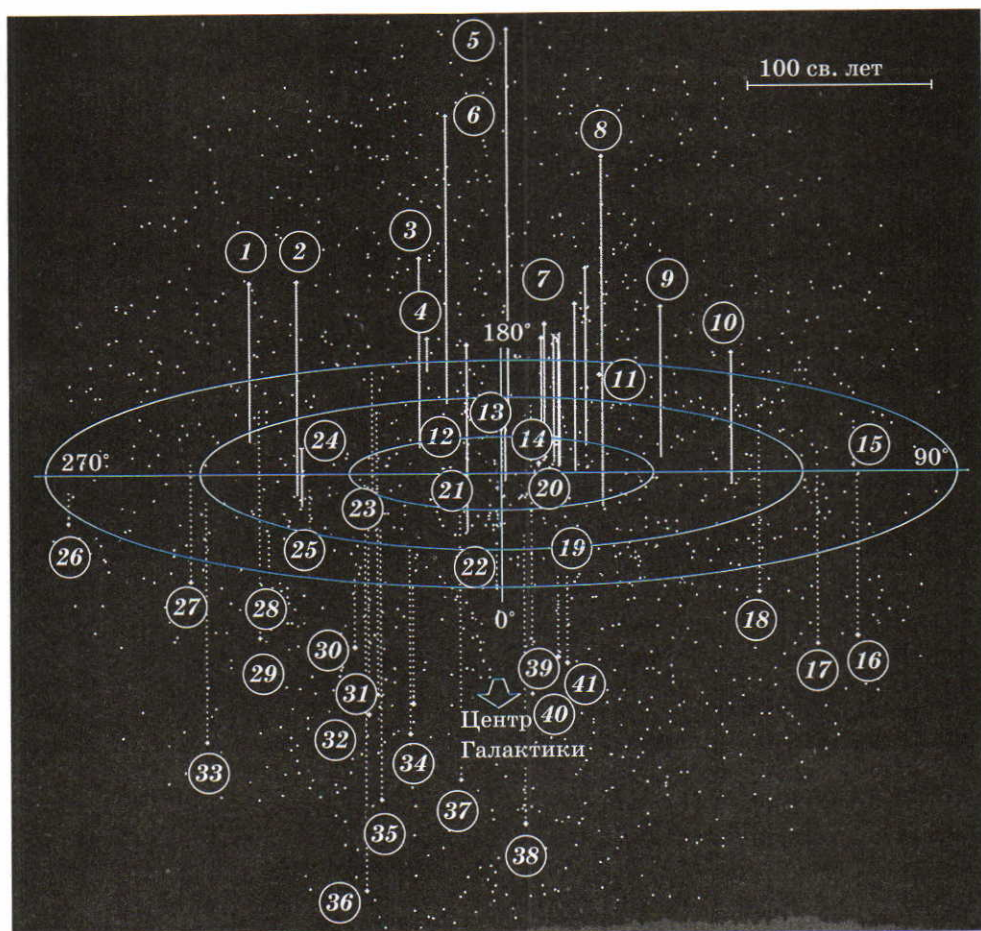
Пространственное расположение звёзд, ближайших к Солнцу:

1. Звезда Лейтена; 2. Процион; 3. G51-15; 4. Росса 128;
5. Лаланд 21185; 6. Вольф 359; 7. Солнце;
8. Струве 2398; 9. Лебедя 61; 10. Звезда Барнарда;
11. Росса 248; 12. Грумбридж 34;
13. Проксима (α Центавра); 14. Росса 154; 15. L789-6;
16. Лакайль 9352; 17. ε Индейца; 18. L725-32;
19. L726-8; 20. τ Кита; 21. ε Эридана; 22. Сириус; 23. L372-58

Тогда примерное число звёзд в Галактике с типичной для большинства звёзд массой оказывается порядка

$$N = \frac{M_G}{M_\odot} = 10^{11}.$$

Местная группа галактик (скопление галактик), включающая Млечный Путь, насчитывает около 40 ближайших галактик (рис. 164).

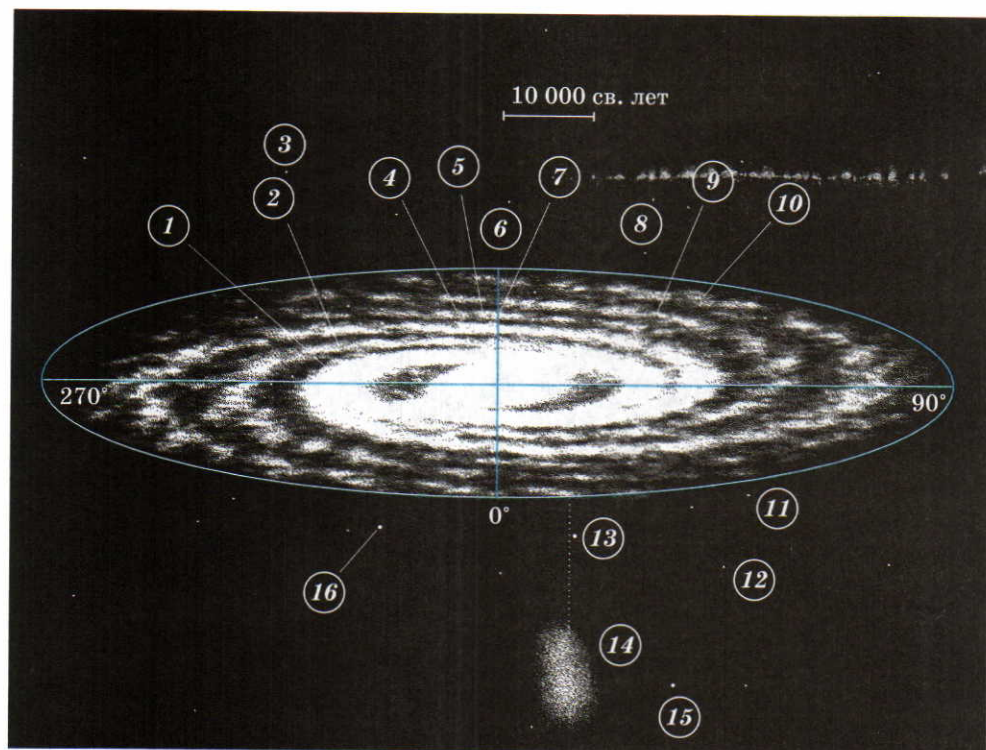


## ▲ 162

Звёзды, расположенные не далее 250 св. лет от Солнца:

1.  $\alpha$  Гидры; 2.  $\gamma$  Ворона; 3.  $\gamma$  Льва; 4.  $\mu$  Близнецов;
5.  $\mu$  Большой Медведицы; 6.  $\alpha$  Рыси; 7.  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$  Большой Медведицы;
8.  $\epsilon$  Волопаса; 9.  $\beta$  Малой Медведицы; 10.  $\gamma$  Дракона;
11.  $\eta$  Возничего; 12. Солнце; 13. Арктур; 14. Капелла; 15.  $\alpha$  Кассиопеи; 16.  $\eta$  Пегаса;
17.  $\beta$  Пегаса; 18.  $\beta$  Андромеды; 19. Скопление Гиады; 20. Вега;
21. Альдебаран; 22.  $\epsilon$  Стрельца; 23.  $\gamma$  Ориона; 24.  $\gamma$  Центавра;
25.  $\beta$  Киля; 26.  $\eta$  Паруса; 27.  $\tau$  Кормы; 28.  $\gamma$  Треугольника; 29.  $\epsilon$  Зайца;
30.  $\alpha$  Жертовника; 31.  $\gamma$  Эридана; 32. Ахернар; 33.  $\gamma$  Южной Гидры;
34.  $\alpha$  Павлина; 35.  $\alpha$  Тукана; 36.  $\gamma$  Феникса; 37.  $\beta$  Журавля;
38.  $\gamma$  Журавля; 39.  $\phi$  Стрельца; 40.  $\sigma$  Стрельца; 41.  $\alpha$  Кита





### ▲ 163

*Наша Галактика — Млечный Путь:*

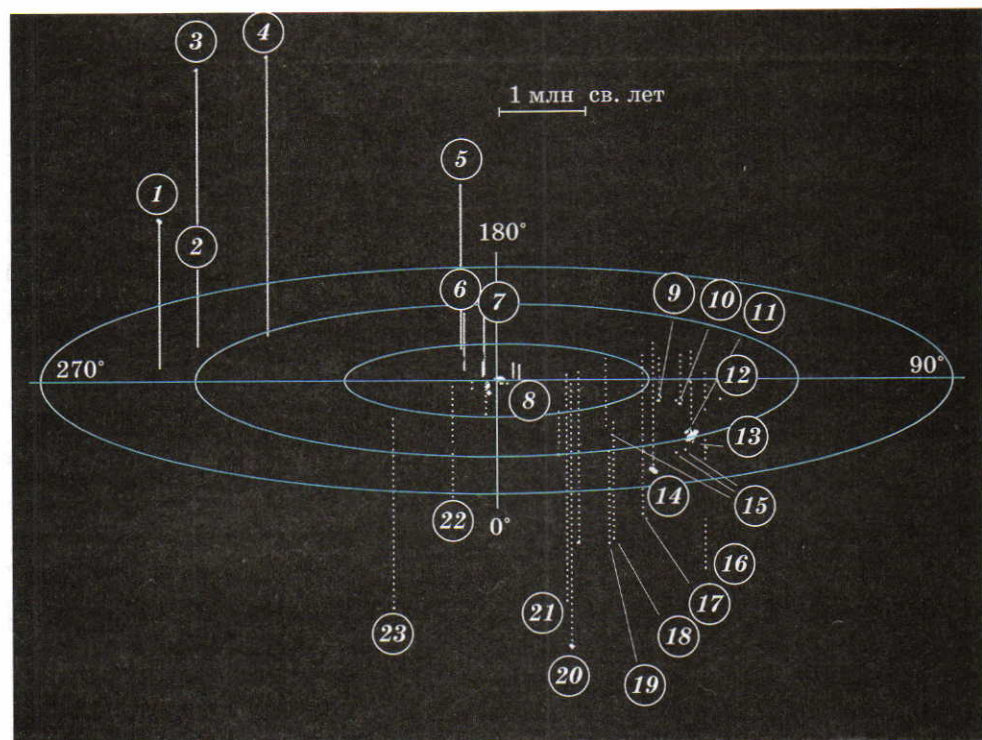
1. Ветвь Наугольника; 2. Щит — Южный Крест; 3. М68;  
4. Рукав Стрельца; 5. Рукав Ориона; 6. М5; 7. Солнце; 8. М13;  
9. Рукав Персея; 10. Рукав Лебедя; 11. М15; 12. М2; 13. М30;  
14. Карликовая галактика Стрельца; 15. М75; 16. Шаровое скопление

Галактики перемещаются в пространстве относительно друг друга. Так, Млечный Путь движется в сторону соседней галактики, туманности Андромеды, со скоростью 50 км/с.

Данное скопление галактик входит в состав сверхскопления Девы (рис. 165), перемещающегося в направлении ближайшего сверхскопления со скоростью 400 км/с.

Сверхскопления галактик, наиболее удалённые от сверхскопления Девы, наблюдаются на расстоянии около 14 млрд св. лет (рис. 166), определяющем видимый размер Вселенной.

Таково пространственное распределение астрономических объектов во Вселенной.



# ▲ 164

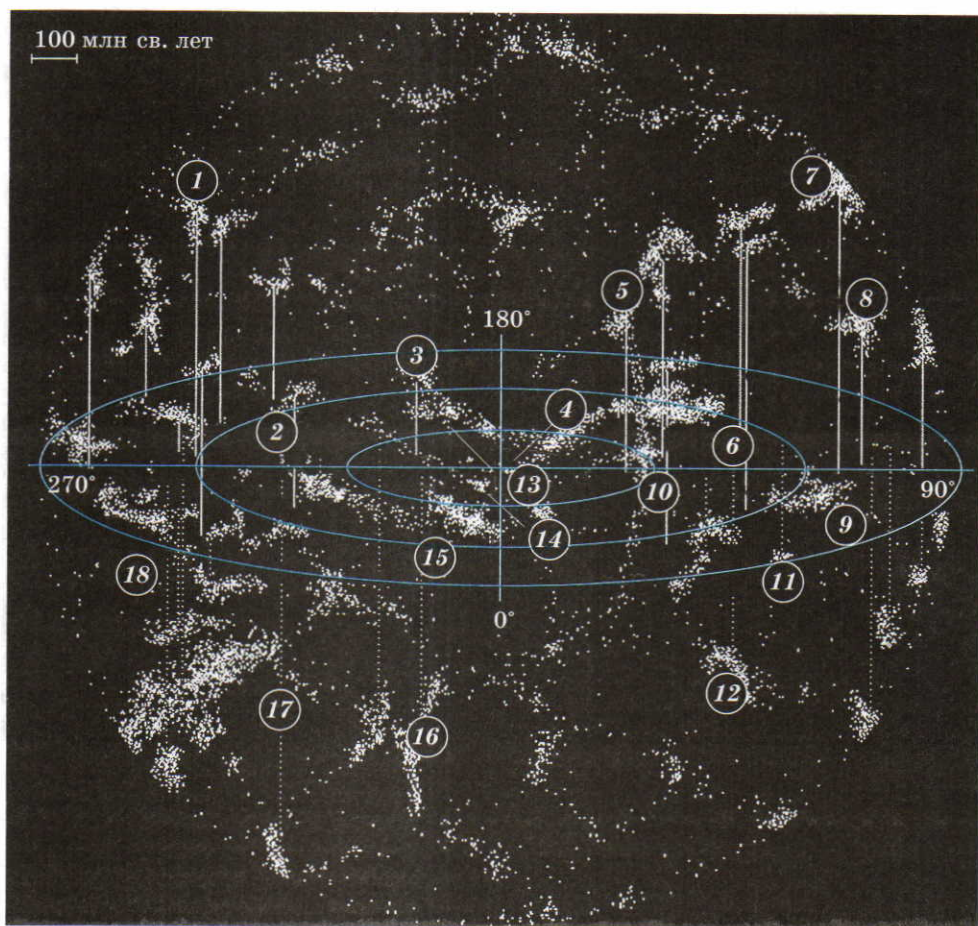
*Местная группа галактик:*

1. NGC 3109; 2. Насос (карликовая); 3. Секстант А; 4. Секстант В;
5. А Льва; 6. I Льва; 7. II Льва; 8. Млечный Путь; 9. NGC 185;
10. NGC 147; 11. NGC 205; 12. IC 10; 13. Галактика Андромеды;
14. Галактика Треугольника; 15. I, II и III Андромеды;
16. Пегас (карликовая); 17. LGS 3; 18. Водолей (карликовая);
19. Стрелец (карликовая неправильная); 20. WLM; 21. Кит (карликовая);
22. Феникс (карликовая); 23. Тукан (карликовая)

## В О П Р О С Ы

1. Каков предмет изучения астрофизики и космологии?
2. В каких единицах измеряют расстояние в астрофизике и космологии?
3. Укажите последовательность астрономических структур в порядке возрастания их масштаба.
4. Каково расстояние Солнечной системы от центра нашей Галактики и каков период её обращения вокруг центра?
5. Каково число звёзд в нашей Галактике?





## ▲ 165

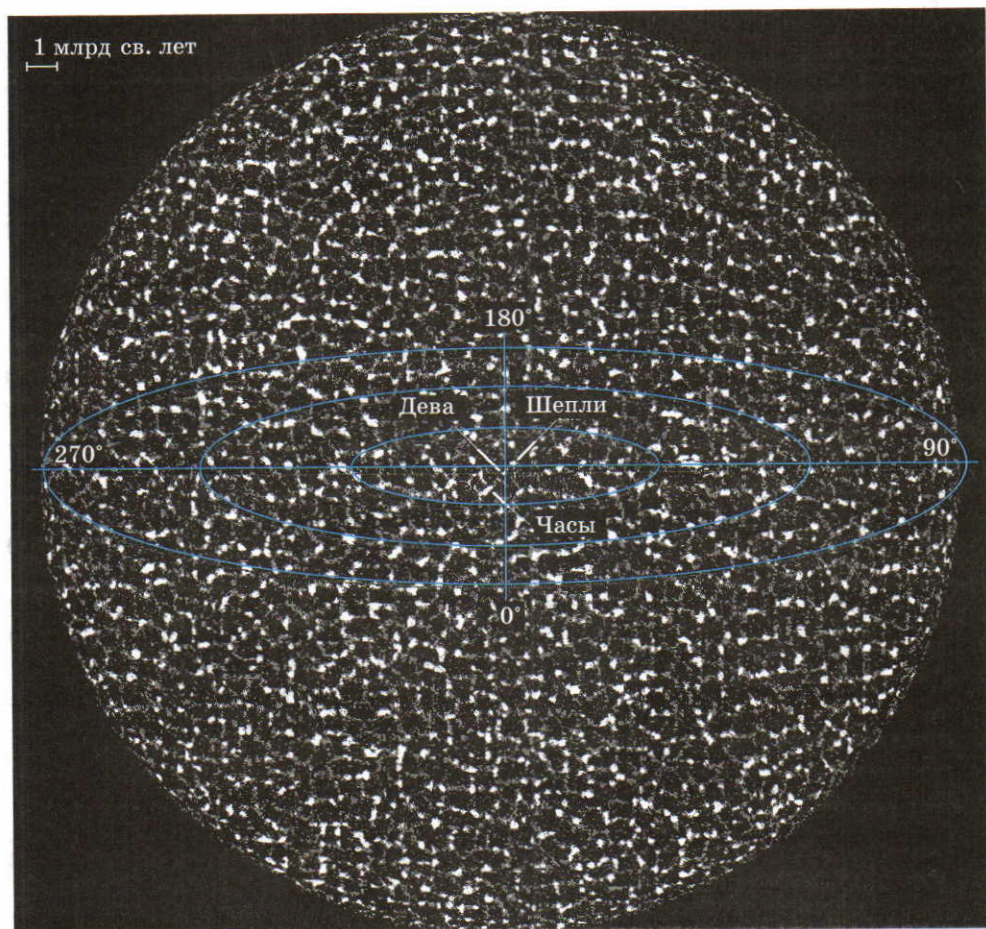
*Сверхскопления галактик в созвездиях:*

1. Козерога; 2. Скульптора; 3. Павлина—Индуса; 4. Центавра; 5. Геркулеса; 6. Шепли; 7. Северной Короны; 8. Волоса; 9. Большой Медведицы; 10. Волосы; 11. Льва; 12. Секстанта; 13. Девы; 14. Гидры; 15. Персея—Рыб; 16. Голубя; 17. Часов; 18. Рыб—Кита

## § 64. Расширение Вселенной. Закон Хаббла

**Разбегание галактик. Закон Хаббла.** Исследования спектров излучения и поглощения астрономических объектов позволили выяснить их химический состав, плотность, температуру, скорость движения.

В 1929 г. американский астроном **Эдвин Хаббл**, изучая характер движения 18 галактик, получил неожиданный результат. Оказалось,



## ▲ 166

### Видимая Вселенная

что астрономические структуры не просто перемещаются каждая в отдельности, но их движения согласованы. Галактики разбегаются от Земли, и скорость  $v$  этого убегания пропорциональна расстоянию  $r$  до них. Согласно закону Хаббла,

$$v = H_0 r, \quad (118)$$

где  $H_0 = 70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}^1)$  — постоянная Хаббла.

<sup>1</sup> В астрономии расстояние часто измеряют в *парсеках* (пк).  $1 \text{ ПК} = 3,26 \text{ св. г.} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м.}$



Постоянная Хаббла показывает, что галактика, находящаяся от Земли на расстоянии 1 Мпк, удаляется от Земли со скоростью 70 км/с. Чем дальше галактика находится от наблюдателя, тем быстрее она удаляется от него.

«Красное смещение» спектральных линий. В астрофизике скорость измеряют по эффекту Доплера (см. Ф-10, § 53). Известная спектральная линия излучения неподвижного атома с длиной волны  $\lambda_0$  сравнивается с длиной волны  $\lambda$ , регистрируемой приёмником от удаляющегося со скоростью  $v$  источника. Если скорость удаления источника от приёмника много меньше скорости света (см. формулу Ф-10 (125)), то

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \right). \quad (119)$$

Таким образом, длина волны  $\lambda$ , воспринимаемая наблюдателем, оказывается больше длины волны, излучаемой источником на величину

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c}. \quad (120)$$

Возникает сдвиг спектра излучения в сторону больших длин волн (в красную область), называемый *красным смещением* (рис. XVII на цветной вклейке, с. 256). Красное смещение спектральных линий возрастает при увеличении скорости движения источника излучения. Как видно из формулы (120), красное смещение пропорционально скорости источника относительно приёмника.

Таким образом, скорость галактики находится из формулы (120):

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (121)$$

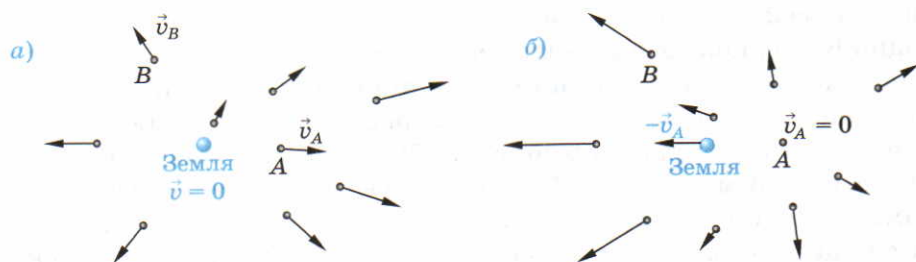
Разбегание галактик, или расширение Вселенной, наблюдается не только с Земли, но и из любой другой точки Вселенной. На рисунке 167, а показано движение галактик относительно Земли, а на рисунке 167, б относительно соседней галактики А.

В данный момент времени разбегание галактик выглядит одинаково во всех направлениях для наблюдателей во всех галактиках.

**Возраст Вселенной.** Разлёт галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше.

Закон Хаббла позволяет оценить время, которое прошло с момента начала расширения Вселенной:

$$t = \frac{r}{v} = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{70 \cdot \frac{10^3}{10^6 \cdot 3,26 \cdot 3 \cdot 10^8}} \approx 14 \text{ млрд лет.}$$



## ▲ 167

Наблюдение расширения Вселенной из любой точки пространства:

а) из Млечного Пути;

б) из любой галактики

Это время примерно характеризует возраст Вселенной.

Математическая модель, впервые (до закона Хаббла) предсказавшая теоретически расширение Вселенной, была предложена в 1922 г. российским учёным **Александром Александровичем Фридманом** (см. § 71).

## В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте закон Хаббла.
2. Каков физический смысл постоянной Хаббла?
3. Что такое «красное смещение» спектральных линий?
4. Как измеряют скорость галактик?
5. Оцените время расширения Вселенной.

## § 65. Эволюция ранней Вселенной

**Большой взрыв.** В конце 40-х гг. XX в. американский физик русского происхождения **Георгий Гамов** с сотрудниками предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва.

Из приведённых выше оценок времени расширения Вселенной, согласующихся с измерениями времени жизни наиболее долгоживущих изотопов, Большой взрыв произошёл около 14 млрд лет тому назад. Как известно, расширение приводит к охлаждению и уменьшению плотности вещества. Это означает, что ранняя Вселенная была не только более плотной, но и более горячей, чем в настоящее время. Предполагается, что взрыв произошёл одновременно в точечном объёме, кото-



рый и был всей Вселенной. Ничего больше не существовало. В ходе эволюции Вселенной увеличивался её размер.

**Основные периоды эволюции Вселенной.** Современная космология выделяет несколько характерных периодов эволюции Вселенной (см. рис. XVIII на цветной вклейке, с. 256). В период ранней Вселенной (спустя 2—3 минуты от Большого взрыва) образуется вещество в плазменном состоянии, из которого практически состоит Вселенная и в настоящее время: протоны, нейтроны, электроны, нейтрино, переносчики взаимодействий,  $\alpha$ -частицы. На протяжении следующих 350 тыс. лет расширение Вселенной приводит к её охлаждению и изменению состояния вещества от плазменного к газообразному (атомарному). В течение следующего миллиарда лет из пространственно неоднородных электронейтральных облаков водорода и гелия под действием сил гравитации начали формироваться астрономические структуры: скопления галактик, отдельные галактики, звёзды, планеты. Солнечная система образовалась спустя примерно 10 млрд лет с момента Большого взрыва. Наиболее ранние следы органической жизни на Земле относят к моменту времени 10,7 млрд лет от Большого взрыва.

Более детально периоды эволюции Вселенной представлены в таблице III на цветной вклейке.

### В О П Р О С Ы

1. Почему расширение Вселенной приводит к её охлаждению?
2. Что изучает космология?
3. Какой состав вещества характерен для ранней Вселенной?
4. Как изменилось состояние вещества во Вселенной за 350 000 лет с момента Большого взрыва?
5. Когда началось образование астрономических структур, Солнечной системы?

## § 66. Образование астрономических структур

**Образование галактик.** В течение миллиарда лет с момента Большого взрыва формировались условия для образования первоначальных астрономических структур (сверхскоплений галактик, скоплений галактик, галактик) и объектов (звёзд, планет и т. д.). Они возникали в результате гравитационного сжатия случайных локальных уплотнений (неоднородных облаков) первичного газа — водорода и гелия. Чем больше масса облака, тем сильнее его гравитационное сжатие. Процессу гравитационного сжатия препятствует возрастание давления газа

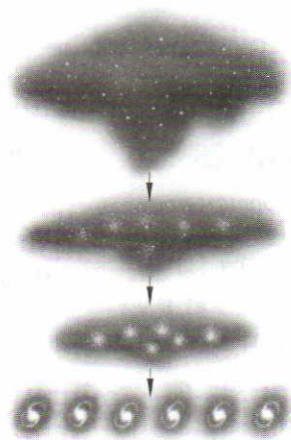
внутри облака. Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа сравнивается с потенциальной гравитационной энергией газового облака.

При флуктуациях плотности больших размеров (порядка сверхскопления галактик, т. е. около 100 млн св. лет) сжатие первоначального облака происходит асимметрично. Наибольшее гравитационное притяжение возникает между наиболее близкими частями облака в направлении минимального размера. В результате крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определённых плоскостях (по меткому выражению выдающегося советского физика **Якова Борисовича Зельдовича**, «как блины»).

Со временем такая среда неизбежно разобьётся на отдельные фрагменты (облака), размеры которых определяются равенством сил давления и гравитации (рис. 168). Галактика образуется из газового облака, размер которого лишь незначительно превышает размер будущей галактики. При сжатии облака образуются первые звёзды.

Эволюция галактики зависит от начальных условий образования: начальной скорости вращения газового облака и его массы (рис. XX на цветной вклейке, с. 256). В отсутствие начального вращения гравитация равномерно сжимает облако. В результате образуется эллиптическая галактика с сильной концентрацией звёзд к центру (рис. XX, а на цветной вклейке, с. 256). В быстровращающемся облаке гравитационное сжатие также приведёт к образованию сферической части (гало) в виде звёзд первого поколения. Однако концентрации вещества в центре препятствуют центробежные силы инерции. В результате газ концентрируется в галактической плоскости, перпендикулярной оси вращения (рис. XX, б на цветной вклейке, с. 256). Образуется спиральная галактика. Спиральные галактики, к которым относится наша Галактика — Млечный Путь, составляют 70% всех галактик, эллиптические — примерно 25%. Остальные 5% галактик составляют так называемые неправильные галактики.

Чем больше начальная масса галактики, тем больше гравитационное сжатие, тем быстрее образуется галактика.



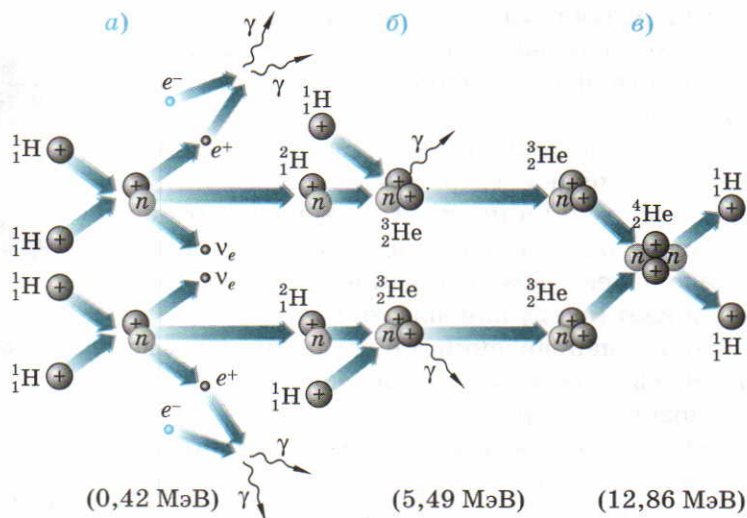
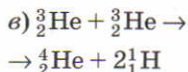
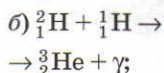
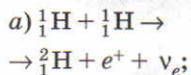
## ▲ 168

*Последовательность образования галактик. Процесс фрагментации (деления) газового облака*



## 169

Протон-протонный цикл:



В скобках — энергия, выделяющаяся в результате реакции.

**Возникновение звезд.** По современным представлениям звёзды зарождаются группами или скоплениями из водородно-гелиевых туманностей. Под действием сил тяготения газ сжимается и его температура повышается. Когда она оказывается порядка 12—15 млн К, становятся возможными реакции термоядерного синтеза, поддерживающие свечение звёзд. Свечение Солнца, согласно гипотезе немецкого физика **Ханса Бете**, выдвинутой в 1939 г., поддерживается реакцией термоядерного синтеза ядра гелия из четырёх атомов водорода, или *протон-протонным циклом* (рис. 169). Энергии, выделяющейся при протон-протонном цикле, оказывается достаточно для свечения Солнца в течение 10 млрд лет.

Таким образом, именно *термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звёзд*.

### В О П Р О С Ы

1. Каковы размеры пространственных флуктуаций реликтового излучения?
2. Почему крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определённых плоскостях?
3. Опишите последовательность образования галактик.
4. Поясните особенности формирования эллиптических и спиральных галактик.
5. Каковы источники энергии звёзд?

## § 67. Эволюция звёзд

**Эволюция звёзд различной массы.** В результате протон-протонного цикла повышается температура и давление плазмы в центре *протозвезды* (звезда в стадии образования), препятствуя дальнейшему гравитационному сжатию. Размер протозвезды стабилизируется, она излучает за счёт энергии термоядерного синтеза, превращаясь в звезду. От массы звезды существенно зависит время её жизни, а также конечный результат эволюции. Чем больше масса звезды, тем сильнее и быстрее её гравитационное сжатие, выше температура в центре, большая энергия выделяется в единицу времени, интенсивнее идёт термоядерный синтез, в процессе которого образуются более тяжёлые химические элементы.

Масса звезды имеет ограничения сверху  $m_{\max}$  и снизу  $m_{\min}$ . Если масса звезды в несколько десятков раз превышает массу Солнца, гравитационное давление излучения разрывает звезду. Существование таких звёзд было бы сразу зафиксировано по их мощному излучению.

Если масса звезды  $m < m_{\min} = 0,08 M_{\odot}$ , температура в центре протозвезды будет меньше 3 млн К — пороговой температуры, необходимой для начала термоядерного протон-протонного цикла. Такую протозвезду, занимающую промежуточное положение между звездой и планетой и имеющую массу около 80 масс Юпитера, называют *коричневым карликом*. Такой объект, излучающий преимущественно в ИК-диапазоне, был впервые обнаружен в 1995 г. Большинство звёзд менее массивно, чем Солнце, и имеет массу, меньшую  $0,5 M_{\odot}$ .

Рассмотрим последовательно эволюцию звёзд различной массы.

$m \approx M_{\odot}$ . Если масса звезды оказывается порядка солнечной  $M_{\odot}$ , через миллиарды лет водород в центре звезды полностью превращается в гелий.

Когда температура сжимающегося гелиевого ядра возрастёт до 100 млн К, из гелия начинает синтезироваться углерод. Силы гравитации сжимают углерод, при этом температура возрастает настолько, что внешние слои звезды начинают расширяться. Расширение приводит к охлаждению поверхности, в результате чего излучение звезды становится красным. Внешняя поверхность звезды, например Солнца, может достигнуть орбиты Земли. Звезда становится *красным гигантом* в течение примерно миллиарда лет.

Ядро звезды, израсходовавшей запас гелия, сжимается до тех пор, пока электронные оболочки соседних атомов не начинают перекрываться. Звезда становится *белым карликом*, излучающим энергию в 1000 раз меньшую, чем Солнце. Белый карлик размером с Землю мо-



жет остывать миллиарды лет. Остатки газовой оболочки звезды, превратившейся в белый карлик, называют *планетарной туманностью*.

$m \approx 10 M_{\odot}$ . Если масса звезды в 10 раз превышает массу Солнца, весь водород синтезируется в гелий за 10 млн лет. Температура и давление в центре звезды уменьшаются, и звезда под действием гравитационных сил сжимается в течение нескольких десятков тысяч лет. При температуре свыше 100 млн К начинаются реакции синтеза ядер углерода и кислорода из ядер гелия.

Повышение температуры ядра ведёт к разогреванию и расширению внешней оболочки звезды. Звезда становится *красным сверхгигантом*.

Затем начинается синтез ядер более тяжёлых химических элементов — неона и магния из ядер углерода. При синтезе ядер кислорода образуется кремний. Для синтеза более тяжёлых ядер требуется дополнительное топливо, которого не оказывается у звезды такой массы. Масса кремниевой сердцевины звезды составляет примерно  $1,5 M_{\odot}$ .

Ядро звезды радиусом порядка радиуса Земли за доли секунды сжимается в шар радиусом около 10 км. При этом давление резко возрастает, так что электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны с испусканием электронного нейтрино:



Энергия потока нейтрино существенно превышает энергию светового излучения. Такую звезду называют *нейтронной звездой*.

Возрастание температуры и давления в центре звезды приводит к возникновению ударной волны расширения ядра звезды. При встрече этой волны с веществом, падающим к центру звезды, температура возрастает примерно до 10 млрд К. Происходит гигантский взрыв — вспышка *сверхновой* звезды (рис. 170). Ударная волна распространяется от ядра до внешней поверхности звезды в течение нескольких часов, поэтому начало световой вспышки сверхновой наблюдается спустя несколько часов после регистрации потока нейтрино.

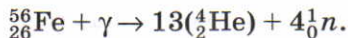
Сверхновая 1054 г., отмеченная в китайских летописях как «звезда, видимая днём», оставила после себя нейтронную звезду массой около  $2,5 M_{\odot}$  и газовое облако — Крабовидную туманность (рис. XXI на цветной вклейке, с. 257).

$m \approx 30 M_{\odot}$ . **Синтез тяжёлых химических элементов.** Если масса протозвезды превышает  $10 M_{\odot}$ , характерные термоядерные реакции (рассмотренные выше) протекают ускоренно. Однако избыток массы приводит к сжатию кремниевого ядра и повышению его температуры до 4 млрд К, при которой ядра кремния синтезируются в ядро железа



$^{56}_{26}\text{Fe}$ . Ядро железа — самое тяжёлое ядро, синтез которого происходит с выделением энергии, но её недостаточно для синтеза ядер других, более тяжёлых элементов. Температура внутри звезды убывает по мере удаления от её центра. Поэтому на разной глубине одновременно проходят различные ядерные реакции синтеза и образуются слои, состоящие из химических элементов, последовательно выгоравших в звезде (рис. XXII на цветной вклейке, с. 257). Из-за отсутствия источника энергии железное ядро не выдерживает огромного гравитационного давления и быстро сжимается.

Внешние слои звезды начинают падение к центру. Резкое повышение их температуры сопровождается мощным потоком нейтронов из железного ядра вследствие реакции



Последовательное присоединение нейтронов к ядрам приводит к образованию более тяжёлых химических элементов, чем железо.

В результате мощнейший ядерный взрыв сбрасывает в окружающее пространство внешние слои звёзд, содержащие все тяжёлые элементы таблицы Д. И. Менделеева. По современным представлениям, практически все атомы химических элементов, более тяжёлых, чем гелий, образовались во Вселенной именно при вспышках сверхновых. В состав звёзд следующих поколений (молодые звёзды) и их планетных систем входят тяжёлые элементы, рассеянные по Вселенной. Именно поэтому в состав Земли входят тяжёлые радиоактивные элементы.



При взрыве сверхновой в течение 10 с выделяется энергия в 200 раз большая, чем энергия, которую излучило Солнце за всё время своего существования. Из-за большой остаточной массы звезды  $m > 4 M_{\odot}$  нейтронный газ не может скомпенсировать огромное гравитационное сжатие. В результате на месте взорвавшейся сверхновой остаётся *чёрная дыра* (см. Ф-10, § 33). Гигантские чёрные дыры обнаружены в центрах ряда галактик, включая Млечный Путь, по излучению вещества, ускоренно втягивающегося в них гравитационным полем. Излучение удалённых от центра областей лежит в ультрафиолетовом диапазоне, который в результате красного смещения наблюдается как голубое свечение *квазаров* (квазизвёздные объекты).

Свечение квазара во много раз превосходит свечение галактик, подобных Млечному Пути. Последовательное экспериментальное изучение квазаров осложнено огромными расстояниями порядка 10 млрд св. лет до большинства из них. С другой стороны, такие расстояния позволяют предположить, что образование квазаров наиболее характерно для начальной стадии образования Вселенной.

## В О П Р О С Ы

1. Почему возможная масса звезды имеет ограничение сверху и снизу?
2. При каком условии и в какой последовательности звезда превращается в белый карлик?
3. При каком условии и в какой последовательности звезда становится нейтронной?
4. Какие процессы в звёздах вызывают синтез тяжёлых элементов?
5. Что представляют собой квазары?

## § 68. Образование Солнечной системы

**Химический состав межзвёздного вещества.** Взрыв сверхновых изменяет состав первичного газа, состоявшего из водорода и гелия, добавляя в него тяжёлые элементы. Всего девять химических элементов составляют 99,6% видимого вещества во Вселенной (табл. 12).

**Таблица 12.** Процентное содержание основных химических элементов межзвёздного вещества

Химический элемент	H	He	O	C	Ne	N	Fe	Mg	Si
Процентное содержание	70	28	0,7	0,3	0,3	0,1	0,1	0,05	0,05

Всего 0,2% кислорода достаточно для окисления всех металлов, а остальные 0,5% идут на образование воды  $H_2O$  — наиболее распространённой трехатомной молекулы во Вселенной. (Оксид углерода  $CO$  — наиболее распространённая двухатомная молекула.)

Оксиды металлов при охлаждении образуют силикаты, конденсирующиеся в частицы микроскопической пыли размером порядка 0,1 мкм. Впервые в истории Вселенной появляются частицы твёрдого вещества, покрытые льдом, — межзвёздная пыль, внешне похожая на дым. Подобная пыль одновременно может являться катализатором многих химических реакций. Отметим, что в состав межзвёздного вещества входят также три важнейших соединения — вода  $H_2O$ , формальдегид  $HCHO$  и синильная кислота  $HCN$ , требующиеся для образования аминокислот и для возникновения органической жизни.

**Образование прото-Солнца и газопылевого диска.** Около 4,6 млрд лет тому назад гигантское газопылевое облако сконцентрировалось в одном из спиральных рукавов нашей Галактики. (Подобное облако наблюдается сейчас в созвездии Ориона (рис. XXIII на цветной вклейке, с. 257).) Масса облака примерно в миллион раз превосходила массу Солнца. Благодаря оптической непрозрачности облака для ультрафиолетового излучения отдалённых звёзд органические молекулы не разрушались. Облако имело нерегулярную структуру и состояло из ряда неоднородных по размеру областей, имеющих свой центр притяжения. Наиболее крупные области сжимались первыми, образуя массивные звёзды массой  $m > 10 M_\odot$ , заканчивающие своё существование взрывом сверхновой. Ударные волны от взрыва, оказывая давление на соседние области, инициируют их гравитационное сжатие. Таким образом, почти одновременно могут быть созданы сотни менее массивных звёзд.

Одна из областей уплотнения вещества массой 1,5—2  $M_\odot$  могла образовать Солнечную систему (рис. XXIV, а на цветной вклейке, с. 257). Гравитационное сжатие уменьшает размер центральной части уплотнения в 100 тыс. раз (рис. XXIV, б на цветной вклейке, с. 257). Параллельно с образованием прото-Солнца происходило формирование газопылевого диска. Начальное вращение облака при уменьшении его размеров приводило к значительному увеличению скорости вращения (подобно фигуристу, увеличивающему скорость вращения приближением рук к корпусу). Вращение предотвращает неограниченное сжатие (рис. XXIV, в на цветной вклейке, с. 257). В центре уплотнения оказывается прото-Солнце массой около 0,1  $M_\odot$ , принявшее сферическую форму, излучающее в красной области спектра.

**Эволюция газопылевого диска.** Остальная часть вещества образует в течение 100 тыс. лет диск, вращающийся вокруг прото-Солнца и



состоящий на 98,5% по массе из газа и на 1,5% из пыли, взвешенной в газе.

Период вращения газа на разных расстояниях от центра различен.

Зоны диска, ближайшие к прото-Солнцу, втягиваются внутрь, пополняя массу до  $M_{\odot}$ . Внешние зоны удаляются от центра. Скорость потоков в газе уменьшается, и пыль оседает в его плоскости в течение нескольких тысяч лет. Наличие пылевых дисков наблюдается в настоящее время у молодых звёзд в стадии их образования (рис. XXV на цветной вклейке, с. 257).

Температура пыли убывала с расстоянием от прото-Солнца. В районе планет земной группы 0,8—1,3 а. е. температура менялась в пределах от 900 до 1400 К. В этом диапазоне температур пыль состояла из зёрен металлического железа и силикатов, но не могла содержать испаряющуюся воду и летучие вещества. В области нынешних планет-гигантов на расстоянии, большем 5 а. е., при температуре, меньшей 225 К, вода и летучие органические вещества не испаряются, существуя только в твёрдой фазе (см. рис. XXIV, в на цветной вклейке). Присутствие льда увеличивало массу твёрдого вещества и гравитационное притяжение частиц, что затем способствовало появлению гигантского Юпитера.

В пылевом диске образовались гигантские и очень плотные кольца вокруг Солнца. Гравитационное притяжение частиц и их столкновения между собой приводили к образованию зёрен (укрупнению частиц пыли). Формирование Солнечной системы 100 тыс. лет — это очень короткий процесс.

**Планетеземали.** Через 10 тыс. лет в плоскости протопланетного диска образовалось около 100 млрд объектов неправильной формы размером от 1 до 10 км — *планетеземали* (зародыши планет) (рис. XXIV, г на цветной вклейке, с. 257). Диск отчасти напоминал кольца Сатурна. Состав планетеземалей зависел от их температуры, т. е. от их расстояния от Солнца.

На расстояниях 30—1000 а. е., т. е. практически за планетами, на периферии находится гигантский койперовский пояс ледяных планетеземалей (мало изменившихся за 4 млрд лет), названный в честь американского учёного *Джерарда Койпера*, предсказавшего его существование на основе распределения масс планет в Солнечной системе.

При попадании планетеземали внутрь Солнечной системы в результате изменения её траектории она приобретает хвост кометы. Планетеземали, окружённые газом (99% (H + He), 1% CO, N<sub>2</sub>, CNO), вращались в одну сторону вокруг Солнца, сталкиваясь при небольших относительных скоростях. Выделение тепла при неупругих столкновениях способствовало их слипанию в более массивные объекты. Чем больше

диаметр объекта и соответственно его масса, тем чаще он испытывает столкновения и увеличивается в размерах. Так образуется *протопланта* (планета в стадии образования).

К моменту образования планетеземалей Солнце достигло уже максимальной излучательной способности, излучая в 4—5 раз больше энергии, чем в настоящий момент, так как имело площадь поверхности примерно в 20 раз большую, чем теперь. Нынешний вид оно приобрело спустя 20—30 млн лет.

### В О П Р О С Ы

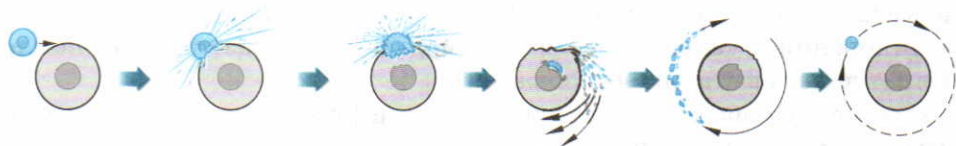
1. Каков примерный химический состав межзвёздного вещества во Вселенной?
2. Опишите примерный процесс образования прото-Солнца.
3. Как образовывался газопылевой диск?
4. Поясните механизм образования планетеземали.
5. Из каких астрономических объектов состоит койперовский пояс в Солнечной системе?

## § 69. Эволюция планет земной группы

**Образование планет земной группы.** Спустя примерно миллион лет от начала образования Солнечной системы в зоне между нынешними Меркурием и Марсом возникает около 20 протопланет массами больше, чем у Луны, но меньше, чем у Меркурия, и миллионы меньших по размеру планетеземалей, состоящих из силикатов и железа. Из-за значительной массы протопланет их гравитационное притяжение начинает существенно влиять как на их траекторию, так и на траектории планетеземалей. Ускорение планетеземалей в гравитационном поле протопланет приводит либо к укрупнению протопланет в результате столкновений с планетеземалями, либо к разрушению планетеземалей в результате последующих столкновений друг с другом (см. рис. XXIV, 2 на цветной вклейке, с. 257). При столкновении с протопланетой, например Землёй, росла температура поверхности планеты, достигая температуры плавления силикатов и железа. Более тяжёлая железная лава оседала к центру Земли, застывая на глубине. Последующее тепловыделение в центре поддерживалось за счёт взрывов сверхновых.

Ядра планет земной группы — Меркурия, Венеры, Земли — состоят из металлического железа, а мантии — в основном из силикатов железа и магния. Исключением является ядро Марса, состоящее, по совре-





### ▲ 171

*Процесс образования Луны в результате нецентрального столкновения Земли с протопланетой размером с Марс (50 млн лет после образования Солнечной системы)*

менным представлениям, из смеси железа и сульфида железа. В мантии Марса заметны также примеси оксида железа.

У Луны железное ядро практически отсутствует. Возможно, это связано с процессом её образования. Согласно одной из современных гипотез, Луна могла возникнуть при нецентральном столкновении Земли с протопланетой размера Марса (рис. 171), в результате которого часть силикатной мантии была выброшена в пространство. Постепенно из части мантии, оставшейся на земной орбите, в результате гравитационного притяжения образовалась Луна. В пользу подобных представлений свидетельствует состав образцов лунного грунта, напоминающий земной после его расплавления и последующего охлаждения.

Вначале Луна находилась значительно ближе к Земле, чем в настоящее время. Однако в силу земных приливов и отливов стала постепенно удаляться от неё. Это удаление продолжается и в настоящее время со скоростью 4 см/год. Изотопный анализ образцов старейших лунных пород показал, что Луна возникла примерно через 50 млн лет после начала формирования Солнечной системы.

Через 200 млн лет от начала образования Солнечной системы бомбардировка планет земной группы крупными планетеземальями практически прекратилась, хотя столкновения с нерегулярными объектами радиусом от 1 до 20 км продолжались. Через 500 млн лет значительно ослабли бомбардировки Земли кометами, принёсшими на Землю воду.

**Комета — планетеземаль диаметром от 5 до 500 км, покрытая льдом.**

**Атмосферы планет земной группы.** Масса газа, доставленная на Землю кометами, во много раз превышает массу её атмосферы. Коме-

ты доставили на Землю около  $10^{18}$  т простейших органических молекул, необходимых для последующего синтеза нуклеиновых кислот, в виде микроскопических частиц, распылённых в океанах.

Практическое прекращение бомбардировок Земли кометами через 500 млн лет после начала образования Солнечной системы привело к снижению температуры океанов до  $100\text{—}120^\circ\text{C}$ . Давление атмосферы, состоящей из углекислого газа  $\text{CO}_2$  (80%), метана  $\text{CH}_4$  (10%), угарного газа  $\text{CO}$  (5%), азота  $\text{N}_2$  (5%), было при этом от 30 до 40 атм. Такая атмосфера играла роль своеобразного «одеяла». Излучение Солнца в видимом диапазоне свободно проникало сквозь углекислый газ, достигая поверхности планеты и нагревая её. Тепловое излучение поверхности при  $T = 300\text{ K}$ , согласно закону Вина, является преимущественно инфракрасным с длиной волны  $\lambda_{\text{ик}} = 10\text{ мкм}$ . Такое излучение поглощается углекислым газом и нагревает его, приводя к «парниковому эффекту». (В парниках роль углекислого газа играет оконное стекло.) Из-за горячих дождей в атмосфере произошло существенное уменьшение процентного содержания углекислого газа в результате реакции с силикатами и водой при образовании карбонатов в земной коре (кальцит, доломит и др.). Парциальное давление углекислого газа  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли упало ниже парциального давления азота  $\text{N}_2$ , ставшего основным газом в атмосфере. Последующие процессы фотосинтеза сначала увеличили, а затем стабилизировали процент кислорода  $\text{O}_2$  в атмосфере, создав предпосылки для возникновения органической жизни на Земле.

Атмосфера Венеры и Марса в настоящее время (так же как и Земли 4 млрд лет назад) в основном состоит из углекислого газа  $\text{CO}_2$ . Это связано со значительным содержанием углерода в коре этих планет в виде карбонатов. Энергия, выделяющаяся при столкновениях с кометами, легко расщепляет карбонаты с выделением  $\text{CO}_2$ . Углекислый газ выделяется и при вулканических извержениях.

Массы Меркурия и Луны недостаточны для удержания существенной атмосферы.

### В О П Р О С Ы

1. Каков состав ядер планет земной группы?
2. Почему у Луны отсутствует железное ядро?
3. Какой астрономический объект называют кометой?
4. В чём особенность образования планет земной группы?
5. Каков состав атмосферы планет земной группы?



## § 70. Эволюция планет-гигантов

**Образование планет-гигантов.** Параллельно с образованием планет земной группы на расстояниях от Солнца, больших чем 5 а. е., возникали планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун (см. рис. XXIV на цветной вклейке, с. 257). Плутон — является самым крупным объектом в группе тел, составляющих пояс Койпера. На расстояниях от Солнца, больших 5 а. е., частицы межпланетной пыли были в несколько раз тяжелее, чем в области планет земной группы. При температуре  $T = 225 \text{ К}$  они не только содержали силикатную и железную основу, но и были покрыты снегом органических веществ и льдом. В их оболочке содержались также летучие вещества, диффундировавшие из более тёплых участков Солнечной системы.

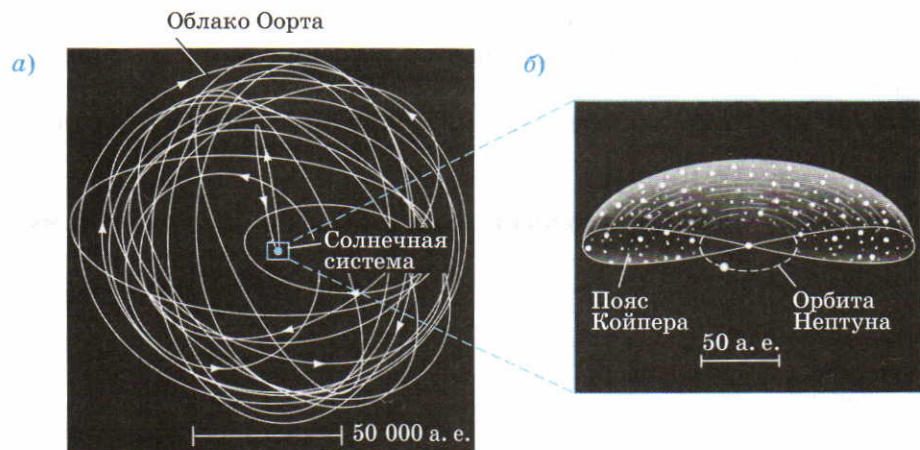
Достаточно быстро, в течение миллиона лет, вследствие гравитационного притяжения и столкновений частиц образовалось металлосиликатное ядро (содержащее также углерод и кислород) Юпитера массой  $m \approx 12 M_{\oplus}$ . Затем мощный гравитационный центр укрупнился до  $m_{\text{я}} = 29 M_{\oplus}$  в результате многочисленных столкновений с планетезималями и протопланетами, быстро захватывая атмосферу, состоящую из водорода и гелия и имеющую массу порядка  $300 M_{\oplus}$ .

Верхний слой облаков Юпитера представляется его видимой поверхностью. Ниже облаков, содержащих не более 0,05% капель и кристаллов метана и аммиака, лежит слой жидкого и металлического водорода. Измерения, проведённые космическим зондом «Галилей» в декабре 1995 г., показали, что температура ядра Юпитера не менее 20 тыс. К.

Образование Сатурна происходило аналогично, но более медленно: около 2 млн лет. Сатурн аккумулировал атмосферу массой около  $80 M_{\oplus}$ . Кольца Сатурна представляют собой остатки протопланетного облака, из которого сформировались планеты и их спутники. Кольца состоят из независимо движущихся отдельных обломков водяного льда размерами от долей миллиметра до 10—25 м. Размер колец Сатурна около 60 тыс. км, а толщина не более 20 м.

Образование Урана и Нептуна происходило заметно медленнее, пропорционально их периодам вращения вокруг Солнца. Меньшие массы ядер планет не позволили аккумулировать значительные атмосферы.

**Астероиды и кометы.** Во время образования планет-гигантов миллиарды планетеземалей диаметром от 50 до 500 км вращались вокруг Солнца в области от 1,5 до 5 а. е. Мощное гравитационное поле Юпитера существенно изменяло траектории движения этих объектов, отбрасывая их как за пределы Солнечной системы, так и на её периферию на



## ▲ 172

Области локализации комет в Солнечной системе:

- а) облако Оорта (кометы с большим периодом обращения в сферическом слое);  
 б) пояс Койпера (комета с малым периодом обращения в плоскости эклиптики)

расстояние около 50 тыс. а. е. В этом огромном облаке Оорта, предсказанном голландским астрономом **Яном Оортом** в 1950 г., по-видимому, находится большинство наблюдаемых комет (рис. 172). Накопление комет в этой области способствовало прекращению бомбардировки планет земной группы.

Перемещаясь в облако Оорта, кометы возмущали орбиты астероидов. Поэтому последующие столкновения астероидов, происходившие при больших относительных скоростях, приводили к их разрушению, тем самым исключая возможность образования крупных планет в этой области.

Периодически в результате случайных столкновений или возмущений от ближайших звёзд комета может быть вброшена в центральные области Солнечной системы.

Когда расстояние кометы от Солнца становится меньшим 5 а. е. (примерно при пересечении орбиты Юпитера), поверхность твердого ядра кометы нагревается настолько, что начинается испарение замерзших газов, усиливающееся при приближении к Солнцу. Образуется светящееся газовое облако, приобретающее форму хвоста, направленного от Солнца под действием светового давления. После прохождения



точки орбиты, ближайшей к Солнцу, температура поверхности твёрдого ядра падает, испарение уменьшается и хвост кометы постепенно исчезает.

Возможная хронология образования Солнечной системы представлена в таблице 13.

**Таблица 13.** Примерная хронология образования Солнечной системы

Этап	Время с начала образования Солнечной системы, лет
Образование газопылевого диска в плоскости эклиптики	0
Образование планетеземалей размером 10 км; размером 50 + 500 км	1000 100 000
Образование протопланет размером Луна — Марс в области планет земной группы	1 млн
Формирование ядра Юпитера (массой $12 M_{\oplus}$ )	1 млн
Формирование ядра Сатурна	2 млн
Образование ядра Урана	7 млн
Образование ядра Нептуна	14 млн
Формирование Земли (99%)	40 млн
Образование Луны	50 млн
Завершение на 99% кометной бомбардировки Земли	1 млрд

### В О П Р О С Ы

1. В чём особенности образования планет-гигантов?
2. Какова структура планет-гигантов?
3. Как образовалось облако Оорта?
4. Почему отсутствуют планеты между орбитами Марса и Юпитера?
5. Какова примерная хронология образования Солнечной системы?

## § 71. Возможные сценарии эволюции Вселенной

**Модель Фридмана. Критическая плотность Вселенной.** Согласно современным космологическим представлениям Вселенная расширяется в результате Большого взрыва. Однако возникают вопросы о возможных дальнейших сценариях эволюции Вселенной. Будет ли расширение неограниченно продолжаться? Замедляется оно или ускоряется? Возможна ли смена фазы расширения на сжатие?

Возможность расширения Вселенной впервые была теоретически обоснована российским учёным **Александром Александровичем Фридманом** в 1922 г.

Согласно теории Фридмана возможный сценарий эволюции Вселенной зависит от её плотности. Существует так называемая критическая плотность Вселенной  $\rho_c \approx 10^{-26}$  кг/м<sup>3</sup>. Это значение соответствует наличию нескольких (шести) атомов водорода в одном кубическом метре.

С помощью предложенной Фридманом математической модели были намечены два возможных варианта эволюции Вселенной.

1) Если реальная плотность  $\rho$  Вселенной меньше либо равна критической  $\rho \leq \rho_c$ , Вселенная будет расширяться, а её радиус возрастать с течением времени. Многочисленные оценки плотности видимого вещества во Вселенной дают величину  $\rho < 0,1\rho_c$ .

2) Если реальная плотность Вселенной больше либо равна критической  $\rho \geq \rho_c$ , Вселенная расширяется до некоторого максимального радиуса, примерно вдвое большего, чем наблюдается теперь, а затем сжимается до первоначального состояния. Реально это возможно лишь при существовании невидимой, «скрытой» массы во Вселенной. Многочисленные астрономические наблюдения показывают, что объяснение движения отдельных звёзд и звёздных скоплений оказывается невозможным без учёта наличия дополнительной скрытой массы (тёмного вещества).

Физическая природа скрытой массы пока однозначно не выяснена. Существуют предположения о барионных объектах в отдалённых сверхскоплениях галактик, ненаблюдаемых чёрных дырах, наличии массы покоя у нейтрино. От величины скрытой массы зависит сценарий дальнейшего развития Вселенной.

**Будущее Вселенной.** При любом значении реальной плотности  $\rho$  Вселенной примерно через 5 млрд лет Солнце, расширяясь, превратится в красный гигант и поглотит ближайшие планеты. Земля потеряет атмосферу и океаны. Жизнь исчезнет или переместится на другие объекты Вселенной. Звёзды выгорят как свечи и погаснут одна за другой.



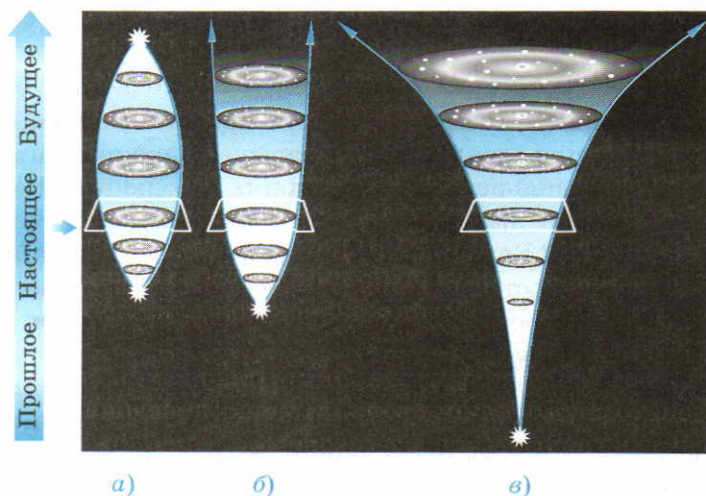
173

Расширение Вселенной при различных возможных плотностях:

а)  $\rho > \rho_c$ ;

б)  $\rho = \rho_c$ ;

в)  $\rho < \rho_c$



Галактики тихо умрут. Десятки миллиардов лет пройдут в растущей темноте со случайными вспышками света.

Далее возможны два сценария развития Вселенной в зависимости от величины её реальной плотности  $\rho$  (рис. 173).

**I.  $\rho < \rho_c$ . Вселенная будет расширяться далее и безжизненные галактики продолжат путешествие в замёрзшей темноте к концу времени.**

Примерно через триллион лет после Большого взрыва галактики потемнеют и умрут. Все системы перейдут в состояние с минимальной энергией. Все процессы будут происходить очень медленно (ядра водорода превращаются в ядро гелия за  $10^{20}$  лет при комнатной температуре). Наша Галактика и туманность Андромеды вследствие излучения гравитационных волн медленно сближаются при общем вращении. Через  $10^{30}$  лет эти галактики сольются, образуя единую систему. Вследствие гравитационного излучения сольются и двойные звёзды. Скопления галактик по этой причине примерно через  $10^{35}$  лет станут супергалактиками. Наиболее быстро движущиеся звёзды скоплений будут их покидать («испаряться»). Этот процесс охлаждает скопление и оно медленно сжимается. Примерно через  $10^{40}$  лет большинство звёзд превратится в супермассивные чёрные дыры.

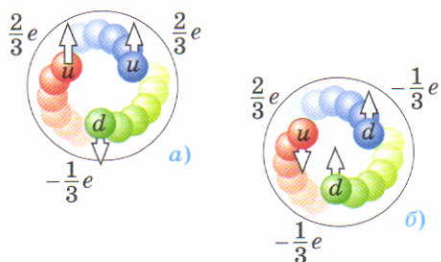
Согласно теории Великого объединения протон — нестабильная частица. Через  $10^{35}$  лет он может распасться на более лёгкие частицы — позитрон, фотон и нейтрино.

Электроны и позитроны аннигилируют, образуя фотоны. В будущем, когда излучение охладится до  $T \simeq 10^{-16}$  К, все формы вещества,

## Таблица I

Три поколения фундаментальных частиц

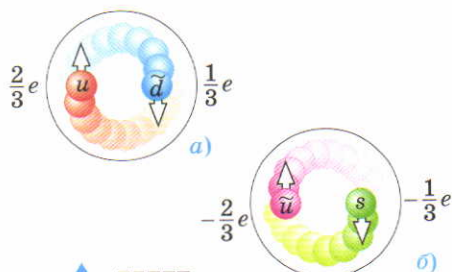
Поколение	Частица	Цвет	$q$	$m$ , ГэВ
I	Кварк	$u$	$\frac{2}{3}e$	0,330
		$d$	$-\frac{1}{3}e$	0,333
		$e^-$	$-e$	$5,11 \times 10^{-4}$
	Лептон	$\nu_e$	0	$< 1,4 \times 10^{-8}$
II	Кварк	$c$	$\frac{2}{3}e$	1,5
		$s$	$-\frac{1}{3}e$	0,54
		$\mu^-$	$-e$	0,106
	Лептон	$\nu_\mu$	0	$< 2,5 \times 10^{-4}$
III	Кварк	$t$	$\frac{2}{3}e$	173
		$b$	$-\frac{1}{3}e$	5
		$\tau^-$	$-e$	1,78
	Лептон	$\nu_\tau$	0	$< 0,035$



### ▲ XII

Кварковая структура нуклонов:

- а) протон;  
б) нейтрон



### ▲ XIII

Кварковая структура мезона:

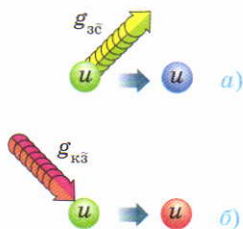
- а)  $\pi^+$ -мезон;  
б)  $K^-$ -мезон



## Таблица II

Переносчики фундаментальных взаимодействий

Взаимодействие	Переносчики взаимодействий
Сильное	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around;"> <span style="color: blue;">антицвет</span> <span style="color: red;">цвет</span> <div style="display: flex; gap: 10px;"> <div style="text-align: center;"><math>\bar{u}</math>  <math>u</math></div> <div style="text-align: center;"><math>\bar{c}</math>  <math>c</math></div> <div style="text-align: center;"><math>\bar{s}</math>  <math>s</math></div> <div style="text-align: center;"><math>\bar{u}</math>  <math>u</math></div> <div style="text-align: center;"><math>\bar{c}</math>  <math>c</math></div> <div style="text-align: center;"><math>\bar{s}</math>  <math>s</math></div> <div style="text-align: center;"></div> <div style="text-align: center;"></div> </div> <span>Глюоны</span> </div>
Электромагнитное	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around;"> <span>Фотон</span> </div>
Слабое	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"><math>W^+</math> </div> <div style="text-align: center;"><math>Z^0</math> </div> <div style="text-align: center;"><math>W^-</math> </div> </div> <span>Промежуточные векторные бозоны</span>
Гравитационное	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <math>S = 2</math></div> <span>Гравитон</span> </div>

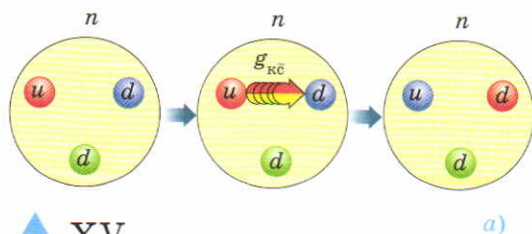


### ▲ XIV

Изменение цвета кварка:

а) излучение глюона;

б) поглощение глюона

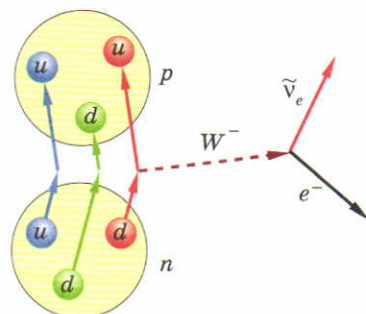


### ▲ XV

Взаимодействие кварков в нейтроне:

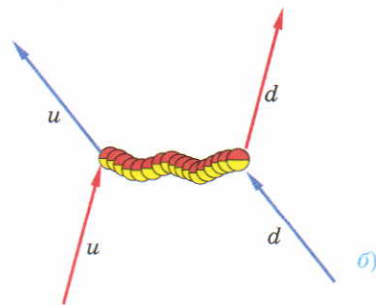
а) обмен глюоном;

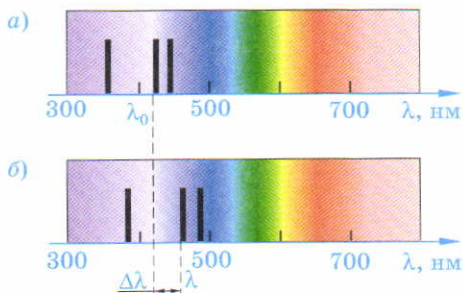
б) диаграмма Фейнмана



### ▲ XVI

Изменение аромата кварка при  $\beta^-$ -распаде

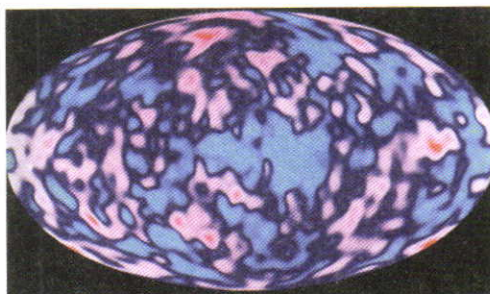




## ▲ XVII

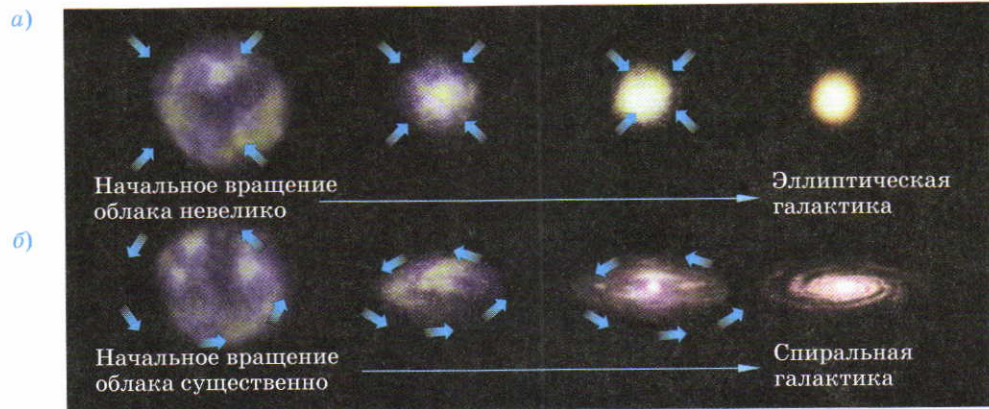
Спектральные линии  
излучения звезды:

- а) звезда покоится ( $v = 0$ );  
б) звезда движется  
от наблюдателя ( $v = 0,1$  с)



## ▲ XIX

Анизотропия температуры реликтового  
излучения, измеренной космическим  
аппаратом COBE, как подтверждение  
флуктуаций плотности первичного газа  
примерно через 350 000 лет с момента  
Большого взрыва



## ▲ XX

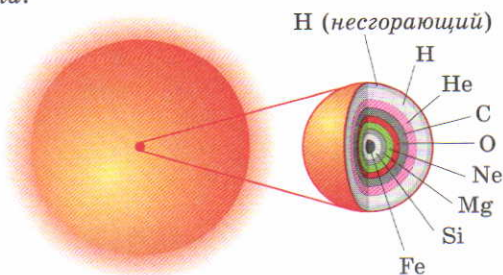
Образование галактик из газового облака:

- а) эллиптической;  
б) спиральной

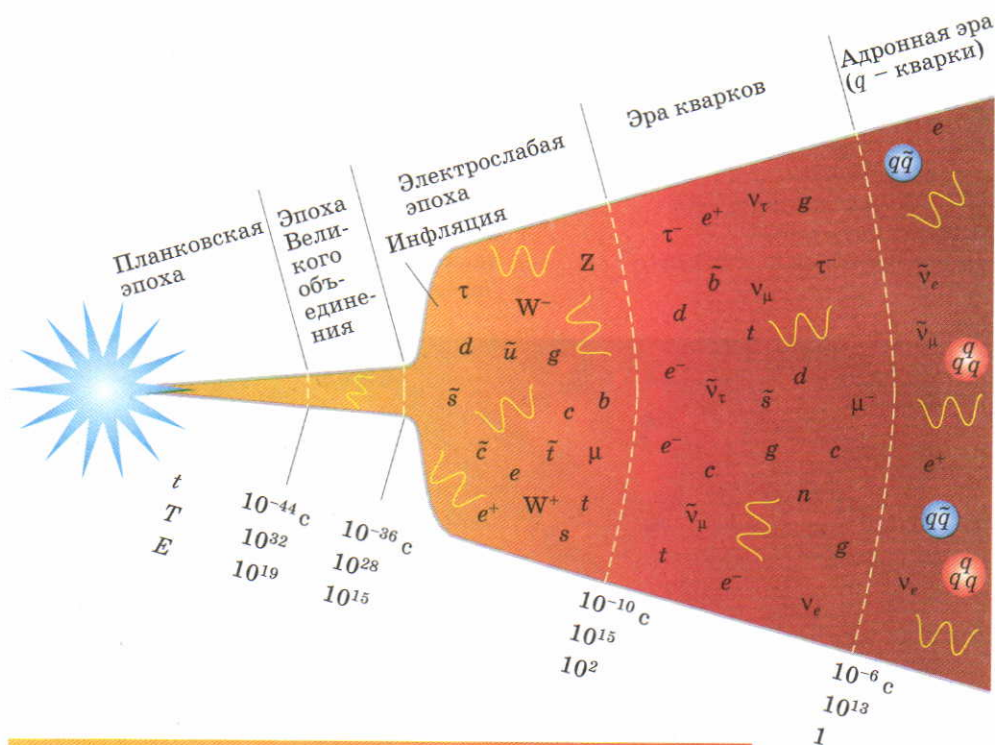
## ▶ XXII

Ядро предсверхновой звезды.

Процентный состав химических  
элементов примерно такой же,  
как на Земле



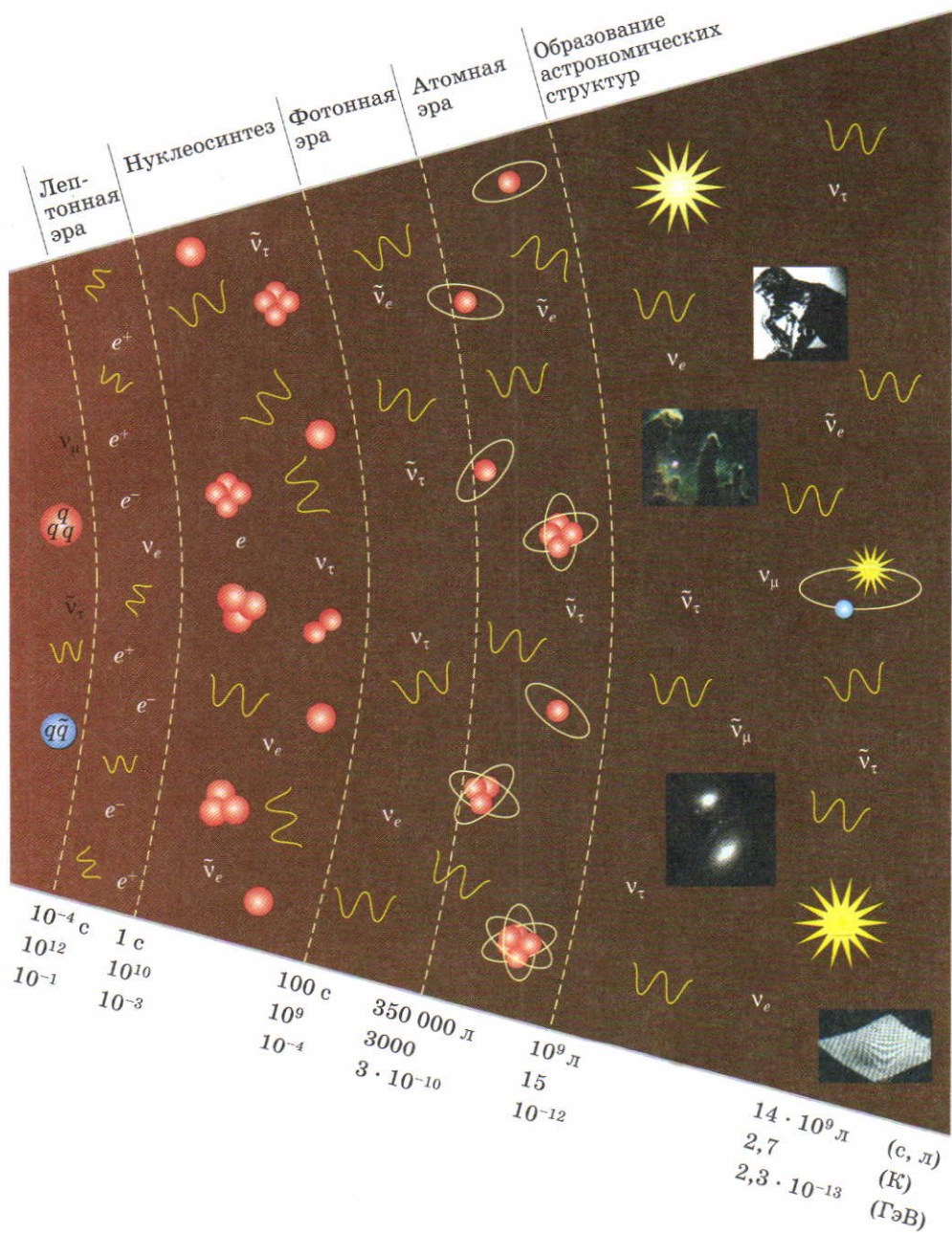




$u, d, s, t, c, b$ кварки	$q\bar{q}$ мезон	$\gamma$ фотон
$g$ глюон	$qqq$ барион	звезда
$e$ электрон	ион	галактика
$\mu^-$ мюон	атом	чёрная дыра
$\nu_e, \nu_\tau, \nu_\mu$ нейтрино		
$\tau^-$ таон		
$W, Z$ бозон		

## XVIII

Периоды эволюции Вселенной







## ▲ XXI

Крабовидная туманность  
как результат взрыва  
сверхновой

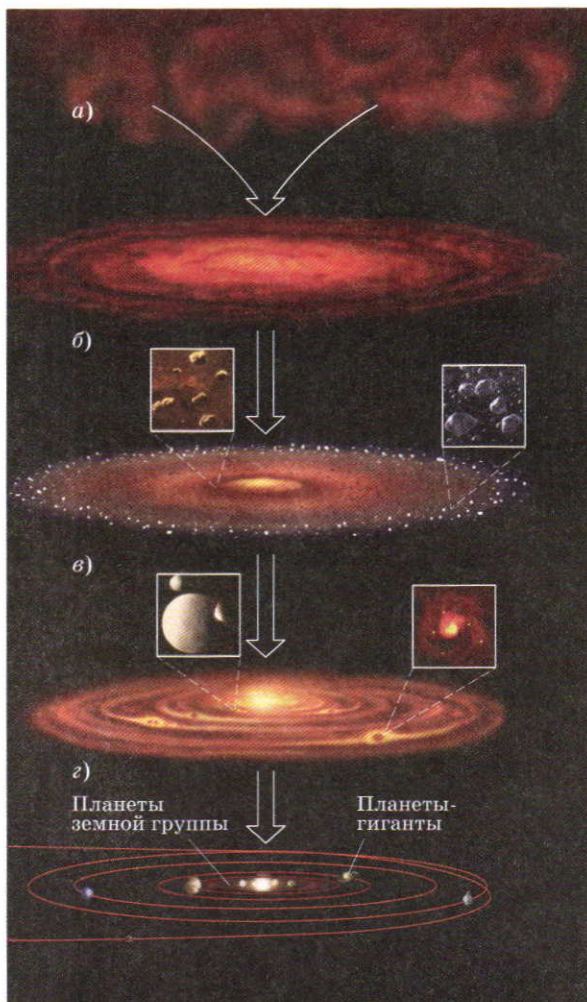


## ▲ XXIII

Газопылевые диски,  
сопровождаящие рождение  
новых звёзд в созвездии  
Ориона. У половины звёзд  
возможно образование  
планетарных систем

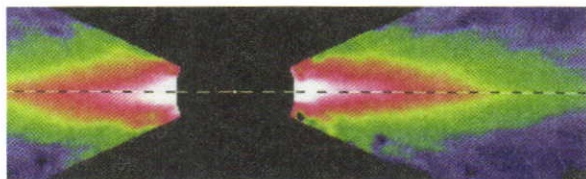
## ► XXV

Газопылевой диск у звезды  
β Пикторис (фотография  
с телескопа Хаббла).  
В центральной области  
находится яркая звезда  
и ближайшая к ней планета



## ▲ XXIV

Процесс образования Солнечной системы



не поглощённые чёрными дырами, превратятся в излучение. Вселенная будет состоять из массивных чёрных дыр, погружённых в слабое излучение. Благодаря излучению фотонов и нейтрино массы чёрных дыр постепенно будут уменьшаться.

Чёрные дыры с массой Солнца излучают всю свою энергию за  $10^{66}$  лет, а супердыры галактических масс — за  $10^{100}$  лет. При охлаждении до  $10^{-60}$  К Вселенная астрономических структур превратится во Вселенную фундаментальных частиц (фотонов, нейтрино, гравитационных волн, электронов и позитронов), разбросанных на гигантские расстояния и не взаимодействующих друг с другом.

**II.  $\rho > \rho_c$ . Вселенная прекратит расширяться, коллапсирует и погибнет в состоянии, подобном началу Большого взрыва.**

Через 40—50 млрд лет Вселенная, закончив расширение, начнёт сжиматься. Галактики, заканчивающие и закончившие своё существование, будут сжиматься. Реликтовое излучение, охладившееся до температуры 1 К, начнёт нагреваться. Вначале будут сближаться только ближайшие галактики, а затем и отдалённые. Постепенно сблизятся сверхскопления галактик. Галактики будут перекрываться и сшиваться. Вселенная будет состоять из звёзд и их скоплений. Большинство звёзд — старые: коричневые и белые карлики и чёрные дыры. Звёзды ускоряются при неограниченном сжатии Вселенной (как частицы при сжатии газа). Их столкновения друг с другом сопровождаются гигантскими взрывами и излучением. Однако большинство звёзд не сталкиваются, а проносятся в межзвёздном пространстве как кометы, оставляя за собой длинный след раскалённого газа. Вселенная становится всё плотнее и горячее. Всё заканчивается эрой излучения. Через 100 млрд лет Большой взрыв закончится и Вселенная вернётся в состояние, в котором она находилась в начальный момент Большого взрыва и в котором время теряет его последовательную определённую.

### В О П Р О С Ы

1. Какая плотность Вселенной считается критической?
2. Какие варианты эволюции Вселенной следуют из теории Фридмана?
3. Что такое «скрытая» масса Вселенной?
4. Поясните возможный вариант развития Вселенной в случае, если её реальная плотность меньше критической.
5. Поясните возможный вариант развития Вселенной в случае, если её реальная плотность больше критической.



## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Световой год** — расстояние, проходимое световым лучом за один год ( $1 \text{ св. г.} = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \times 3600 \text{ м} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м} \approx 10^{16} \text{ м}$ ).

- **Астрофизика** — раздел астрономии, изучающий физические свойства астрономических объектов.

- **Закон Хаббла:** *скорость разбегания галактик прямо пропорциональна расстоянию до них:*

$$v = H_0 r,$$

где  $H_0 = 70 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$  — постоянная Хаббла.

- **Протон-протонный цикл** — наиболее вероятная цепочка реакций с превращением четырёх протонов в одно ядро гелия.

*Термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звёзд.*

- **Эволюция звезды зависит от её массы:**

$m < 10 M_\odot \rightarrow$  белый карлик,

$10 M_\odot < m < 30 M_\odot \rightarrow$  нейтронная звезда,

$m > 30 M_\odot \rightarrow$  чёрная дыра.

- **Солнечная система** начала образовываться около 4,5 млрд лет тому назад.

- К планетам земной группы относятся Меркурий, Венера, Земля, Марс. Ядра планет земной группы Меркурия, Венеры, Земли состоят из металлического железа, а мантии — в основном из силикатов железа и магния. Исключением является ядро Марса, состоящее, по современным представлениям, из смеси железа и сульфида железа. Атмосфера Венеры и Марса в настоящее время (так же как и Земли 4 млрд лет назад) в основном состоит из углекислого газа  $\text{CO}_2$  (массы Меркурия и Луны недостаточны для удержания существенной атмосферы).

- Планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. До последнего времени считавшийся планетой Солнечной системы Плутон является самым крупным объектом в группе тел, составляющих пояс Койпера — пояс ледяных планетеземалей, который находится за планетами на расстояниях 30—100 а. е. от Солнца.

- **Комета** — планетеземаль диаметром от 5 до 500 км, покрытая льдом. Большинство наблюдаемых комет находится в облаке Оорта на расстоянии около 50 тыс. а. е. от Солнца.

## Ответы к задачам

### Глава 1

- § 2. 1. 120 Кл. 2.  $10^{19}$ . 3. 1 мм/с; 115 км/с.  
§ 4. 1. 5 А. 2. 240 В. 3. 110 м.  
§ 5. 1. 4,9 Ом. 2.  $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ . 3. 11,7 °С.  
§ 6. 1. 24 Ом. 2. 10 Ом. 3. 10 Ом.  
§ 7. 1.  $r = 1 \text{ Ом}$ ;  $R = 5 \text{ Ом}$ . 2. 12 В; 2 Ом. 3. 1 Ом; 6 А.  
§ 9. 1. 0,66 мДж. 2. 270 кДж. 3.  $R = r$ .

### Глава 2

- § 13. 1. 0,36 Н. 2. 0,01 Н. 3.  $F_{12} = F_{45} = 0$ ;  $F_{23} = 7,5 \text{ мН}$ ;  $F_{34} = 4,2 \text{ мН}$ .  
§ 14. 2. 5 мН · м. 3. 0,02 Н; 0,05 Н.  
§ 15. 1.  $2,4 \cdot 10^{-13} \text{ Н}$ . 2. 17 см; 0,22 мкс. 3. 0,2 Тл.  
§ 18. 1. 0,785 Вб; 0,39 мВб. 2. 60 мкВб. 3.  $2\pi BR^2$ .  
§ 19. 2. 2 мГн. 3. 9 Дж.

### Глава 3

- § 20. 1. 0,45 В. 3. 0,13 А.  
§ 21. 1. 10 мА, по часовой стрелке. 2. 0,12 В. 3. 500.  
§ 24. 1. 0,63 В. 2. 50 Гц. 3. 220 В.  
§ 27. 1. 2,25 А. 2. 1,18 мкс. 3. 530—800 кГц.

### Глава 4

- § 29. 1. 3 м. 2. 250 мкФ. 3. 188—377 м.

### Глава 5

- § 36. 1.  $1,24 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . 2. 405 нм. 3. 79°.  
§ 37. 1. 48°35'. 2. 48,4°. 3. 0,45 м.  
§ 39. 1. Сигналы будут усиливать друг друга. 2. 8 мкм.

### Глава 6

- § 43. 1. 3,1 эВ. 2. 0,82 эВ. 3. 0,38 мкм.  
§ 48. 1. 91,4 нм. 2. 487 нм; зелёный. 3. 121 нм.

### Глава 7

- § 50. 3. 5,71 фм.  
§ 51. 1. 15,7 эВ. 2. 104,8 МэВ. 3. 5,4 МэВ/нуклон.  
§ 53. 1.  $4,5 \cdot 10^9 \text{ лет}$ . 2.  $4,97 \cdot 10^{-16}$ . 3.  $3 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .



# Периодическая система химических

ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы											
	I		II		III		IV		V			
1	<b>H</b> 1 1s <sup>1</sup> 1,00797 Водород											
2	<b>Li</b> 3 2s <sup>1</sup> 6,939 Литий		<b>Be</b> 4 2s <sup>2</sup> 9,0122 Бериллий		<b>B</b> 5 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> 10,811 Бор		<b>C</b> 6 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> 12,01115 Углерод		<b>N</b> 7 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 14,0067 Азот			
3	<b>Na</b> 11 3s <sup>1</sup> 22,9898 Натрий		<b>Mg</b> 12 3s <sup>2</sup> 24,312 Магний		<b>Al</b> 13 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> 26,9815 Алюминий		<b>Si</b> 14 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> 28,086 Кремний		<b>P</b> 15 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> 30,9738 Фосфор			
4	<b>K</b> 19 4s <sup>1</sup> 39,102 Калий		<b>Ca</b> 20 4s <sup>2</sup> 40,08 Кальций		<b>21 Sc</b> 4d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> 44,956 Скандий		<b>22 Ti</b> 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> 47,90 Титан		<b>23 V</b> 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> 50,942 Ванадий			
	<b>29 Cu</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> 63,546 Медь		<b>30 Zn</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 65,37 Цинк		<b>Ga</b> 31 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> 69,72 Галлий		<b>Ge</b> 32 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> 72,59 Германий		<b>As</b> 33 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> 74,9216 Мышьяк			
5	<b>Rb</b> 37 5s <sup>1</sup> 85,47 Рубидий		<b>Sr</b> 38 5s <sup>2</sup> 87,62 Стронций		<b>39 Y</b> 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> 88,905 Иттрий		<b>40 Zr</b> 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> 91,22 Цирконий		<b>41 Nb</b> 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup> 92,906 Ниобий			
	<b>47 Ag</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> 107,868 Серебро		<b>48 Cd</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 112,40 Кадмий		<b>In</b> 49 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> 114,82 Индий		<b>Sn</b> 50 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> 118,69 Олово		<b>Sb</b> 51 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> 121,75 Сурьма			
6	<b>Cs</b> 55 6s <sup>1</sup> 132,905 Цезий		<b>Ba</b> 56 6s <sup>2</sup> 137,34 Барий		<b>57 La *</b> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> 138,81 Лантан		<b>72 Hf</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> 178,49 Гафний		<b>73 Ta</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> 180,948 Тантал			
	<b>79 Au</b> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup> 196,967 Золото		<b>80 Hg</b> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 200,59 Ртуть		<b>Tl</b> 81 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> 204,37 Таллий		<b>Pb</b> 82 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> 207,19 Свинец		<b>Bi</b> 83 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> 208,980 Висмут			
7	<b>Fr</b> 87 7s <sup>1</sup> [223] Франций		<b>Ra</b> 88 7s <sup>2</sup> [226] Радий		<b>89 Ac **</b> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> [227] Актиний		<b>104 Rf</b> 5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> [261] Резерфордий		<b>105 Db</b> 5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup> [262] Дубний			
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ	R <sub>2</sub> O		RO		R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ							RH <sub>4</sub>		RH <sub>3</sub>			
* ЛАНТАНОИДЫ	58 Ce 140,12 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Церий		59 Pr 140,907 4f <sup>2</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Празеодим		60 Nd 144,24 4f <sup>4</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Неодим		61 Pm [145] 4f <sup>5</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Прометий		62 Sm 150,35 4f <sup>6</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Самарий		63 Eu 151,96 4f <sup>7</sup> 5d <sup>0</sup> 6s <sup>2</sup> Европий	
** АКТИНОИДЫ	90 Th 232,038 5f <sup>0</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> Торий		91 Pa [231] 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Протактиний		92 U 238,03 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Уран		93 Np [237] 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Нептуний		94 Pu [242] 5f <sup>6</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Плутоний		95 Am [243] 5f <sup>7</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup> Америций	

# Элементы Д. И. Менделеева

Э Л Е М Е Н Т О В															
VI		VII		VIII											
		(H)		Символ элемента			Порядковый номер			He 2 Гелий 4,0026					
O 8 15,9994 Кислород		F 9 18,9984 Фтор		Электронная конфигурация внешнего слоя			Na 11 22,9898 Натрий			Ne 10 20,183 Неон					
S 16 32,064 Сера		Cl 17 35,453 Хлор		Название элемента			Относительная атомная масса			Ar 18 39,948 Аргон					
Cr 24 51,996 Хром		Mn 25 54,938 Марганец		26 Fe 55,847 Железо		27 Co 58,9332 Кобальт		28 Ni 58,71 Никель							
Se 34 78,96 Селен		Br 35 79,904 Бром											Kr 36 83,80 Криптон		
Mo 42 95,94 Молибден		Tc 43 [99] Технеций		44 Ru 101,07 Рутений		45 Rh 102,905 Родий		46 Pd 106,4 Палладий							
Te 52 127,60 Теллур		I 53 126,9044 Иод											Xe 54 131,30 Ксенон		
W 74 183,85 Вольфрам		Re 75 186,2 Рений		76 Os 190,2 Осмий		77 Ir 192,2 Иридий		78 Pt 195,09 Платина							
Po 84 [210] Полоний		At 85 [210] Астат											Rn 86 [222] Радон		
Sg 106 [263] Сиборгий		Bh 107 [262] Борий		108 Hs 265 Хассий		109 Mt 266 Мейтнерий									
RO <sub>3</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		RO <sub>4</sub>											
H <sub>2</sub> R		HR													
4 Gd 72,25 Гадолиний		65 Tb 158,924 Тербий		66 Dy 162,50 Диспрозий		67 Ho 164,930 Гольмий		68 Er 167,26 Эрбий		69 Tm 168,934 Тулий		70 Yb 173,04 Иттербий		71 Lu 174,97 Лютеций	
6 Cm 247 Кюри		97 Bk [247] Берклий		98 Cf [249] Калифорний		99 Es [254] Эйнштейний		100 Fm [253] Фермий		101 Md [256] Менделевий		102 No [255] Нобелий		103 Lr [257] Лоуренсий	



# Предметно-именной указатель<sup>1</sup>

- Абсолютный показатель преломления** 129  
**Адроны** 222  
**Активность радиоактивного вещества** 195  
**Альфа-распад** 190  
**Альфа-частицы** 165  
**Ампер А.** 40  
**Амперметр** 24  
**Андерсон К.** 218  
**Аннигиляция** 219  
**Антикварк** 225  
**Антинейтрино** 192  
**Античастицы** 218  
**Астероиды** 252  
**Астрономические структуры** 230  
**Астрофизика** 230  
**Атом водорода** 167  
— теория Бора 167  
— энергетический спектр 168  
**Атомная бомба** 207  
**Барионы** 221  
**Басов Н. Г.** 176  
**Беккерель (единица активности радиоактивного вещества)** 195  
**Белый карлик** 243  
**Бета-распад** 191  
**Бете Х.** 242  
**Бипризма Френеля** 143  
**Бозоны** 217  
— промежуточные 221  
**Большой взрыв** 239  
**Бор Н.** 167  
**Ван дер Меер С.** 221  
**Вебер (единица магнитного потока)** 58  
**Вектор магнитной индукции** 36  
——— модуль 43  
**Взаимодействие сильное** 219  
— слабое 220  
**Вибратор Герца** 94  
**Виллар П.** 113  
**Внутреннее сопротивление источника тока** 23  
**Водородная бомба** 208  
**Волновой фронт** 101  
**Вольт-амперная характеристика фотоэффекта** 155  
**Вольтметр** 25  
**Вспышка сверхновой** 244  
**Газопылевой диск** 247  
**Гальвакс В.** 155  
**Гальванический элемент** 7  
**Гамма-лучи** 113  
**Гамов Г.** 239  
**Ган О.** 196  
**Гейгер Х.** 165  
**Геллман М.** 223  
**Генератор переменного электрического тока** 80  
**Генри Дж.** 73  
**Генри (единица индуктивности)** 61  
**Герц Г.** 94  
**Гильберт У.** 33  
**Гипероны** 222  
**Главное квантовое число** 168  
**Глюоны** 227  
**Грэй (доза поглощённого излучения)** 210  
**Декарт Р.** 33  
**Деление ядер** 189  
**Детектирование сигнала** 120  
**Джоуль Дж.** 27  
**Дисперсия света** 133

<sup>1</sup> Номер страницы указан по первому упоминанию термина.

- Дифракция отдельных фотонов 159  
— света 146  
— на щели 147  
Длина волны де Бройля 161  
Доза поглощённого излучения 210  
— — — эквивалентная 211
- Е**стественный радиационный фон 211
- З**ависимость удельного сопротивления от температуры 14  
— для полупроводников 16  
— для проводников 14  
Закон Ампера 42  
— Джоуля—Ленца 27  
— Ома 10  
— — для замкнутой цепи 21  
— для однородного проводника 11  
— отражения света 127  
— преломления света 129  
— радиоактивного распада 194  
— сохранения барионного заряда 223  
— Фарадея 70  
— Хаббла 237  
Зарядка конденсатора 85  
Зарядовое число 183  
Зельдович Я. Б. 241  
Земной магнетизм 40  
Зиверт (единица эквивалентной дозы поглощённого излучения) 211  
Зоны Френеля 148
- И**ваненко Д. Д. 183  
Излучение вынужденное (индуцированное) 175  
— инфракрасное 109  
— лазерное 177  
— спонтанное 175  
— ультрафиолетовое 111  
Инверсная населённость 176  
Индуктивность контура 61  
Индукционный ток 69  
Интерференция волн 135  
Источник тока 7
- К**вазар 246  
Квант излучения 154  
Кварки 223  
Кварк-лептонная симметрия 227  
Когерентность 136  
Когерентные источники света 136  
— волны 136  
Кометы 252  
Контур колебательный 87  
— свободные колебания 89  
— и период собственных колебаний 90  
Корпускулярно-волновой дуализм 159  
Космология 230  
Красное смещение 238  
Красный гигант 243  
Критическая масса 199  
— плотность Вселенной 255  
Камерлинг Оннес Х. 15  
Коэффициент размножения нейтронов 199
- Л**азер 174  
Ленард Ф. 155  
Ленц Э. Х. 70  
Лептоны 221  
Линии магнитной индукции 38  
Лоренц Х. 50
- М**агнитный поток 57  
Магнитоэлектрическая индукция 87  
Максвелл Дж. 94  
Маркони Г. 116  
Марсден Э. 165  
Массовое число 183  
Мезоны 222  
Мейман Т. 176  
Млечный Путь 231  
Модель Фридмана 255  
Модуляция 118



Модуляция амплитудная 118  
 Мощность электрического тока 28

Нейтрино 192  
 — мюонное 221  
 — таонное 221  
 — электронное 221

Нейтрон 182  
 Нейтронная звезда 244

Носители тока 3

Нуклоны 183

Облако Оорта 253  
 Образование галактик 240  
 — звёзд 242  
 — Солнечной системы 246  
 Однородное магнитное поле 44  
 Ом Г. 10  
 Ом (единица сопротивления) 12  
 Оорт Я. 253  
 Оптика волоконная 133  
 Опыт Генри 73  
 — Герца 94  
 — Резерфорда 165  
 — Столетова 155  
 — Фарадея (с катушками) 71  
 — Эрстеда 34  
 — Юнга 142  
 Отражение света 126

Парсек 237  
 Перегрин П. 32  
 Период полураспада 193  
 Периоды эволюции Вселенной 240  
 Планетеземали 248  
 Планеты-гиганты 252  
 — земной группы 249  
 Плоскость поляризации 95  
 Поглощение света 171  
 Позитрон 217  
 Поле магнитное 33  
 — вихревое 39  
 Полное внутреннее отражение 131  
 Полюсы магнита 40

Попов А. С. 116  
 Постоянная Планка 154  
 — Хаббла 237  
 Постулаты Бора 167  
 — первый 167  
 — второй 170  
 Поток жидкости 57  
 Пояс Койпера 252  
 Правило буравчика (правого винта) 38  
 — для витка с током 38  
 — для прямого тока 36  
 — левой руки 50  
 — Ленца 70  
 — правой руки 36  
 Преломление света 128  
 Принцип Гюйгенса 125  
 — Гюйгенса—Френеля 147  
 — Паули 217  
 — суперпозиции 37  
 Просветление оптики 144  
 Протозвезда 243  
 Протон-протонный цикл 242  
 Протон 183  
 Протонно-нейтронная модель ядра 183  
 Прохоров А. М. 176  
 Пуассон С. Д. 145  
 Работа выхода электрона из металла 156  
 — электрического поля 27  
 Радиационные пояса Земли 54  
 Радиоактивность 190  
 — естественная 190  
 — искусственная 190  
 Радиовещание 115  
 Радиолокация 115  
 Радиосвязь 114  
 Радиотелеграфная связь 115  
 Радиус атомного ядра 166  
 — боровской орбиты 168  
 Разность хода волн 140  
 Реакция ядерная 197  
 — самоподдерживающаяся 199  
 — синтеза 205

- Реакция цепная 198  
Резерфорд Э. 165  
Резистор 13  
Рентген В. 112  
Риги А. 155  
Риттер И. 111  
Руббин К. 221
- С**амоиндукция 74  
Сахаров А. Д. 208  
Сверхпроводимость 15  
— высокотемпературная 16  
Сверхпроводимость низкотемпературная 15  
Свет видимый 110  
— естественный 142  
Световод 132  
Световой год 230  
Серия Бальмера 172  
— Брэкета 172  
— Лаймана 172  
— Пашена 172  
— Pfунда 172  
Сила Ампера 42  
— тока 5  
— Лоренца 49  
Синтез тяжёлых элементов 244  
Собственная индукция 38  
Соединение проводников 18  
— — параллельное 19  
— — последовательное 18  
Соотношение неопределённостей Гейзенберга 162  
Сопrotивление проводника 12  
Спектр 108  
— атома водорода 172  
— линейчатый 173  
— поглощения 173  
— электромагнитных волн 108  
Спектральный анализ 173  
Спин 168  
— кварка 225  
— нуклона 183  
— электрона 168  
Столетов А. Г. 155  
Сторонние силы 8
- Т**амм И. Е. 207  
Таунс Ч. 176  
Температурный коэффициент сопротивления 14  
Термоядерный синтез 205  
Тесла (единица магнитной индукции) 43  
Ток замыкания 74  
— переменный 80  
— проводимости 86  
— размыкания 74  
— смещения 85  
— электрический 3  
Томсон У. 90  
Трансформатор 76  
— повышающий 77  
— понижающий 78
- У**гол отражения 127  
— падения 126  
— полного внутреннего отражения 132  
— преломления 128  
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта 157  
Условие интерференционного максимума 140  
— — минимума 141
- Ф**абрикант В. А. 173  
Фарадей М. 68  
Фейнман Р. 184  
Фермионы 217  
Фотон 151  
Фотоэффект 155  
— опыты Столетова 154  
— законы 156  
— красная граница 157  
Френель О. 146  
Фридман А. А. 239  
Фундаментальные частицы 217
- Х**аббл Э. 236  
Химический состав межзвёздного вещества 246  
Хронология образования Солнечной системы 253



- Цвейг Д. 223  
Цветовой заряд кварков 226
- Чедвик Дж. 182  
Чёрная дыра 246
- Ширина канала связи 119  
Штрассман Ф. 196
- Эволюция звёзд 243  
Эйнштейн А. 155  
Электродвижущая сила 9  
— — в проводнике, движущемся  
в магнитном поле 66  
— — индукции 70  
— — самоиндукции 74  
Электромагнитная волна 94  
— — плоскополяризованная 99  
— — давление 106
- Электромагнитная волна импульс  
107  
— — индукция 68  
— — интенсивность 103  
— — луч 101  
— — фронт 101  
— — энергия 107  
Энергия ионизации 170  
— кванта 155  
— связи нуклонов в ядре (удель-  
ная) 187  
Эрстед Х. 34
- Юнг Т. 143
- Ядерный реактор 200  
Ядра магические 187

# Содержание

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

### Глава 1. Постоянный электрический ток

§ 1. Электрический ток .....	3
§ 2. Сила тока .....	5
§ 3. Источник тока в электрической цепи. ЭДС .....	7
§ 4. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи) .....	10
§ 5. Зависимость удельного сопротивления проводников и полупроводников от температуры .....	14
§ 6. Соединения проводников .....	17
§ 7. Закон Ома для замкнутой цепи .....	21
§ 8. Измерение силы тока и напряжения .....	24
§ 9. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля—Ленца .....	26
Пример решения задачи .....	29
Основные положения .....	30

### Глава 2. Магнитное поле

§ 10. Магнитное взаимодействие .....	32
§ 11. Магнитное поле электрического тока .....	34
§ 12. Магнитное поле .....	38
§ 13. Действие магнитного поля на проводник с током .....	41
§ 14. Рамка с током в однородном магнитном поле .....	44
§ 15. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы .....	49
§ 16. Пространственные траектории заряженных частиц в магнитном поле ..	52
§ 17. Взаимодействие электрических токов .....	55
§ 18. Магнитный поток .....	57
§ 19. Энергия магнитного поля тока .....	59
Пример решения задачи .....	62
Основные положения .....	63

### Глава 3. Электромагнетизм

§ 20. ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле .....	66
§ 21. Электромагнитная индукция .....	68
§ 22. Опыты Генри .....	73
§ 23. Использование электромагнитной индукции .....	76
§ 24. Генерирование переменного электрического тока .....	80
§ 25. Передача электроэнергии на расстояние .....	83
§ 26. Магнитоэлектрическая индукция .....	85



§ 27. Свободные гармонические электромагнитные колебания	
в колебательном контуре .....	87
Пример решения задачи .....	91
Основные положения .....	93

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### **Глава 4. Излучение и приём электромагнитных волн радио- и СВЧ-диапазона**

§ 28. Электромагнитные волны .....	94
§ 29. Распространение электромагнитных волн .....	97
§ 30. Энергия, переносимая электромагнитными волнами .....	102
§ 31. Давление и импульс электромагнитных волн .....	106
§ 32. Спектр электромагнитных волн .....	108
§ 33. Радио- и СВЧ-волны в средствах связи .....	114
§ 34. Радиотелефонная связь, радиовещание .....	118
Основные положения .....	121

### **Глава 5. Волновые свойства света**

§ 35. Принцип Гюйгенса .....	124
§ 36. Преломление волн .....	128
§ 37. Полное внутреннее отражение. Дисперсия света .....	131
§ 38. Интерференция волн .....	135
§ 39. Взаимное усиление и ослабление волн в пространстве .....	138
§ 40. Когерентные источники света .....	142
§ 41. Дифракция света .....	145
§ 42. Дифракция света на щели. Дифракционная решётка .....	147
Пример решения задачи .....	151
Основные положения .....	151

### **Глава 6. Квантовая теория электромагнитного излучения и вещества**

§ 43. Фотоэффект .....	154
§ 44. Корпускулярно-волновой дуализм .....	158
§ 45. Волновые свойства частиц .....	161
§ 46. Планетарная модель атома .....	164
§ 47. Теория атома водорода .....	167
§ 48. Поглощение и излучение света атомом .....	170
§ 49. Лазер .....	174
Пример решения задачи .....	179
Основные положения .....	180

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

### **Глава 7. Физика атомного ядра**

§ 50. Состав атомного ядра .....	182
§ 51. Энергия связи нуклонов в ядре .....	187
§ 52. Естественная радиоактивность .....	190

§ 53. Закон радиоактивного распада	193
§ 54. Искусственная радиоактивность	196
§ 55. Использование энергии деления ядер. Ядерная энергетика	200
§ 56. Термоядерный синтез	205
§ 57. Ядерное оружие	207
§ 58. Биологическое действие радиоактивных излучений	209
Пример решения задачи	213
Основные положения	213

## Глава 8. Элементарные частицы

§ 59. Классификация элементарных частиц	216
§ 60. Лептоны и адроны	221
§ 61. Кварки	223
§ 62. Взаимодействие кварков	225
Основные положения	228

## ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОФИЗИКИ

### Глава 9. Эволюция Вселенной

§ 63. Структура Вселенной	230
§ 64. Расширение Вселенной. Закон Хаббла	236
§ 65. Эволюция ранней Вселенной	239
§ 66. Образование астрономических структур	240
§ 67. Эволюция звёзд	243
§ 68. Образование Солнечной системы	246
§ 69. Эволюция планет земной группы	249
§ 70. Эволюция планет-гигантов	252
§ 71. Возможные сценарии эволюции Вселенной	255
Основные положения	258
Ответы к задачам	259
Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева	260
Предметно-именной указатель	262



*Учебное издание*  
**Касьянов Валерий Алексеевич**

## **ФИЗИКА**

**11 класс**

**Базовый уровень**

**Учебник**  
**для общеобразовательных учреждений**

Ответственный редактор *Е. Н. Тихонова*  
Оформление *Л. П. Копачева*. Художник *Л. Я. Александрова*  
Художественный редактор *М. В. Мандрыкина*  
Технический редактор *И. В. Грибкова*  
Компьютерная верстка *А. В. Маркин, Т. В. Рыбина*  
Компьютерная графика *С. Л. Мамедова*  
Корректоры *Г. И. Мосякина, Е. Е. Никулина*