

В. А. Касьянов

# Физика

# 11

ПРОФИЛЬНЫЙ  
УРОВЕНЬ

В. А. Касьянов

# Физика

# 11

класс

УЧЕБНИК  
ДЛЯ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
УЧРЕЖДЕНИЙ  
ПРОФИЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ

---

*Рекомендовано  
Министерством образования и науки  
Российской Федерации*

8-е издание, доработанное

Москва

---



---

2011



**Касьянов, В. А.**  
К28 **Физика. 11 кл. Профильный уровень : учеб. для общеобразоват. учреждений / В. А. Касьянов. — 8-е изд., дораб. — М. : Дрофа, 2011. — 448 с. : ил., 7 л. цв. вкл.**

ISBN 978-5-358-09554-0

Учебник предназначен учащимся 11 классов, в которых физика изучается на профильном уровне, и является продолжением учебника «Физика. 10 класс. Профильный уровень» того же автора. Учебник В. А. Касьянова «Физика. 11 класс» переработан и дополнен в соответствии с федеральным компонентом государственного стандарта общего образования.

Книга создана с учетом современных научных представлений, включает следующие разделы: «Электродинамика», «Электромагнитное излучение», «Физика высоких энергий», «Эволюция Вселенной».

Достоинством учебника является тщательно разработанный методический аппарат, включающий вопросы и задачи различной степени сложности. Книга хорошо иллюстрирована.

К учебнику издана тетрадь для лабораторных работ.

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72

*Учебное издание*

**Касьянов Валерий Алексеевич**

**ФИЗИКА**

**11 класс**

**Профильный уровень**

**Учебник для общеобразовательных учреждений**

Ответственный редактор *Е. Н. Тихонова*. Оформление *Л. П. Копачева*  
Художник *Л. Я. Александрова*. Художественный редактор *Л. П. Копачева*  
Технический редактор *Н. И. Герасимова*. Компьютерная верстка *Г. М. Татаринова*  
Компьютерная графика *С. Л. Мамедова*. Корректоры *Г. И. Мосякина, Е. Е. Никулина*  
Цветоделение *А. Е. Косых, О. А. Молочков*

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.60.953.Д.010360.06.10 от 29.06.2010.  
Подписано к печати 24.12.10. Формат 70 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Школьная».  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 32,76 + 1,02 усл. печ. л. цв. вкл. Тираж 10 000 экз. Заказ № 125.

ООО «Дрофа». 127018, Москва, Сущевский вал, 49.

**Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги просим направлять в редакцию общего образования издательства «Дрофа»:**  
127018, Москва, а/я 79. Тел.: (495) 795-05-41. E-mail: chief@drofa.ru

**По вопросам приобретения продукции издательства «Дрофа» обращаться по адресу:**  
127018, Москва, Сущевский вал, 49. Тел.: (495) 795-05-50, 795-05-51. Факс: (495) 795-05-52.

Торговый дом «Школьник». 109172, Москва, ул. Малые Каменщики, д. 6, стр. 1А.

Тел.: (495) 911-70-24, 912-15-16, 912-45-76.

Сеть магазинов «Переплетные птицы». Тел.: (495) 912-45-76.

Интернет-магазин: <http://www.drofa.ru>

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных издательством материалов в ОАО «Тверской орден Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР».  
170040, г. Тверь, проспект 50 лет Октября, 46.



ISBN 978-5-358-09554-0

© ООО «Дрофа», 2001

© ООО «Дрофа», 2011, с изменениями

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

---



## Постоянный электрический ток

### § 1. Электрический ток

**Электрические заряды в движении.** Гравитационное притяжение испытывают все тела и частицы. Структура Вселенной формируется гравитационным притяжением тел огромных масс. Неограниченное гравитационное сжатие предотвращает движение этих тел.

Существование тел конечных размеров оказывается возможным потому, что между частицами вещества действуют более мощные, чем гравитационные, силы электромагнитной природы: притяжения и отталкивания, которые могут уравновесить друг друга. Как мы выяснили ранее (см. Ф-10, § 78), система неподвижных (статических) электрических зарядов не может быть устойчивой. Устойчивой может быть лишь система движущихся зарядов. Поэтому в этой главе мы рассмотрим электромагнитное поле движущихся электрических зарядов.

Электрический заряд является источником электромагнитного поля, которое распространяется в пространстве со скоростью света.

Энергия электромагнитного поля, переносимая в пространстве от одного заряда к другому, убывает при увеличении расстояния между зарядами. Изменить энергию электромагнитного взаимодействия зарядов можно, например, приближая один заряд к другому или удаляя их друг от друга.

**Движение зарядов в проводнике.** Направленное движение зарядов в проводнике приводит к переносу энергии электромагнитного поля в пространстве.

*Для существования электрического тока необходимы свободные заряды — носители заряда, например заряженные частицы: положительные и отрицательные ионы, электроны.*



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

В проводнике концентрация свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объёму проводника, не покидая его пределов, наибольшая. Поэтому для передачи энергии электромагнитного поля из одной точки пространства в другую используют металлические проводники подобно тому, как для транспортировки воды применяют трубы.

Направленное движение свободных зарядов в проводнике возможно под действием внешнего *электрического поля*.

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

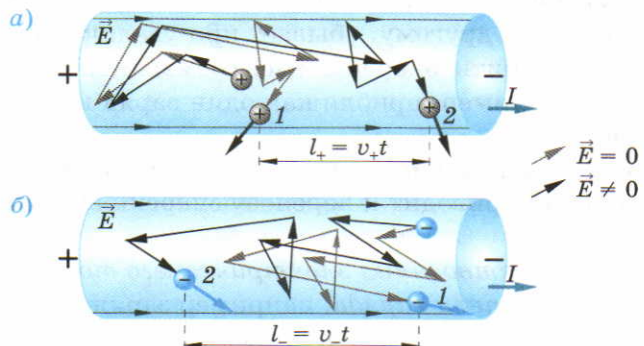
Так движутся, например, положительные и отрицательные ионы в электролитах, электроны в металлических проводниках. После нескольких столкновений с другими частицами заряженные частицы могут вернуться практически к первоначальному положению.

В том случае, когда к проводнику приложено внешнее электрическое поле ( $E \neq 0$ ), на заряды действует дополнительно кулоновская сила. В результате этого положительный заряд, притягиваясь к отрицательному полюсу и отталкиваясь от положительного, приобретает составляющую скорости  $v_+$  вдоль напряжённости электрического поля. За промежуток времени  $t$  положительный заряд «дрейфует» на расстояние  $l_+ = v_+ t$  в направлении напряжённости электрического поля (чёрная линия на рис. 1). Отрицательный заряд смещается на расстояние  $l_- = v_- t$  ( $v_-$  — скорость дрейфа в направлении, противоположном напряжённости электрического поля).

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

### 1 ►

Движение носителей зарядов в проводнике. Наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое движение в электрическом поле: а) положительных; б) отрицательных

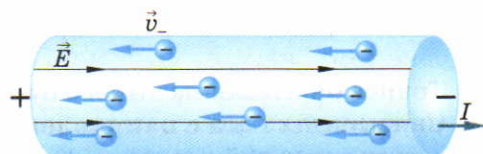




**За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц.**

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

В металлах, где носителями тока являются свободные, отрицательно заряженные электроны, направление тока считается противоположным направлению скорости их упорядоченного движения (рис. 2).



▲ 2

*Направление тока в металлическом проводнике противоположно направлению движения электронов*

### ВОПРОСЫ

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.** Интенсивность направленного движения заряженных частиц в проводнике характеризует величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с, или *сила тока*. Эта величина может меняться с течением времени.

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

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

Формула (1) в математике представляет собой производную. Поэтому

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

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 § 25.

**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. 3). 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  $\Delta l = v\Delta t$ . 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.

Из формулы (1), следует, что сила тока

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

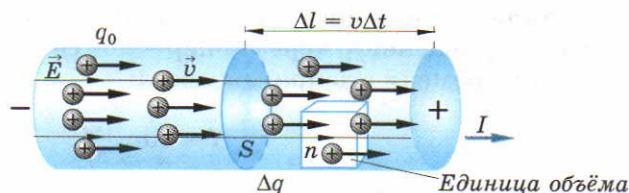
Если скорость движения зарядов не зависит от времени, т. е.  $v = \text{const}$ , то сила тока  $I = \text{const}$ .

**Постоянный электрический ток — ток, сила тока и направление которого не изменяются с течением времени.**

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

### 3

Движение положительных зарядов в проводнике (электролите)



## ВОПРОСЫ

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?

## ЗАДАЧИ

1. Какой заряд пройдёт через поперечное сечение проводника за 1 мин, если сила тока в проводнике 2 А? [120 Кл]
2. Сколько электронов проходит через спираль лампы накаливания за 1 с при силе тока в лампе 1,6 А? [10<sup>19</sup>]
3. По проводнику в течение года протекает ток силой 1 А. Найдите массу электронов, прошедших за этот промежуток времени сквозь поперечное сечение проводника. Отношение заряда электрона к его массе  $e/m_e = 1,76 \cdot 10^{-11}$  Кл/кг. [0,18 г]
4. 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. [1 мм/с; 115 км/с]
5. За 4 с сила тока в проводнике линейно возросла с 1 до 5 А. Постройте график зависимости силы тока от времени. Какой заряд прошёл через поперечное сечение проводника за это время? [12 Кл]

## § 3. Источник тока

**Условие существования постоянного тока в проводнике.** Рассмотрим условия существования постоянного тока в проводнике. При помещении проводника во внешнее постоянное электрическое поле в нём происходит перераспределение свободных зарядов, называемое *электростатической индукцией* (см. Ф-10, § 86).

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 проводниках электрического поля. Напряжённость внешнего поля должна быть больше напряжённости поля индуцированных зарядов. Это возможно, если скорость нарастания внешне-го электрического поля превосходит скорость разделения индуцирован-



ных 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.**

**Гальванический элемент.** 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.

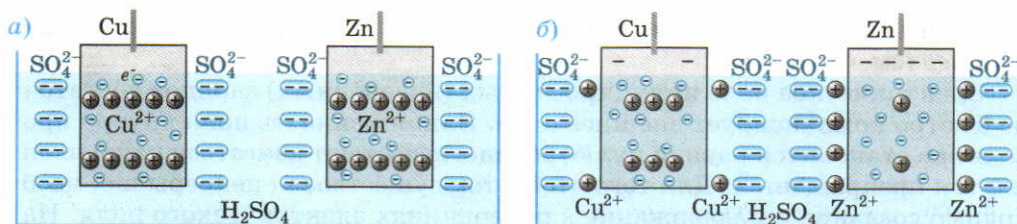
В элементе Вольта в раствор серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) погружены медный (Cu) и цинковый (Zn) электроды. Отрицательные ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ , находящиеся в растворе вблизи электронейтральных медного и цинкового электродов, притягивают ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ , располагающиеся в узлах кристаллической решётки (рис. 4, а). Энергия притяжения разноимённых ионов превосходит энергию связи ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в кристаллической решётке металлических электродов, поэтому эти ионы переходят в раствор.

Кинетическая энергия  $(E_k)_{\text{Cu}^{2+}}$  ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , переходящих в раствор, оказывается меньше кинетической энергии  $(E_k)_{\text{Zn}^{2+}}$  ионов  $\text{Zn}^{2+}$ , так как энергия связи  $E_{\text{Cu}}$  ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$  в кристаллической решётке превышает энергию связи  $E_{\text{Zn}}$  ионов  $\text{Zn}^{2+}$  (рис. 5):

$$(E_k)_{\text{Cu}^{2+}} = E_{\pm} - E_{\text{Cu}}, \quad (E_k)_{\text{Zn}^{2+}} = E_{\pm} - E_{\text{Zn}},$$

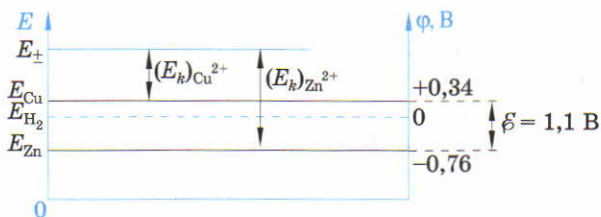
где  $E_{\pm}$  — энергия ионов в растворе.

Чем больше положительных ионов переходит в раствор, тем большим становится по модулю отрицательный заряд электрода (рис. 4, б), что пре-



#### ▲ 4

Перераспределение зарядов в гальваническом элементе Вольта



**5**  
 Электродвижущая  
 сила гальванического  
 элемента Вольта

пятствует выходу из него других ионов. Растворение электродов прекращается, если кинетическая энергия положительных ионов оказывается недостаточной для преодоления разности потенциалов двойного электрического слоя. Этот слой образован положительными зарядами ионов в растворе и отрицательными избыточными зарядами электродов:

$$(E_k)_{Cu^{2+}} = q_0\phi_{Cu}, (E_k)_{Zn^{2+}} = q_0\phi_{Zn},$$

где  $\phi_{Cu}$  и  $\phi_{Zn}$  — потенциалы медного и цинкового электродов относительно раствора.

Обычно за нуль отсчёта энергии связи принимают энергию  $E_{H_2}$ , необходимую для ионизации газообразного молекулярного водорода. Соответственно, в качестве нуля отсчёта потенциала электродов принят потенциал на так называемом *водородном электроде* (см. ось  $\phi$  на рис. 5). Водородный электрод образуется газообразным водородом, находящимся вблизи химически нейтральной платины.

Нормальные электродные потенциалы — потенциалы на электродах, отсчитываемые относительно водородного электрода.

Нормальные электродные потенциалы для некоторых металлов приведены в таблице 1.

**ЭДС гальванического элемента.** Между медным и цинковым электродами возникает постоянное напряжение, равное разности нормальных потенциалов (см. рис. 5):

$$\mathcal{E} = \phi_{Cu} - \phi_{Zn} = 0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ (В)},$$

называемое *электродвижущей силой гальванического элемента Вольта* или ЭДС.

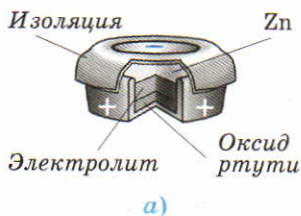
Медный электрод, имеющий больший потенциал, оказывается положительным полюсом источника — *анодом*, а цинковый — отрицатель-

Таблица 1

Нормальные электродные потенциалы

Металл	$\phi$ , В
Литий	-3,0
Калий	-2,9
Натрий	-2,7
Алюминий	-1,7
Цинк	-0,76
Железо	-0,44
Олово	-0,14
Свинец	-0,13
Медь	+0,34
Ртуть	+0,80
Серебро	+0,80
Платина	+1,2
Золото	+1,3





ным — *катодом*. Используя данные таблицы 1, можно аналогично рассчитать ЭДС элемента с парой электродов из других металлов. Наиболее распространённые элементы — источники тока — изображены на рисунке 6. Ртутная батарейка<sup>1</sup> (рис. 6, а), используемая в часах, калькуляторах и слуховых аппаратах, даёт ЭДС около 1,4 В. Традиционная батарейка для карманных фонарей (рис. 6, б) имеет ЭДС 1,5 В.

### ВОПРОСЫ

1. Почему электростатическая индукция препятствует существованию постоянного тока в проводнике?
2. Что такое источник тока? Какова его роль в электрической цепи?
3. Что такое гальванический элемент? Почему происходит разделение зарядов в гальваническом элементе Вольта?
4. Когда прекращается растворение электродов в растворе электролита?
5. Что такое нормальный электродный потенциал? Чему равна разность потенциалов на зажимах гальванического элемента?

## ▲ 6

Источники тока:

- а) миниатюрная батарейка;  
б) батарейка для карманного фонаря

## § 4. Источник тока в электрической цепи

**Сторонние силы.** При соединении проводником электродов (полюсов) источника тока по проводнику под действием постоянной разности потенциалов протекает электрический ток. Движущиеся от катода к аноду по проводнику электроны уменьшают разность потенциалов между электродами, унося отрицательный заряд с катода и нейтрализуя положительный на аноде. 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

<sup>1</sup> Сегодня ртутные батарейки стараются заменить серебряно-цинковыми, чтобы ограничить применение вредных веществ.



зарядами, может происходить лишь под действием непотенциальных сил, называемых *сторонними силами*.

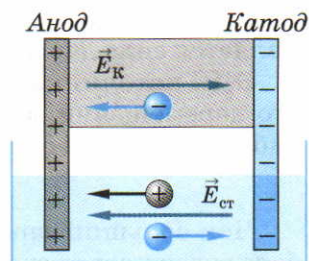
**Сторонние силы — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов в источнике тока.**

Происхождение сторонних сил может быть различным. В гальваническом элементе, например, сторонние силы возникают за счёт химической реакции между электродами и электролитом (рис. 7).

**Движение заряженных частиц в источнике тока.** Выясним особенности движения заряженных частиц в источнике тока. В качестве примера рассмотрим гальванический элемент, поддерживающий постоянный электрический ток в проводнике, присоединённом к его полюсам (рис. 8, а).

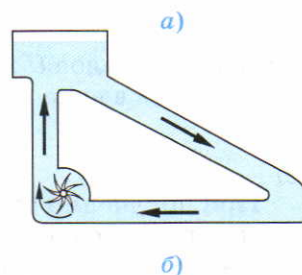
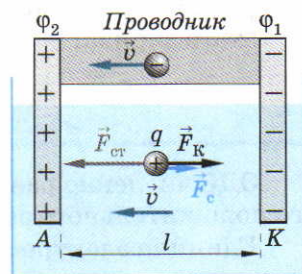
Положительно заряженная частица (ион) движется в электролите гальванического элемента от катода к аноду под действием сторонней силы  $\vec{F}_{\text{ст}}$ . Кроме того, на эти частицы действуют в направлении, противоположном скорости её движения, сила Кулона  $\vec{F}_{\text{К}}$  со стороны электродов и сила сопротивления  $\vec{F}_{\text{с}}$ . Сила сопротивления характеризует противодействие движению заряженной частицы со стороны ионов, с которыми она сталкивается в процессе движения в электролите. Достигая электродов, заряженные частицы увеличивают их заряд. Благодаря этому между электродами поддерживается постоянная разность потенциалов  $U$ .

Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости (рис. 8, б). Течение жидкости, движущейся из верхнего резервуара по наклонной трубе под действием силы тяжести, сопровождается потерями энергии на трение. Поэтому для циркуляции жидкости в системе необходим насос, сообщаящий жидкости дополнительную скорость, необ-



▲ 7

*Возникновение сторонних сил в гальваническом элементе*



▲ 8

*Аналогия между действием источника тока и водяного насоса:*

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

б) водяной насос

ходимую для её возвращения в резервуар. Сторонней силой в этом случае является сила давления на воду вращающейся крыльчатки насоса.

**ЭДС источника тока.** Изменение потенциальной энергии заряда при его перемещении между электродами источника тока равно суммарной работе сторонней силы и силы сопротивления (см. Ф-10, формула (90)).

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

Чем больший заряд перемещается в источнике тока, тем большая работа совершается сторонними силами. Отношение работы сторонних сил к переносимому заряду является постоянной величиной для данного источника тока, называемой *электродвижущей силой (ЭДС)*.

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

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

ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда между полюсами источника тока.

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

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$$

Так как изменение потенциальной энергии заряда связано с разностью потенциалов  $U$  между электродами:  $\Delta W = qU$ , то формулу (4) можно представить в виде

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

При получении этого выражения мы учли, что работа силы сопротивления отрицательна, так как эта сила направлена противоположно перемещению заряда. Из формулы (6) видно, что *разность потенциалов между полюсами источника тока (напряжение), приложенная к подключённому к полюсам проводнику, меньше ЭДС*. Напряжение на участке, содержащем источник тока, равно сумме ЭДС источника и разности потенциалов на этом участке.

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.



## ВОПРОСЫ

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

## § 5. 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).

Получим зависимость силы тока от приложенного напряжения для металлического проводника. Предположим, что к металлическому проводнику длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  приложено напряжение  $U$  (рис. 9, а). Под действием электрического поля напряжённостью  $E = U/l$  электроны, являющиеся носителями электрического тока, приобретают постоянное ускорение в направлении, противоположном напряжённости:

$$a = \frac{F_{\text{к}}}{m_e} = \frac{eE}{m_e} = \frac{eU}{m_e l}.$$

Из-за столкновений с неоднородностями кристаллической решётки (возникающими, например, при образовании кристалла) или атомами примесей другого элемента в металле электроны движутся по сложной траектории. Она напоминает траекторию движения шарика, скатывающе-



гося с наклонной плоскости под действием силы тяжести и сталкивающейся с выступающими цилиндрическими штырями (рис. 9, б). За промежуток времени  $\tau_c$  между столкновениями электрон, движущийся равноускоренно, приобретает среднюю направленную скорость

$$v = \frac{a\tau_c}{2} = \frac{eU}{2m_e l} \tau_c. \quad (7)$$

Сила тока в проводнике, как следует из формулы (3), при  $q_0 = e$

$$I = enSv. \quad (8)$$

Подставляя в это уравнение выражение для направленной скорости, получаем

$$I = \frac{ne^2\tau_c}{2m_e} \frac{S}{l} U. \quad (9)$$

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению.

**Сопротивление проводника.** Коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением обозначают  $1/R$ :

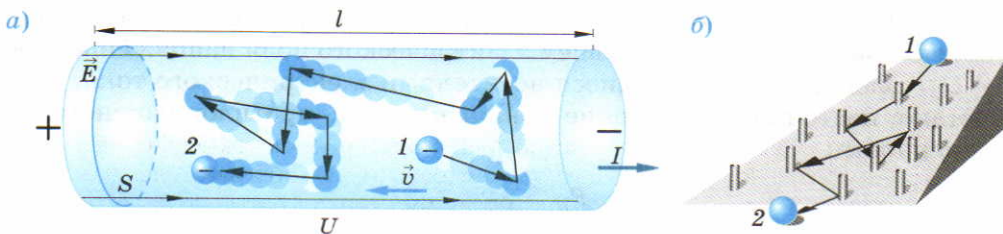
$$R = \frac{2m_e}{ne^2\tau_c} \frac{l}{S}, \quad (10)$$

где  $R$  — электрическое сопротивление проводника.

Единица сопротивления — ом (1 Ом):

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А.}$$

Впервые зависимость силы тока от напряжения была экспериментально получена в 1826 г. немецким учёным **Георгом Омом** (1787—1854).



## ▲ 9

Движение электрона в проводнике:

а) траектория движения электрона в проводнике;

б) моделирование движения электрона в проводнике

### Закон Ома для однородного проводника

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

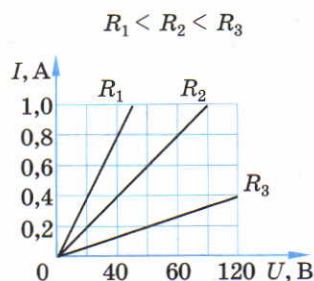
$$I = \frac{U}{R}. \quad (11)$$

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

На рисунке 10 приведены вольт-амперные характеристики проводников с различным электрическим сопротивлением.

#### В О П Р О С Ы

1. Какой проводник называют однородным? Почему направленное движение электрических зарядов в однородном проводнике является равноускоренным?
2. Приведите механическую аналогию движения заряженных частиц в проводнике.
3. Дайте определение напряжения. Во сколько раз изменится сила тока в проводнике при увеличении приложенного к нему напряжения вдвое?
4. Сформулируйте закон Ома для однородного проводника.
5. Что такое вольт-амперная характеристика проводника? Почему вольт-амперная характеристика для проводника с большим сопротивлением возрастает более полого, чем для проводника с меньшим сопротивлением?



#### ▲ 10

*Вольт-амперные характеристики проводников*

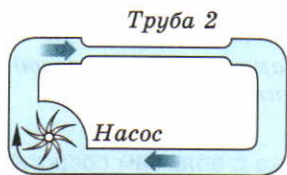
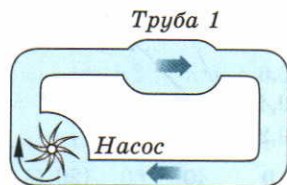
#### З А Д А Ч И

1. Электрический обогреватель, имеющий сопротивление 44 Ом, включён в сеть с напряжением 220 В. Найдите силу тока, протекающего через обогреватель. **[5 А]**
2. Найдите сопротивление резистора, если при напряжении 6 В сила тока в резисторе 2 мкА. **[3 МОм]**
3. Определите разность потенциалов на концах проводника сопротивлением 5 Ом, если за минуту через его поперечное сечение пройдёт заряд 2,88 кКл. **[240 В]**
4. К проводнику сопротивлением  $R$  приложена разность потенциалов  $U$ . За какой промежуток времени через поперечное сечение проводника пройдёт  $N$  электронов? **[ $eNR/U$ ]**

5. Постройте вольт-амперные характеристики для проводников сопротивлением 2 Ом и 3 Ом. Найдите графически напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на проводниках при силе тока 1 А, а также силу тока в проводниках  $I_1$  и  $I_2$ , если к ним приложено одинаковое напряжение 12 В.

## § 6. Сопротивление проводника

**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. Согласно формуле (10) *электрическое сопротивление зависит от геометрических размеров ( $l, S$ ) и материала ( $n, \tau_c$ ) проводника.*



### ▲ 11

*Гидродинамическая аналогия электрического сопротивления*

Зависимость сопротивления от длины и площади поперечного сечения проводника легко понять с помощью гидродинамической аналогии. Величиной, аналогичной электрическому заряду в гидродинамике, является масса жидкости (см. Ф-10, § 88). Сила тока эквивалентна массе жидкости, перекачиваемой насосом в единицу времени.

Сопротивление движению, которое испытывает вода, текущая по трубе, возрастает при увеличении длины трубы и уменьшении её сечения (рис. 11). Соответственно, масса жидкости, перекачиваемая насосом в единицу времени по трубе 2, будет меньше, чем по трубе 1.

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.

**Удельное сопротивление.** Представим формулу (10) для электрического сопротивления проводника в виде:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (12)$$

где

$$\rho = \frac{m_e}{n e^2 \tau_c}.$$



**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 Ом · м).

В таблице 2 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 диэлектрики (см. Ф-10, § 84) определяется значением удельного сопротивления вещества.

К проводникам относят вещества, имеющие удельное сопротивление  $\rho < 10^{-5}$  Ом · м. У полупроводников  $10^{-5}$  Ом · м  $< \rho < 10^5$  Ом · м. Диэлектрики имеют  $\rho > 10^5$  Ом · м.

Изменение сопротивления проводника в соответствии с формулой (12) возможно либо при изменении его длины (как в реостате) (рис. 12, а), либо при различном составе и объёме наполнителя (как в резисторе) (рис. 12, б).

Проводник с определённым постоянным сопротивлением называют *резистором* (от лат. resisto — сопротивляюсь).

Резисторы широко используются в электрических приборах и микроэлектронике.

Таблица 2

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

Вещество	$\rho$ , Ом · м	Вещество	$\rho$ , Ом · 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)	$10^{-6}$	Янтарь	$5 \cdot 10^{14}$
		Кварц	$7,5 \cdot 10^{17}$

Проводники

Полупроводники  
Изоляторы



## ▲ 12

### Переменное и постоянное сопротивление

4. Масса алюминиевого провода 270 г, а его сопротивление 2,8 Ом. Найдите его длину и площадь поперечного сечения. Плотность алюминия  $2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . **[100 м; 1 мм<sup>2</sup>]**
5. Длина цилиндрического медного провода в 10 раз больше, чем длина алюминиевого, а их массы одинаковы. Найдите отношение сопротивлений этих проводников. **[200]**

## ВОПРОСЫ

1. От чего зависит электрическое сопротивление проводника?
2. Объясните гидродинамическую аналогию сопротивления.
3. Какая физическая величина характеризует электрические свойства материала проводника? Дайте определение этой величины и укажите, в каких единицах она измеряется.
4. При каких значениях удельного сопротивления вещество можно считать проводником, полупроводником, диэлектриком?
5. Что такое резистор?

## ЗАДАЧИ

1. Найдите сопротивление медной проволоки длиной 240 м и сечением 0,4 мм<sup>2</sup>. **[10,2 Ом]**
2. Сколько килограммов меди требуется на изготовление электропровода длиной 1 км, чтобы его сопротивление составляло 10 Ом? Плотность меди  $8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . **[15,1 кг]**
3. Сопротивление цилиндрического алюминиевого провода диаметром 1 мм равно 4 Ом. Найдите его длину. **[110 м]**

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

**Проводники.** Удельное сопротивление проводника обратно пропорционально времени между столкновениями электронов с неоднородностями кристаллической решётки (см. формулу (10)). За 1 с электрон сталкивается с ними  $1/\tau_c$  раз. Поэтому удельное сопротивление проводника пропорционально частоте (числу) столкновений электронов. 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. 13, а).

С увеличением температуры ( $T_2 > T_1$ ) и амплитуда колебаний возрастает (рис. 13, б). Движение электронов в кристаллической решётке затрудняется: сопротивление их упорядоченному движению возрастает.

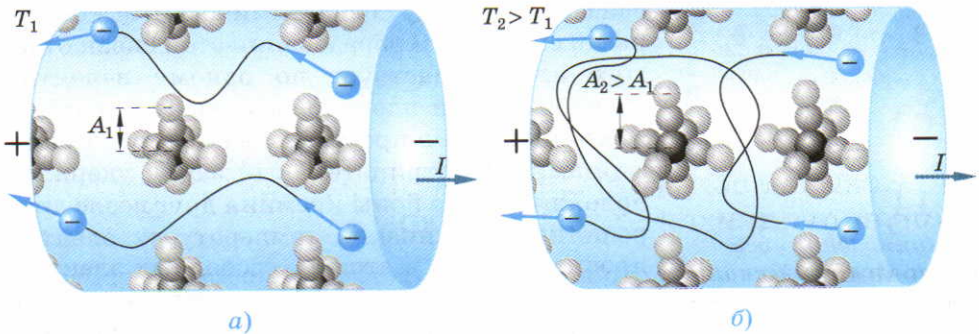
**Удельное сопротивление металлического проводника линейно возрастает с температурой:**

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

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.

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

Линейную зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры качественно можно пояснить следующим образом. Удельное сопротивление пропорционально частоте столкновений



### ▲ 13

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

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

электронов. Она складывается из частоты столкновений с неоднородностями кристаллической решётки, не зависящей от температуры, и частоты столкновений с атомами и ионами, упорядоченно расположенными в кристаллической решётке. Последняя линейно зависит от температуры. Линейная зависимость (13) удельного сопротивления от температуры справедлива в сравнительно небольшом интервале температур  $\Delta T$ .

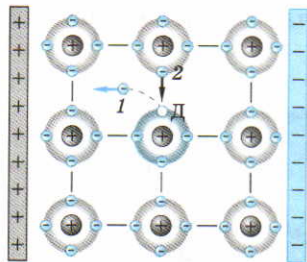
Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления  $\alpha \approx 1/273 \text{ K}^{-1}$ .

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

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

### Удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры.

С увеличением температуры возрастает число свободных зарядов, создающих электрический ток, и соответственно (см. формулу (12)) уменьшается сопротивление полупроводника.



#### ▲ 14

*Возникновение носителей электрического тока в полупроводнике*

В качестве примера рассмотрим кристалл кремния, атомы которого имеют на внешней оболочке по четыре валентных электрона (рис. 14), связанные между собой химическими ковалентными связями. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону. Эти электроны большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга в решётке. 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, становится заряженным положительно. В электронной оболочке образуется вакансия, или дырка.

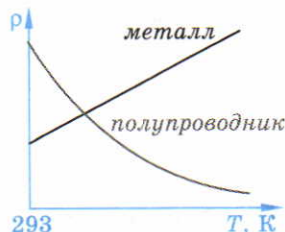


**Дырка — вакантное электронное состояние в кристаллической решётке, имеющее избыточный положительный заряд.**

Дырку в электронной оболочке атома может заполнить валентный электрон 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 15.



### ▲ 15

*Зависимость удельного сопротивления металла и полупроводника от температуры*

## ВОПРОСЫ

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. Чем можно объяснить линейную зависимость удельного сопротивления проводника от температуры?
4. Почему удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры?
5. Опишите процесс собственной проводимости в полупроводниках.

## ЗАДАЧИ

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  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .  
[4,9 Ом]
2. Сопротивление проводника при  $20^\circ\text{C}$  равно 25 Ом, а при  $35^\circ\text{C}$  — 25,17 Ом. Найдите температурный коэффициент сопротивления.  
[4,5 · 10<sup>-4</sup> K<sup>-1</sup>]
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  $6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .  
[11,7 °C]

4. Сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания при  $20^\circ\text{C}$  равно  $20\ \text{Ом}$ . Температурный коэффициент сопротивления вольфрама  $4,6 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$ . Найдите температуру нити накала лампы при включении её в сеть с напряжением  $220\ \text{В}$ , когда сила тока в ней  $1\ \text{А}$ . [2467 К]
5. При нагревании проводника сечением  $S$  его сопротивление возрастает на  $\Delta R$ . Зная плотность вещества  $d$ , удельное сопротивление  $\rho$  проводника и удельную теплоёмкость  $c_v$ , найдите изменение внутренней энергии  $\Delta W$  проводника.

$$\left[ \Delta W = \frac{c_v d S^2 \Delta R}{\rho \alpha} \right]$$

## § 8. Сверхпроводимость

**Критическая температура.** 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 до нуля сопротивления вещества при критической температуре.

*Критическая температура* — температура скачкообразного перехода вещества из нормального состояния ( $T > T_{\text{кр}}$ ) в сверхпроводящее ( $T < T_{\text{кр}}$ ). Максимальной критической температурой среди чистых металлов обладает технеций (табл. 3).

*Сверхпроводник* — вещество, которое может переходить в сверхпроводящее состояние. Ток в сверхпроводнике может протекать неограниченно долгое время из-за отсутствия сопротивления.

Свойством сверхпроводимости обладают около половины металлов и свыше тысячи сплавов и соединений металлов. Интересно, что такие металлы, как серебро, медь, золото, платина, являющиеся хорошими проводниками при  $T_0 = 293\ \text{К}$ , не переходят в сверхпроводящее состояние. На рисунке 16 приведены зависимости удельного сопротивления от температуры для проводника и сверхпроводника. При комнатной температуре сопротивление сверхпроводника больше сопротивления проводника.



Таблица 3

## Критическая температура для сверхпроводников

Вещество	$T_{кр}, K$	Вещество	$T_{кр}, K$
Вольфрам	0,015	Свинец	7,2
Титан	0,4	Ниобий	9,2
Кадмий	0,5	Технеций	11,2
Уран	0,8	Сплав	
Цинк	0,9	(Ba—La—Cu—O)	35
Алюминий	1,2	Сплав	
Индий	3,4	(Ba—Yt—Cu—O)	98
Олово	3,7	Сплав	
Ртуть	4,2	(Tl—Ca—Ba—Cu—O)	125



## ▲ 16

Зависимость удельного сопротивления проводника и сверхпроводника от температуры

**Отличие движения заряженных частиц в проводнике и сверхпроводнике.** В чём же принципиальное отличие движения заряженных частиц в сверхпроводнике от их движения в обычном проводнике?

Электрическое сопротивление обычного проводника определяется взаимодействием электронов с хаотически колеблющимися ионами, находящимися в узлах кристаллической решётки. В таком проводнике электроны движутся под действием внешнего электрического поля независимо друг от друга. Каждый электрон, столкнувшийся с ионом, изменяет направление скорости и выбывает из общего направленного движения электрических зарядов (носителей тока). С уменьшением температуры частота столкновений электронов с ионами убывает.

Резкий спад сопротивления сверхпроводника при критической температуре означает, что электроны не выбывают из общего направленного движения, т. е. столкновения с ионами внезапно прекращаются. Ключом к объяснению этого факта послужило открытие в 1950 г. *изотопического эффекта*.

**Изотопический эффект — зависимость критической температуры от массы ионов в кристаллической решётке.**

Для разных изотопов с массой  $m_i$  одного и того же химического элемента критическая температура их перехода в сверхпроводящее состояние оказалась различной:

$$T_{кр} \sim \frac{1}{\sqrt{m_i}}.$$

Это означало, что на резкое изменение характера движения электрона при критической температуре оказывает влияние структура кристаллической решётки.

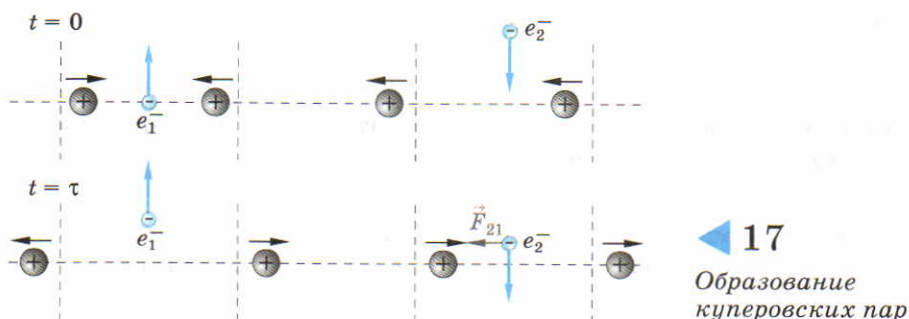
Практическое исчезновение удельного электрического сопротивления связано с возникновением при температуре меньше критической сил притяжения между парами электронов, расположенных друг от друга на расстоянии, в тысячи раз превышающем расстояние между узлами решётки. Эти силы значительно превосходят силы кулоновского отталкивания электронов на этом расстоянии и обусловлены согласованными колебаниями ионов кристаллической решётки.

**Куперовские пары.** Рассмотрим подробнее механизм возникновения электронных пар, связанных силами притяжения, которые чаще называют *куперовскими парами* (по имени одного из создателей теории сверхпроводимости)<sup>1</sup>.

При движении электрона в сверхпроводнике при  $T < T_{кр}$  положительные ионы, находящиеся в узлах кристаллической решётки (пересечения пунктирных линий на рисунке 17), притягиваются к электрону, смещаясь от положения равновесия в его сторону. Последующее кулоновское отталкивание положительных ионов приводит к распространению по решётке упругой волны. Второй электрон, находящийся достаточно далеко от первого, притягивается в его сторону смещающимся навстречу положительным ионом решётки.

Подобное притяжение между парой электронов может возникать, даже если они находятся друг от друга на расстоянии, в тысячи раз превышающем *период решётки* (расстояние между соседними узлами).

Движение электронов в паре перестаёт быть независимым. Благодаря притяжению между электронами в паре оно становится согласованным.



17  
Образование  
куперовских пар

<sup>1</sup> Теория сверхпроводимости была предложена в 1957 г. Дж. Бардином, Л. Купером, Дж. Шриффером (Нобелевская премия 1972 г.).



Притяжение между электронами препятствует столкновению каждого из них в отдельности с ионами решётки.

Электроны в сверхпроводнике (в отличие от обычного проводника) являются «единым коллективом» куперовских пар.

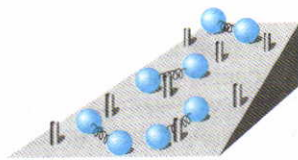
### Электрический ток в сверхпроводнике обусловлен согласованным движением куперовских пар электронов.

Механической аналогией движения зарядов в сверхпроводнике является скатывание по наклонной плоскости с выступающими цилиндрическими штырями пары шариков, связанных пружиной (рис. 18). Если один из шариков ударяется о штырь, он не отскакивает назад, так как второй шарик, связанный с ним пружиной, продолжает движение и подтягивает первый. В результате пара продолжает скатываться с наклонной плоскости. Подобным же образом взятые за руки в парах учащиеся младших классов организованно гуляют. При этом роль колебаний кристаллической решётки, укрепляющей их связи (рукопожатия), периодически играет властный голос учительницы.

Чем сильнее взаимодействие электронов с решёткой, тем сильнее их притяжение друг к другу, тем легче образуются куперовские пары. Для хороших проводников (Ag, Cu, Au) это взаимодействие мало, поэтому такие проводники не переходят в сверхпроводящее состояние. При  $T > T_{кр}$  хаотическое движение ионов доминирует над упорядоченным: куперовские пары разрушаются, и электроны движутся по кристаллу независимо, как в обычном проводнике.

Основным препятствием для широкого применения металлических сверхпроводников является необходимость их эксплуатации при очень низкой температуре. Использование для их охлаждения жидкого гелия при  $T = 4 \text{ К}$  создаёт значительные технические трудности и не всегда оправдано экономически.

Поиск сверхпроводников с большой критической температурой привёл к получению в 1988—1989 гг. высокотемпературных металлокерамических сплавов (Ba—Yt—Cu—O) и (Tl—Ca—Ba—Cu—O) с большой критической температурой (см. табл. 3). Получение сверхпроводящих состояний для этих сплавов возможно с помощью недорогого и безопасного в эксплуатации жидкого азота, имеющего температуру кипения 77 К.



### ▲ 18

*Моделирование движения куперовских пар в сверхпроводнике*

В настоящее время усилия физиков направлены на получение сверхпроводников с критической температурой, близкой к комнатной. Эти сверхпроводники должны удовлетворять высоким требованиям к механической прочности и химической стабильности.

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

### В О П Р О С Ы

1. Какое физическое явление называют сверхпроводимостью? Дайте определение сверхпроводника.
2. Какую температуру называют критической?
3. Какой эффект называют изотопическим? Почему изотопический эффект является ключом к объяснению сверхпроводимости?
4. Чем отличается характер движения электронов в сверхпроводнике от их движения в проводнике? Как механически можно промоделировать движение куперовских пар в сверхпроводнике?
5. Почему сверхпроводимость исчезает при температуре выше критической? Чем объясняется перспективность разработок высокотемпературных сверхпроводников?

## § 9. Соединения проводников

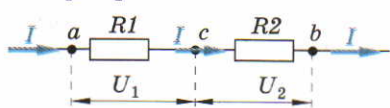
**Последовательное соединение.** В реальной электрической цепи к зажимам источника тока может быть подключено несколько соединительных проводников, а также лампы, нагревательные и измерительные приборы, обладающие определённым сопротивлением.

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

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

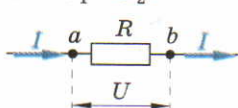
На рисунке 19, а резистор  $R1$ , подключённый между точками  $a$  и  $c$ , соединён последовательно с резистором  $R2$ , включённым между точками

$$I = I_1 = I_2$$



а)

$$U = U_1 + U_2$$



б)

19

Последовательное соединение проводников:

а) схема соединения;

б) эквивалентная схема



$c$  и  $b$ . Найдём результирующее сопротивление  $R$  между точками  $a$  и  $b$  (рис. 19, б).

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

$$I_1 = I_2 = I. \quad (14)$$

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.

Гидродинамическим аналогом силы тока, протекающего через последовательно соединённые резисторы, является масса жидкости, протекающей в единицу времени по последовательно соединённым трубам (рис. 20).

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  $c-b$ :

$$U = U_1 + U_2. \quad (15)$$

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

Выразим напряжение из закона Ома с учётом условия (14):

$$IR = IR_1 + IR_2.$$

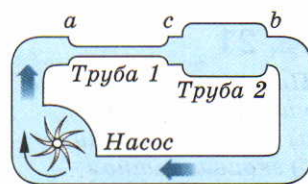
При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2. \quad (16)$$

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

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (17)$$

Сопротивление последовательного соединения проводников больше сопротивления любого из этих проводников.

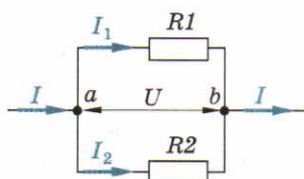


## ▲ 20

Гидродинамическая аналогия последовательного соединения проводников

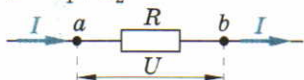
а)

$$U = U_1 = U_2$$



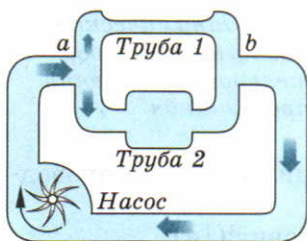
б)

$$I = I_1 + I_2$$



## ▲ 21

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



## ▲ 22

Гидродинамическая аналогия параллельного соединения проводников

тогда

Следовательно,

**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. 21), 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:

$$I = I_1 + I_2. \quad (18)$$

Суммарная сила тока, вытекающего в узел, равна сумме сил токов, вытекающих из узла. Подобным образом вода растекается по трубам (рис. 22). 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:

$$U = U_1 = U_2. \quad (19)$$

Выразим силу тока для каждого проводника в формуле (18) из закона Ома с учётом равенства (19):

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

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (20)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (21)$$



Сопротивление параллельного соединения проводников меньше сопротивления любого из этих проводников.

Величина  $G = 1/R$  называется электрической проводимостью проводника. Единица проводимости — *сименс* (1 См):

$$1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}.$$

*При параллельном соединении резисторов проводимость цепи равна сумме их проводимостей:*

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n, \quad (22)$$

где 
$$G_1 = \frac{1}{R_1}, G_2 = \frac{1}{R_2}, \dots, G_n = \frac{1}{R_n}.$$

Как следует из равенства (19),

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (23)$$

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

Параллельное соединение труб (см. рис. 22) 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.

### 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?





• Как видно из рисунка, резисторы  $R_2$  и  $R_3$  соединены параллельно, поэтому сопротивление  $R_{cb} = R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$ .

В эквивалентной схеме, приведённой на рисунке 27, б, два резистора с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_{cb}$  соединены последовательно. Следовательно, общее сопротивление цепи (рис. 27, в)

$$R_{ab} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 10 \text{ Ом.}$$

2. Три резистора с одинаковым сопротивлением  $R = 60$  Ом соединены по схеме, показанной на рисунке 28, а. Найдём сопротивление  $R_{ad}$ .

• Характерной особенностью представленной схемы является наличие перемычек, обладающих пренебрежимо малым сопротивлением, т. е.  $R_{ac} = R_{bd} = 0$ . Это означает, что (согласно закону Ома)  $U_{ac} = U_{bd} = 0$ . Следовательно,  $\varphi_a = \varphi_c$ ;  $\varphi_b = \varphi_d$ .

Потенциалы точек, соединённых перемычками, одинаковы.

Точку  $a$  на схеме можно совместить с точкой  $c$ , а точку  $b$  с точкой  $d$ . Тогда эквивалентная схема (рис. 28, б) представляет собой параллельное соединение трёх резисторов, а сопротивление  $R_{ad}$  определяется формулой (22):

$$\frac{1}{R_{ad}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{3}{R}.$$

Следовательно,

$$R_{ad} = \frac{R}{3} = 20 \text{ Ом.}$$

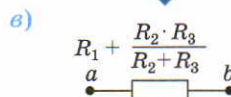
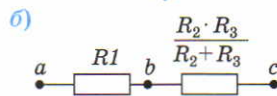
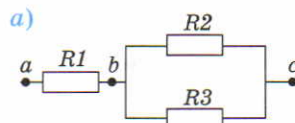
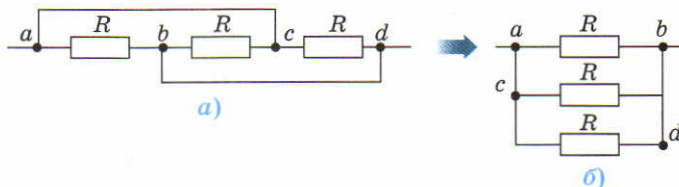
**Точки с равными потенциалами в электрических схемах.** Расчёт сопротивления электрических схем существенно упрощается, если в схеме можно найти точки с равными потенциалами. Между такими точками, согласно закону Ома, ток не протекает. Поэтому в эквивалентной схеме сопротивления проводников, соединяющих эти точки, можно либо не учитывать, либо заменить перемычкой.

## 28

Электрическая схема с перемычками:

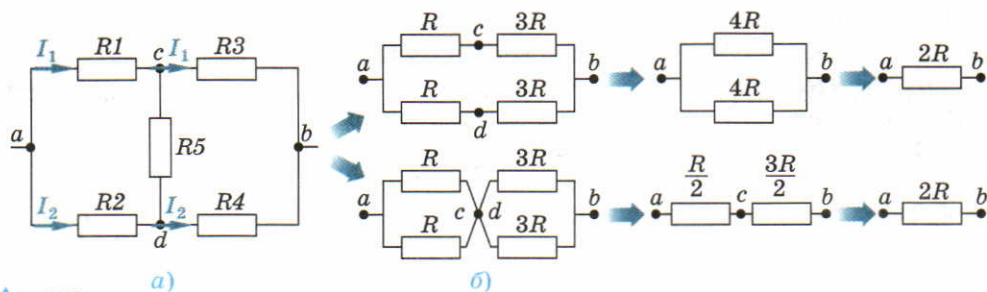
а) соединение резисторов;

б) эквивалентная схема



## ▲ 27

Смешанное соединение проводников



## ▲ 29

### Мостик Уитстона

Рассчитаем сопротивление схемы, содержащей точки с одинаковым потенциалом.

Пусть резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  соединены по схеме, изображённой на рисунке 29, а, называемой *мостиком Уитстона*. Выясним, при каком соотношении сопротивлений ток через резистор  $R_5$  не протекает, а также найдём сопротивление между точками  $a$  и  $b$  в этом случае.

Предположим, что ток через резистор  $R_5$  не протекает, тогда через резистор  $R_3$  протекает такой же ток  $I_1$ , как и через резистор  $R_1$ . Соответственно, ток  $I_2$  будет протекать как через резистор  $R_2$ , так и через  $R_4$ . Отсутствие тока между точками  $c$  и  $d$  означает, что их потенциалы равны

$$\varphi_c = \varphi_d.$$

Следовательно, будут равны друг другу и разности потенциалов

$$\begin{cases} U_{ac} = U_{ad}, \\ U_{cb} = U_{db}, \end{cases} \quad (24)$$

так как

$$\varphi_a - \varphi_c = \varphi_a - \varphi_d,$$

$$\varphi_c - \varphi_b = \varphi_d - \varphi_b.$$

С учётом закона Ома для однородного участка цепи из формулы (24) следует, что

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_2 R_2, \\ I_1 R_3 = I_2 R_4. \end{cases} \quad (25)$$

Разделим почленно первое равенство в системе (25) на второе:

$$R_1/R_3 = R_2/R_4,$$

или

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (26)$$



*Ток через резистор  $R_5$  не протекает, если произведения сопротивлений противоположных плечей мостика равны друг другу.*

Мостиковую схему используют для измерения одного из неизвестных сопротивлений, входящих в плечи мостика, например  $R_1$ . Оно находится из формулы (26). Найдём сопротивление между точками  $a$  и  $b$ , когда  $R_1 = R_3 = R$  и  $R_2 = R_4 = 3R$ , т. е. условие (26) выполняется.

Равенство потенциалов точек  $c$  и  $d$  позволяет использовать любую из эквивалентных схем, представленных на рисунке 29, б. В первой схеме резистор  $R_5$  не используется: цепь между точками  $c$  и  $d$  разомкнута. Во второй схеме точки  $c$  и  $d$  соединены перемычкой.

В первой схеме резисторы  $R$  и  $3R$  соединены последовательно. Это приводит к параллельному соединению двух резисторов, сопротивления которых по  $4R$ , и результирующему сопротивлению  $2R$  между точками  $a$  и  $b$ .

Во второй схеме резисторы, сопротивление которых  $R$ , соединены между собой параллельно. Также соединены и два резистора  $3R$ . Первая пара резисторов, сопротивление которых  $R/2$ , соединена со второй, имеющей сопротивление  $3R/2$ , последовательно. Естественно, что результирующее сопротивление между точками  $a$  и  $b$  оказывается равным  $2R$ , как и при использовании первой схемы. Результат расчёта не должен зависеть от способа его получения.

## В О П Р О С Ы

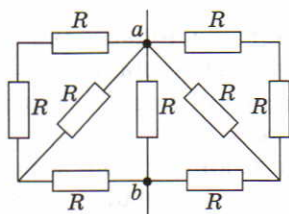
1. Какова последовательность расчёта сопротивления смешанного соединения проводников?
2. В чём характерная особенность электрических схем с перемычками?
3. Почему наличие точек с равным потенциалом облегчает расчёт электрических схем?
4. При каком условии возникает баланс плеч в мостике Уитстона?
5. Чему равно сопротивление мостика Уитстона между точками  $a$  и  $b$ ?

## З А Д А Ч И

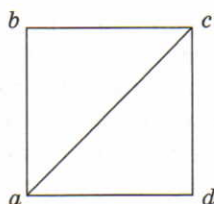
1. Найдите сопротивление схемы, изображённой на рисунке 30. [5R/11]
2. Сопротивление стороны проволочного квадрата (рис. 31) равно  $R$ . Найдите сопротивления  $R_{ac}$ ,  $R_{ad}$ ,  $R_{bd}$ .  

$$[R_{ac} = R\sqrt{2}/(\sqrt{2} + 1); R_{ad} = R(3\sqrt{2} + 2)/4(\sqrt{2} + 1); R_{bd} = R]$$
3. Найдите сопротивление  $R_{ab}$ , считая, что все звенья проволочной звезды имеют сопротивление  $R$  (рис. 32). [7R/6]
4. Сопротивление любого ребра проволочного каркаса куба равно  $R$ . Найдите сопротивление между наиболее удалёнными друг от друга вершинами куба (рис. 33).

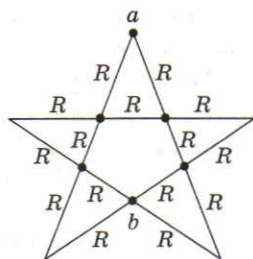
[5R/6]



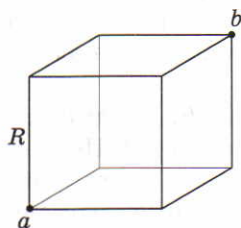
▲ 30



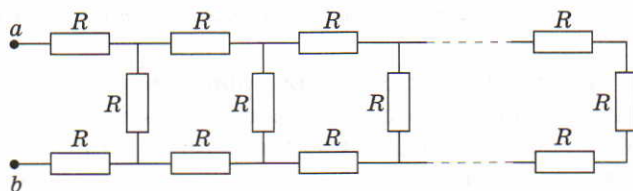
▲ 31



▲ 32



▲ 33



▲ 34

5. Найдите сопротивление  $R_{ab}$  участка цепи, содержащего бесконечное число резисторов сопротивлением  $R$  (рис. 34).

При решении следует учесть, что присоединение ещё одной ячейки к бесконечному числу ячеек не изменяет полного сопротивления бесконечной цепи.  $[R(1 + \sqrt{3})]$

## § 11. 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. 35, а). Найдём направление тока и силу тока в этой цепи.

В рассматриваемой цепи (рис. 35, б) лампа вместе с подводящими проводами ( $aa'$  и  $bb'$ ) образует *внешнюю цепь* — *участок цепи ( $aa'b'b$ ) вне источника тока*. При подключении внешней цепи к источнику тока электрическое поле распространяется со скоростью света вдоль проводников, и свободные заряды в них почти одновременно приходят в упорядоченное движение. В цепи появляется ток. При этом скорость направленного движения зарядов оказывается значительно меньше скорости света. Примерно так же водители автомобилей, стоящих в пробке у светофора, ви-





▲ 35

Простейшая замкнутая цепь: а) лампа, подключённая к гальваническому элементу; б) эквивалентная схема

дят разрешающий зелёный сигнал практически одновременно. Однако возможная скорость движения автомобилей в потоке невелика.

Так как направление тока определяется направлением движения положительных зарядов, то положительные заряды во внешней цепи отталкиваются от положительного полюса источника и притягиваются к отрицательному.

Следовательно, направление тока во внешней цепи — от плюса к минусу источника тока.

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:

$$U_{ab} = \mathcal{E} - \frac{|A_c|}{q}. \tag{27}$$

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

Пренебрегая сопротивлением подводящих проводов, можно сказать, что

$$\varphi_{a'} = \varphi_a, \varphi_{b'} = \varphi_b,$$

поэтому

$$U_{ab} = U_{a'b'} = IR, \tag{28}$$

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, § 83) работа силы электрического поля по перемещению единичного положительного заряда внутри источника равна разности потенциалов на внутреннем участке цепи:

$$\frac{|A_c|}{q} = Ir, \quad (29)$$

где  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока.

Подставляя выражение (29) в уравнение (27), получаем напряжение на зажимах источника тока:

$$U_{ab} = \mathcal{E} - Ir, \quad (30)$$

или, с учётом (28),

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

### Закон Ома для замкнутой цепи

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

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}. \quad (31)$$

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

$$I \approx \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (32)$$

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

$$I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}, \quad (33)$$

возрастая по сравнению с обычным значением (32) 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 предо-



хранители, которые плавятся при увеличении силы тока сверх нормы и размыкают электрическую цепь.

**Замкнутая цепь с несколькими источниками тока.** Рассмотрим замкнутую цепь, содержащую три последовательно соединённых источника тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ , имеющих внутренние сопротивления  $r_1, r_2, r_3$  и внешнее сопротивление  $R$  (рис. 36, а). Найдём направление и силу тока, протекающего в этой цепи.

Если ток в цепи создаётся только одним источником тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1$ , то он протекает по часовой стрелке (от плюса к минусу источника (рис. 36, б)) и равен, согласно закону Ома для замкнутой цепи,

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{R_{\text{п}}}, \quad (34)$$

$R_{\text{п}} = r_1 + r_2 + r_3 + R$  — полное сопротивление цепи.

В случае, когда работает только источник с ЭДС  $\mathcal{E}_2$ , ток в цепи протекает против часовой стрелки (от плюса к минусу источника) и равен

$$I_2 = -\frac{\mathcal{E}_2}{R_{\text{п}}}. \quad (35)$$

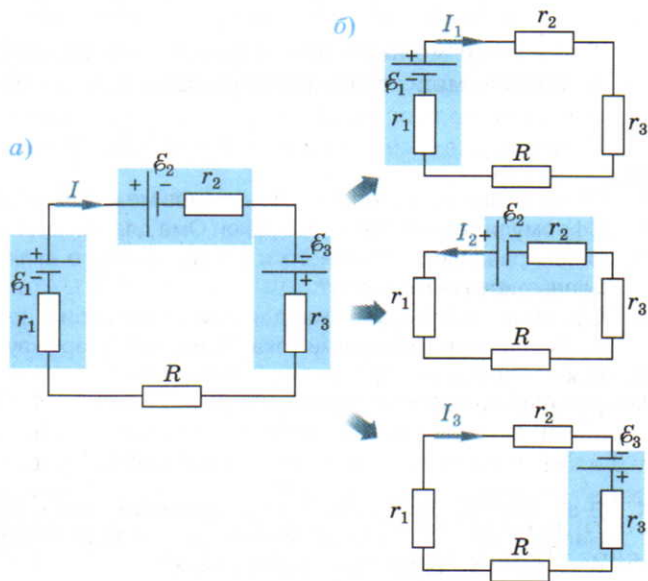
Знак «минус» в формуле (35) учитывает противоположное направление тока по сравнению с предыдущим случаем. Говорят, что второй источник тока включён *встречно* первому.

### 36

*Замкнутая цепь с несколькими источниками тока:*

*а) ток  $I$  создаётся источниками  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ ;*

*б) токи  $I_1, I_2, I_3$  создаются независимо источниками  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$  соответственно*



Наконец, если ток в цепи вызван только третьим источником с ЭДС  $\mathcal{E}_3$ , то он будет направлен по часовой стрелке (так же как и ток  $I_1$ ) и равен

$$I_3 = \frac{\mathcal{E}_3}{R_{\text{п}}}. \quad (36)$$

Третий источник тока включён *согласованно* с первым.

Естественно, что при одновременном включении всех источников создаваемые ими токи суммируются. Результирующая сила тока в цепи

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3}{R_{\text{п}}}. \quad (37)$$

Направление тока в цепи с несколькими источниками зависит от знака алгебраической суммы ЭДС. Если  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 > 0$ , ток протекает по часовой стрелке. Если  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 < 0$ , то  $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_3$ . ЭДС второго источника больше, чем первого и третьего, и ток будет протекать против часовой стрелки.

### **Закон Ома для цепи с несколькими источниками тока**

Сила тока в замкнутой цепи с последовательно соединёнными источниками тока прямо пропорциональна алгебраической сумме их ЭДС и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\sum \mathcal{E}}{R_{\text{п}}}. \quad (38)$$

Ток в цепи может отсутствовать, если алгебраическая сумма ЭДС равна нулю. Это может быть использовано для измерения неизвестной ЭДС.

### **В О П Р О С Ы**

1. От чего зависит разность потенциалов между полюсами источника тока?
2. Сформулируйте и запишите закон Ома для замкнутой цепи.
3. В чём различие встречного и согласованного включения последовательно соединённых источников тока?
4. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи с несколькими последовательно соединёнными источниками тока. Приведите формулу этого закона.
5. Как определить направление тока в замкнутой цепи с несколькими последовательно соединёнными источниками тока?

### **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 и сопротивление нагрузки. **[ $r = 1$  Ом;  $R = 5$  Ом]**



- 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. **[12 В; 2 Ом]**
- 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. **[1 Ом; 6 А]**
- Два последовательно соединённых источника тока с  $\mathcal{E}_1 = 4,5$  В и  $\mathcal{E}_2 = 6$  В с внутренним сопротивлением  $r_1 = 0,3$  Ом и  $r_2 = 0,2$  Ом включены согласованно. При каком сопротивлении нагрузки разность потенциалов на клеммах одного из источников будет равна нулю? **[0,2 Ом]**
- Источник тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  замкнут на реостат с переменным сопротивлением  $R$ . Постройте графики зависимости  $I(R)$  и  $U(R)$ .

## § 12. Расчёт силы тока и напряжения в электрических цепях

1. К аккумулятору с ЭДС  $\mathcal{E} = 6$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,2$  Ом присоединены параллельно друг другу лампочка и резистор с сопротивлениями  $R_1 = 4$  Ом и  $R_2 = 1$  Ом соответственно (рис. 37, а). Найдём: а) напряжение  $U_{ab}$  на зажимах аккумулятора; б) силу тока, протекающего через лампочку.

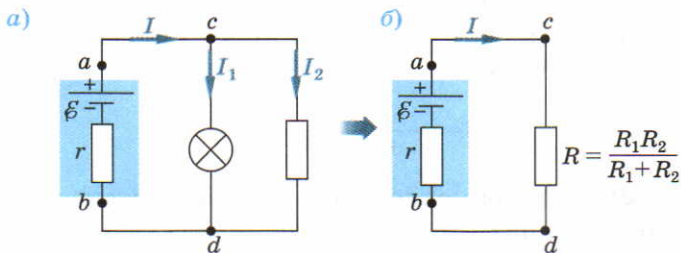
• Ток во внешней цепи протекает от плюса к минусу источника и растекается по элементам цепи как вода по трубам. Покажем на рисунке 37, а ток  $I$ , протекающий через аккумулятор, и токи, протекающие через лампу  $I_1$  и резистор  $I_2$ .

а) Напряжение  $U_{ab}$  на зажимах источника можно найти по формуле (30):

$$U_{ab} = \mathcal{E} - Ir.$$

Силу тока  $I$  определим по закону Ома для замкнутой цепи (31):

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



37

Замена одной электрической схемы другой:  
 а) данная схема;  
 б) эквивалентная схема

где  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$  — сопротивление лампочки и резистора, соединённых параллельно, между точками  $c$  и  $d$  (рис. 37, б).

Окончательно

$$U_{ab} = \mathcal{E} \left[ 1 - \frac{r}{r + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \right] = \mathcal{E} \frac{R_1 R_2}{r R_1 + r R_2 + R_1 R_2} = 4,8 \text{ В.}$$

б) Силу тока  $I_1$  можно найти по закону Ома (11) для однородного проводника (участка цепи):

$$I_1 = \frac{U_{cd}}{R_1}.$$

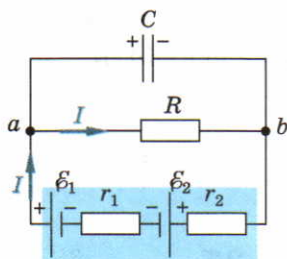
Пренебрегая сопротивлением подводящих проводов между точками  $ac$  и  $bd$ , можно считать, что

$$U_{cd} = U_{ab},$$

поэтому

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \mathcal{E} \frac{R_2}{r R_1 + r R_2 + R_1 R_2} = 1,2 \text{ А.}$$

2. Два последовательно соединённых источника тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1 = 12 \text{ В}$  и  $\mathcal{E}_2 = 5 \text{ В}$ , имеющие внутреннее сопротивление  $r_1 = 0,2 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 0,3 \text{ Ом}$ , включены встречно. Внешнюю цепь источника образуют параллельно соединённые конденсатор и резистор (рис. 38). Электроёмкость конденсатора  $C = 500 \text{ пФ}$ , сопротивление резистора  $R = 2,5 \text{ Ом}$ . Найдём: а) силу тока, проходящего через резистор; б) заряд на конденсаторе.



### ▲ 38

Электрическая схема с конденсатором

• Непроводящее пространство между обкладками конденсатора является разрывом цепи, поэтому постоянный ток через конденсатор не протекает. Подобным образом пробка в трубе не пропускает по ней воду.

1) Через резистор ток протекает от точки  $a$  к точке  $b$ , так как ЭДС первого источника  $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$ . Согласно закону Ома, сила тока, проходящего через резистор, равна

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{r_1 + r_2 + R} = 2 \text{ А.}$$

2) Заряд на конденсаторе связан с разностью потенциалов  $U_{ab}$  (см. Ф-10, формула (217)):



$$q = CU_{ab},$$

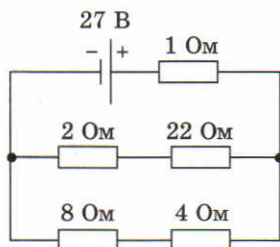
$$U_{ab} = IR.$$

Поэтому заряд на конденсаторе находится по формуле:

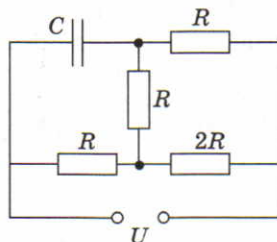
$$q = \frac{CR(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{r_1 + r_2 + R} = 2,5 \text{ мкКл.}$$

### ЗАДАЧИ

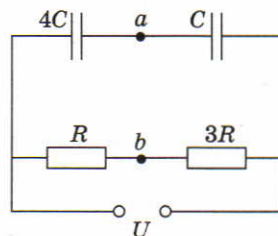
- Найдите разность потенциалов на резисторах, сопротивление которых 2 Ом и 4 Ом, в схеме, изображённой на рисунке 39. **[2 В, 8 В]**
- В вашем распоряжении три резистора: 3 Ом, 5 Ом и 6 Ом. Какие возможные сопротивления можно получить, комбинируя или используя отдельно эти резисторы? Нарисуйте соответствующие схемы соединений. **[0,7 Ом; 1,9 Ом; 2,0 Ом; 2,4 Ом; 2,7 Ом; 3 Ом; 3,2 Ом; 3,4 Ом; 5 Ом; 5,7 Ом; 6 Ом; 7 Ом; 7,9 Ом; 8 Ом; 9 Ом; 11 Ом; 14 Ом]**
- Три резистора 40 Ом, 60 Ом и 120 Ом соединены параллельно в группу, которая включена последовательно резисторам сопротивлениями 15 Ом и 25 Ом. ЭДС источника 240 В. Найдите: 1) силу тока, протекающего через сопротивление 25 Ом; 2) разность потенциалов на параллельной группе; 3) напряжение на сопротивлении 15 Ом; 4) силу тока через сопротивление 60 Ом; 5) силу тока через сопротивление 40 Ом. **[1) 4 А; 2) 80 В; 3) 60 В; 4) 1,34 А; 5) 2 А]**
- Найдите заряд на конденсаторе, включённом в электрическую схему, изображённую на рисунке 40. Все величины, указанные на схеме известны. Внутренним сопротивлением источника тока пренебречь. **[ $q = 3CU/4$ ]**
- Рассчитайте разность потенциалов  $U_{ab}$  в электрической схеме, показанной на рисунке 41. Внутренним сопротивлением источника тока пренебречь. **[0,05 U]**



▲ 39



▲ 40



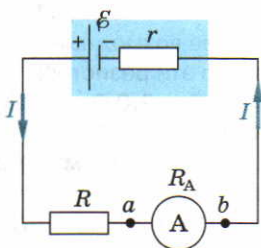
▲ 41

## § 13. 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 его (оцифровывающие) 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. § 21).



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

Амперметр включается в цепь последовательно. Включение амперметра увеличивает сопротивление цепи (рис. 42), которое становится равным:

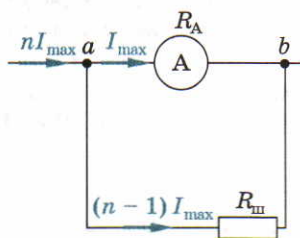
$$R_{\Pi} = r + R + R_A.$$

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:  $R_A \ll (r + R)$ .

Предельный угол поворота рамки в конструкции прибора ограничивает максимальную силу тока  $I$ , измеряемую с помощью данного амперметра. Для измерения большей силы тока параллельно амперметру присоединяют проводник, через который проходит часть измеряемого тока (рис. 43), или *шунт* (от англ. shunt — запасной путь).

### ▲ 42

Включение в цепь амперметра



### ▲ 43

Подключение шунта к амперметру

**Шунт — проводник, присоединяемый параллельно амперметру для увеличения предела его измерений.**

Рассчитаем сопротивление шунта, необходимое для увеличения предела измерений амперметра в  $n$  раз. Это означает, что сила тока, измеряемого в цепи, может превышать в  $n$  раз максимальную силу тока  $I_{\max}$ , протекающего через амперметр. В этом случае через шунт пройдет ток  $(n - 1)I_{\max}$ . Напряжение на амперметре равно напряжению на шунте, так как они соединены параллельно:

$$I_{\max} R_A = (n - 1) I_{\max} R_{\text{ш}}.$$

Следовательно,

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}. \quad (39)$$

Например, амперметром, рассчитанным на максимальный ток 1 мА, можно измерять силу тока 100 мА ( $n = 100$ ), если сопротивление шунта в 99 раз меньше сопротивления амперметра. При этом цена каждого деления амперметра увеличивается в 100 раз.

**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.

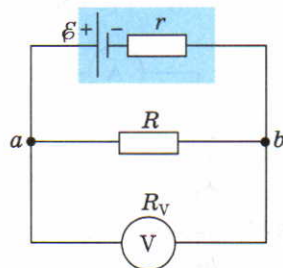
Принцип действия вольтметра такой же, как и амперметра. При силе тока  $I$  через вольтметр он показывает напряжение  $U = IR_V$ . Вольтметр включается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором измеряется (рис. 44).

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.

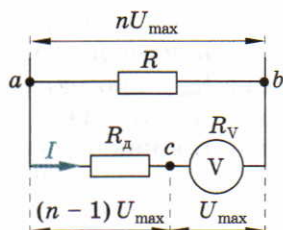
Для того чтобы включение вольтметра не искажало напряжение в цепи, сопротивление вольтметра должно значительно превосходить сопротивление цепи:  $R_V \gg R$ . В этом случае  $R_{ab} \approx R$ .



### ▲ 44

Включение в цепь вольтметра





### ▲ 45

Подключение дополнительного сопротивления к вольтметру

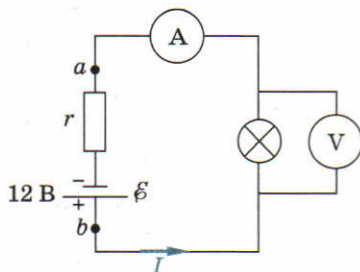
Расчитываем, какое дополнительное сопротивление необходимо для увеличения предела измерений вольтметра в  $n$  раз. Это означает, что напряжение  $U_{ab}$ , измеряемое в цепи, может составить  $nU_{\max}$ . В этом случае напряжение на дополнительном сопротивлении окажется равным  $(n-1)U_{\max}$ . Через дополнительное сопротивление и вольтметр, соединённые последовательно, протекает одинаковый ток

$$I = \frac{(n-1)U_{\max}}{R_d} = \frac{U_{\max}}{R_V}.$$

Следовательно,

$$R_d = R_V(n-1). \quad (40)$$

Пример включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь показан на рисунке 46. Наличие нескольких шунтов и добавочных сопротивлений внутри измерительных приборов позволяет варьировать их пределы измерений.

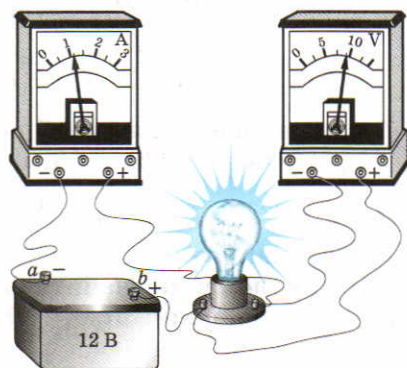


### ▲ 46

Амперметр и вольтметр в электрической цепи

Обычно сопротивление вольтметра  $R_V \geq 1$  МОм. Чтобы увеличить предел измерения вольтметра, последовательно ему подключают *добавочное сопротивление* (рис. 45).

**Добавочное сопротивление — проводник, присоединяемый последовательно с вольтметром для увеличения предела его измерений.**



### ВОПРОСЫ

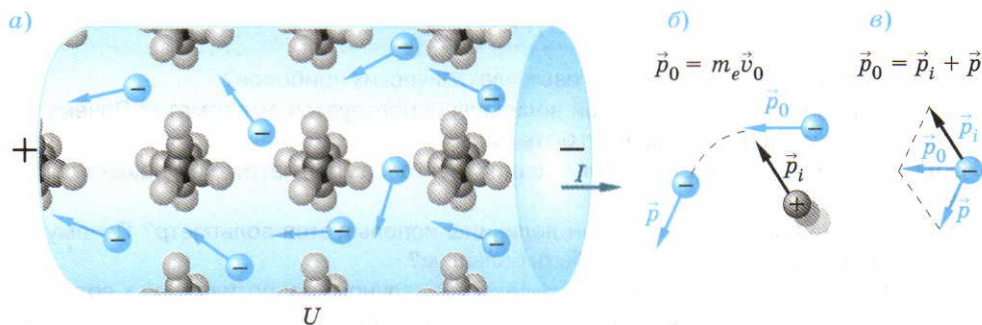
1. В чём отличие цифровых и аналоговых электрических приборов?
2. Для измерения какой физической величины используется амперметр? Почему сопротивление амперметра должно быть малым?
3. Объясните необходимость использования шунта к амперметру. Чему равно сопротивление шунта?
4. Для измерения какой физической величины используется вольтметр? Почему сопротивление вольтметра должно быть большим?
5. Объясните необходимость использования добавочного сопротивления к вольтметру. Как выбирается величина добавочного сопротивления?

### ЗАДАЧИ

1. Миллиамперметр может измерить максимальный ток 10 мА, его сопротивление 9,9 Ом. Какой шунт следует подключить к миллиамперметру для увеличения предела измерения тока до 1 А? Во сколько раз увеличится при этом цена деления прибора? **[0,1 Ом; в 100 раз]**
2. Для увеличения предела измерения амперметра с 2 до 50 А к нему был подключён шунт сопротивлением 0,05 Ом. Найдите сопротивление амперметра. **[1,2 Ом]**
3. Подключение к амперметру шунта сопротивлением 10 Ом позволило увеличить предел измерения от 2 до 10 А. Какое добавочное сопротивление необходимо присоединить к амперметру, чтобы им можно было измерить напряжение 200 В? Найдите сопротивление амперметра. **[40 Ом; 60 Ом]**
4. Вольтметр может измерить максимальное напряжение 6 В; его сопротивление 2 кОм. Какое добавочное сопротивление следует подключить к вольтметру, чтобы повысить предел измеряемого напряжения до 240 В? Во сколько раз при этом уменьшится чувствительность вольтметра? **[78 Ом; в 40 раз]**
5. К вольтметру, внутреннее сопротивление которого 1 кОм и предел измерения 12 В, подключают добавочное сопротивление, изготовленное из стальной проволоки сечением 0,1 мм<sup>2</sup>. Длина проволоки 4500 м. Какое максимальное напряжение сможет измерить вольтметр после подключения добавочного сопротивления? **[120 В]**

## § 14. 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. 47, а). Приобретаемая электронами под действием электрического поля энергия направленного движения тратится на нагревание кристаллической решётки проводника.



### ▲ 47

*Механизм нагревания кристаллической решётки при протекании электрического тока:*

*а) движение электронов в проводнике; б) взаимодействие электрона и иона; в) закон сохранения импульса*

При приближении к положительному иону электрон притягивается к нему, изменяя направление движения (рис. 47, б).

Импульс электрона при этом изменяется с  $\vec{p}_0$  на  $\vec{p}$ . Соответственно ион притягивается к электрону, приобретая импульс  $\vec{p}_i$  (рис. 47, в). Из закона сохранения импульса

$$\vec{p}_i = \vec{p}_0 - \vec{p}.$$

Однако 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 ионов, среднюю энергию решётки и соответственно температуру проводника.

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

$$Q = A. \quad (41)$$

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

$$A = qU = qIR.$$

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

$$q = It.$$



Закон (41) 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:

$$Q = I^2 R t. \quad (42)$$

Выделение энергии в проводниках зависит от 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. 48, а).

Для сравнения количества теплоты, выделяемого в параллельно соединённых проводниках, закон Джоуля—Ленца удобно представить в виде:

$$Q = \frac{U^2}{R} t, \quad (43)$$

так как напряжение  $U$  на проводниках одинаково.

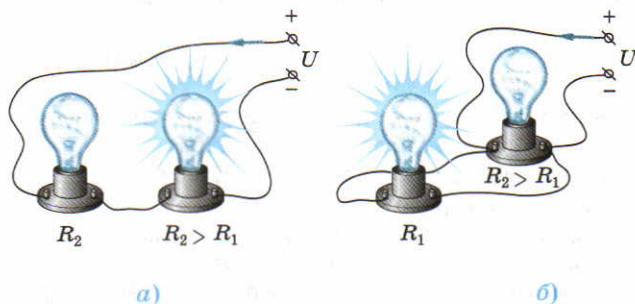
Из формулы (43) следует, что при параллельном соединении ламп (рис. 48, б) количество теплоты, выделяемое в каждой лампе в единицу времени, обратно пропорционально её сопротивлению.

Электрический чайник, кофеварка, тостер, калорифер, сварочный аппарат, лампа накаливания, электрическая пробка (предохранитель) — вот лишь небольшой перечень приборов, в которых используется тепловое действие тока.

**48** ▶

Зависимость выделения тепла в проводниках от типа соединения:

- а) последовательное соединение;
- б) параллельное соединение



**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, § 34) средняя мощность тока равна:

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

С учётом формул (42, 43) получаем

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU. \quad (44)$$

*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.*

### ВОПРОСЫ

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?

### ЗАДАЧИ

1. Найдите работу, совершённую силами электрического поля при прохождении зарядом 3 мкКл разности потенциалов 220 В. [0,66 мДж]
2. В проводнике сопротивлением 20 Ом сила тока 15 А. Найдите количество теплоты, выделяемое в проводнике за минуту. [270 кДж]
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. [ $R = r$ ]

4. Электрический чайник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в чайнике закипает за 10 мин, при включении другой — за 15 мин. За какой промежуток времени закипит вода, если включить обмотки последовательно; параллельно? [25 мин; 6 мин]
5. Электрические лампы, мощность которых  $P_1 = 60$  Вт и  $P_2 = 40$  Вт (при номинальном напряжении 110 В), включены последовательно в сеть с напряжением 220 В. Найдите мощность каждой лампы при таком включении. [ $P'_1 = 38,4$  Вт;  $P'_2 = 57,6$  Вт]

## § 15. Передача мощности электрического тока от источника к потребителю

**Максимальная мощность, передаваемая потребителю.** При передаче электроэнергии от источника тока к потребителю часть энергии идёт на нагревание подводящих проводов. Выясним, какая мощность передаётся потребителю, и найдём мощность, теряемую в проводах. 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. 49, а). Такова, например, часть схемы электропитания автомобиля (рис. 49, б).

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:

$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r. \quad (45)$$

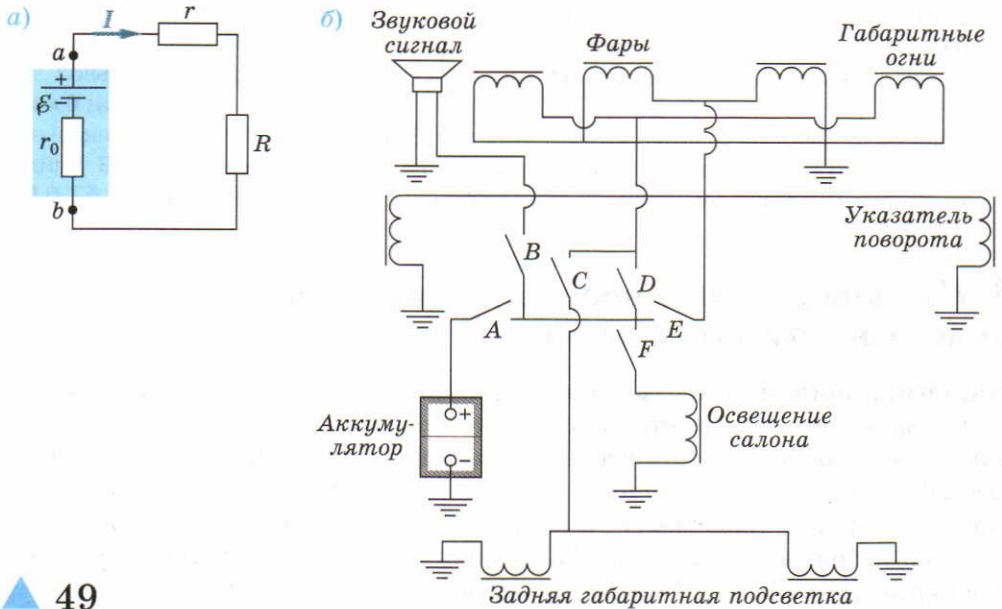
Каждое слагаемое в формуле (45) имеет определённый физический смысл.

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

$I^2R = P_{\text{н}}$  — мощность, передаваемая потребителю (нагрузке сопротивлением  $R$ ), или *полезная мощность*.

$I^2r = P_{\text{п}}$  — мощность, теряемая в проводниках (идущая на их нагревание), или *потери мощности*.





## 49

Передача электроэнергии от источника к потребителю:

- а) принципиальная схема электропередачи;  
 б) схема электропитания автомобиля

Мощность источника тока частично передаётся в нагрузку и частично теряется в проводах.

При передаче электрической энергии важно доставить потребителю максимальную мощность и снизить потери мощности в подводящих проводах. Выясним сначала, при каком сопротивлении нагрузки потребителю передаётся максимальная полезная мощность от источника тока. Зависимость полезной мощности от сопротивления нагрузки имеет вид:

$$P_{\text{н}}(R) = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}.$$

Функция  $P_{\text{н}}(R)$  имеет максимум, если её производная по  $R$  равна нулю, т. е.

$$P'_{\text{н}}(R) = 0.$$

Вычислим эту производную как производную от отношения двух функций  $\varepsilon^2 R$  и  $(R + r)^2$ :

$$P'_{\text{н}}(R) = \frac{(\varepsilon^2 R)'(R + r)^2 - \varepsilon^2 R[(R + r)^2]'}{(R + r)^4} = \frac{\varepsilon^2(R + r)^2 - \varepsilon^2 R \cdot 2(R + r)}{(R + r)^4}.$$

Приравнивая к нулю числитель дроби, получаем:

$$\xi^2(R+r)(R+r-2R) = 0.$$

Так как  $\xi^2 \neq 0$  и  $(R+r) \neq 0$ , то

$$R+r-2R = 0.$$

Следовательно,

$$R = r.$$

Если сопротивление источника тока соизмеримо с сопротивлением подводящих проводов, то

$$R = r_0 + r.$$

Потребителю передаётся максимальная мощность, если сопротивление нагрузки равно суммарному сопротивлению источника тока и подводящих проводов.

В этом состоит условие согласования нагрузки и источника.

По аналогии движущийся шар при ударе о неподвижный шар передаёт первому максимальную энергию, если массы шаров равны друг другу (см. Ф-10, рис. 127).

**Потери мощности в подводящих проводах.** Рассмотрим теперь, от чего зависят потери мощности и как можно их уменьшить. Чтобы оценить потери, надо знать силу тока в линии электропередачи. При заданной, известной, мощности  $P$  источника тока в линии электропередачи сила тока равна:

$$I = \frac{P}{\xi}.$$

Если внутренним сопротивлением источника тока можно пренебречь, то

$$\xi = U_{ab},$$

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

Значит,

$$P_n = \frac{P^2 r}{U_{ab}^2}. \quad (46)$$

Потери мощности в подводящих проводах обратно пропорциональны квадрату напряжения на источнике тока.

Поэтому уменьшение потерь мощности в линиях электропередачи достигается за счёт повышения напряжения в передающей электростанции.

КПД линии передачи — отношение полезной мощности к мощности источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P} = \frac{IR}{\xi}.$$

### В О П Р О С Ы

1. На что расходуется мощность источника тока?
2. Дайте определения полезной мощности и мощности потерь.
3. Приведите формулу зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки.
4. Сформулируйте условие согласования нагрузки и источника.
5. Почему уменьшение потерь мощности в линиях электропередачи достигается за счёт повышения напряжения в передающей электростанции?

### З А Д А Ч И

1. Какую полезную мощность потребляет лампа мощностью 100 Вт, рассчитанная на номинальное напряжение 220 В, если к ней приложено напряжение 200 В? **[82,6 Вт]**
2.  $N$  одинаковых источников тока с ЭДС  $\xi$  и внутренним сопротивлением  $r$  каждый соединены последовательно и согласованно и замкнуты накоротко. Найдите полную мощность потерь. **[ $N\xi^2/r$ ]**
3. Электрический подъёмник, потребляющий силу тока 8 А, работает при напряжении 150 В. При этом он поднимает груз массой 450 кг со скоростью 7 м/мин. Рассчитайте КПД подъёмника. **[43%]**
4. Линия электропередачи с сопротивлением подводящих проводов 0,2 Ом обеспечивает мощность 10 кВт в мастерской. Напряжение на входе в мастерскую равно 250 В. Найдите КПД линии электропередачи. **[97%]**
5. Водитель, оставив машину на стоянке, забыл выключить свет фар. Потеря мощности от их излучения составляет 95 Вт. Через какой промежуток времени разрядится аккумулятор с ЭДС 12 В, рассчитанный на 150 А · ч. Можно считать, что сопротивление лампочек фар остаётся постоянным. **[18,9 ч]**

## § 16. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов

**Электролиты.** Жидкости, как и твёрдые тела, могут быть проводниками электрического тока. В жидких металлах носителями электрического заряда являются электроны, поэтому говорят, что жидкие металлы обладают электронной проводимостью.

В растворах и расплавах *электролитов* (солей, кислот, щелочей) перенос зарядов под действием электрического поля осуществляется положительными и отрицательными ионами, движущимися в противоположных направлениях.

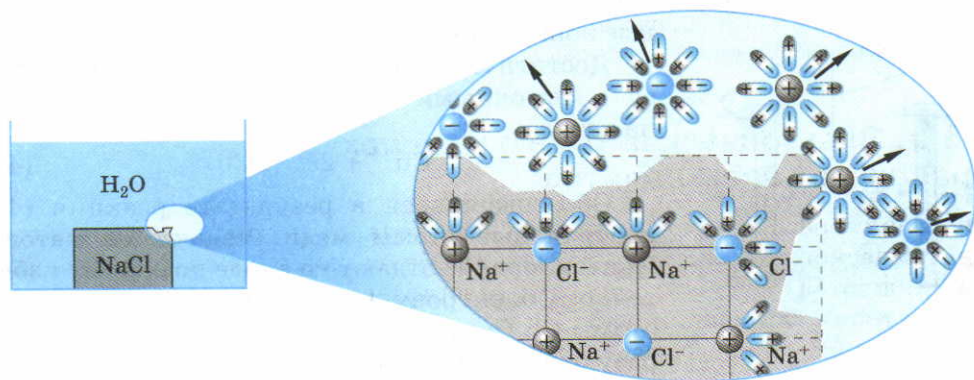


**Электролиты — вещества, растворы и расплавы которых обладают ионной проводимостью.**

Выясним, почему при растворении в воде твёрдый полярный диэлектрик превращается в проводник. Для этого рассмотрим процесс растворения в воде кристалла поваренной соли (рис. 50). В таком кристалле в узлах простой кубической решётки располагаются положительные ионы  $\text{Na}^+$  и отрицательные ионы  $\text{Cl}^-$ . При погружении кристалла  $\text{NaCl}$  в воду отрицательные полюса  $\text{OH}^-$  молекул воды начинают притягиваться кулоновскими силами к положительным ионам натрия. К отрицательным ионам хлора молекулы воды поворачиваются своим положительным полюсом  $\text{H}^+$ . Преодолевая силы притяжения между ионами  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , электрическое поле полярных молекул воды (подобно рыбам-пираньям, разрывающим свою добычу) отрывает ионы с поверхности кристалла. В растворе появляются свободные носители тока — ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , окружённые полярными молекулами воды. Описанное явление называется *электролитической диссоциацией* (от лат. dissociatio — разъединение).

**Электролитическая диссоциация — расщепление молекул электролита на положительные и отрицательные ионы под действием растворителя.**

Вследствие теплового движения молекул растворимость существенно зависит от температуры.



## ▲ 50

*Электролитическая диссоциация в растворе  $\text{NaCl}$*

Положительные и отрицательные ионы могут возникать и при плавлении твёрдых электролитов в результате распада полярных молекул из-за увеличения амплитуды тепловых колебаний.

**Степень диссоциации** — отношение количества молекул, диссоциировавших на ионы, к общему количеству молекул данного вещества.

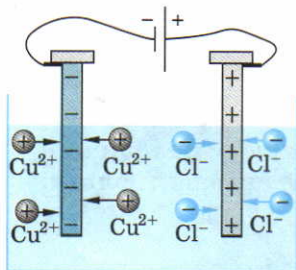
Наряду с процессом диссоциации (распада) молекул в растворах электролитов происходит и обратный процесс. При сближении ионов разных знаков возможна их *рекомбинация* (объединение) в одну молекулу. Когда число молекул, распадающихся на ионы, становится равным числу молекул, возникающих за это же время вследствие рекомбинации, устанавливается динамическое равновесие. В равновесии процессы диссоциации и рекомбинации компенсируют друг друга, а степень диссоциации остаётся постоянной.

В отсутствие внешнего электрического поля ионы вместе с нераспавшимися молекулами находятся в хаотическом тепловом движении.

**Электролиз.** При создании в электролите внешнего электрического поля (например, при опускании в раствор хлорида меди  $\text{CuCl}_2$  разноимённо заряженных электродов) возникает направленное движение ионов (рис. 51). Хлорид меди в водном растворе диссоциирует на ионы меди и хлора:



К отрицательному электроду (катоде) притягиваются положительные ионы  $\text{Cu}^{2+}$  (катионы), к положительному (аноду) — движутся отрицательные ионы  $\text{Cl}^-$  (анионы).



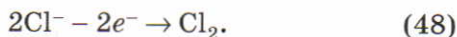
### ▲ 51

Направление движения ионов в электролите

Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами, находящимися на катоде:



Образовавшиеся в результате реакции (47) нейтральные атомы меди оседают на катоде. Ионы хлора  $\text{Cl}^-$  отдают на аноде по одному избыточному электрону, превращаясь в нейтральные атомы  $\text{Cl}$ . Соединяясь попарно, атомы хлора образуют молекулярный хлор  $\text{Cl}_2$ , выделяющийся на аноде в виде пузырьков газа:





Реакция (48) происходит не при любых условиях. Из-за вторичных реакций хлора с водой может выделяться кислород.

Он выделяется на аноде в виде пузырьков газа.

Таким образом, прохождение тока через электролит сопровождается явлением *электролиза*.

**Электролиз — выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита, при протекании через его раствор (или расплав) электрического тока.**

Явление электролиза было открыто в 1800 г. английскими учёными *У. Никольсоном* и *А. Карлейлем*, наблюдавшими выделение пузырьков кислорода на аноде и водорода на катоде при погружении электродов в воду.

**Закон Фарадея.** Найдём массу вещества, выделяющегося на электроде за определённый промежуток времени  $\Delta t$ . Эта масса равна массе всех ионов  $N_i$ , осевших на электроде за это время:

$$m = m_i N_i, \quad (49)$$

где  $m_i$  — масса одного иона.

Полный заряд  $Q$  всех ионов, прошедших через раствор на электрод, пропорционален заряду  $q_i$  каждого иона:

$$Q = q_i N_i. \quad (50)$$

Из отношения левых и правых частей равенств (49), (50) получаем

$$\frac{m}{Q} = \frac{m_i}{q_i} = k, \quad (51)$$

где  $k$  — *электрохимический эквивалент вещества*.

Для данного электролита отношение массы иона к его заряду является постоянной величиной.

Из формулы (51) следует *закон Фарадея*.

### **Закон Фарадея**

**Масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через раствор (расплав) электролита:**

$$m = kQ. \quad (52)$$

Этот закон был установлен экспериментально английским учёным *Майклом Фарадеем* в 1833 г. Им же были введены общепринятые теперь термины: электрод, катод, анод, электролит, электролиз. Из закона Фарадея следует, что *электрохимический эквивалент вещества чис-*



ленно равен массе вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит заряда 1 Кл.

Единица электрохимического эквивалента — килограмм на кулон (1 кг/Кл).

Закон Фарадея можно сформулировать иначе, учитывая, что  $Q = It$ .

**Масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна силе тока и времени прохождения тока через раствор (расплав) электролита:**

$$m = kIt. \quad (53)$$

Из формулы (53) можно найти величину электрохимического эквивалента вещества. Масса иона выражается через молярную массу  $M$  и постоянную Авогадро (см. Ф-10, формула (148)).

$$m_i = \frac{M}{N_A}.$$

Заряд иона кратен элементарному заряду:

$$q_i = ne, \quad (54)$$

где  $n$  — валентность химического элемента.

Тогда согласно выражению (51)

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}. \quad (55)$$

Иногда соотношение (55) называют *вторым законом Фарадея*.

Произведение элементарного заряда на постоянную Авогадро называется *постоянной Фарадея*:

$$F = eN_A = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль.}$$

Подставим значение электрохимического эквивалента в формулу (52) и получим *объединённый закон Фарадея*:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} Q. \quad (56)$$

Как следует из объединённого закона Фарадея, если на электроде выделяется моль одновалентного вещества, т. е.  $m = M$ ,  $n = 1$ , то  $F = Q$ .

*Постоянная Фарадея численно равна заряду, который надо пропустить через раствор электролита, чтобы выделить на электроде 1 моль одновалентного вещества.*

В опытах Фарадея в качестве электролита использовалась соль одновалентного серебра.

Электролиз широко применяется в технике.

*Гальваностегия* — декоративное или антикоррозийное покрытие металлических изделий тонким слоем другого металла (никелирование, хромирование, омеднение, золочение).

*Гальванопластика* — электролитическое изготовление металлических копий рельефных предметов. Этим способом, например, были сделаны фигуры для Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге.

*Электрометаллургия* — получение чистых металлов (Al, Na, Mg, Be) при электролизе расплавленных руд.

*Рафинирование металлов* — очистка металлов от примесей с помощью электролиза, когда неочищенный металл является анодом, а на катоде оседает очищенный.

## ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называют электролитами? Почему при растворении в воде твёрдый полярный диэлектрик превращается в проводник?
2. Какое физическое явление называют электролитической диссоциацией? Какая величина, характеризующая диссоциацию, остаётся постоянной при динамическом равновесии?
3. Какое физическое явление называют электролизом?
4. Сформулируйте закон Фарадея. Запишите объединённый закон Фарадея.
5. Каково применение электролиза в технике?

## ЗАДАЧИ

1. В результате электролиза из раствора  $\text{AgNO}_3$  выделилось 5,6 г серебра (электрохимический эквивалент серебра  $1,12 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл). Рассчитайте электрический заряд, прошедший через раствор. **[5 кКл]**
2. При электролизе медного купороса за 1 ч выделилось 10 г меди (электрохимический эквивалент меди  $3,28 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл). Найдите силу тока через электролит. **[8,47 А]**
3. Рассчитайте массу алюминия, выделившегося за 8 ч при силе тока 10 А. Молярная масса алюминия  $27 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, валентность 3. **[26,9 г]**
4. Для серебрения 12 ложек (площадь поверхности каждой 50 см<sup>2</sup>) через раствор соли серебра пропускается ток. Толщина покрытия должна составить 50 мкм. В течение какого времени должно проходить серебрение, если сила тока 1,3 А? Молярная масса серебра 0,108 кг/моль, валентность 1, плотность  $10,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. **[6 ч]**
5. При электролизе воды, происходившем в течение 1 ч при силе тока 5 А, выделился 1 л кислорода при давлении  $10^5$  Па. Найдите температуру выделившегося кислорода. Электрохимический эквивалент кислорода  $8,29 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл. **[257 К]**

## 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.

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

$$I = q'.$$

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

- **Постоянный электрический ток** — ток, сила тока и направление которого не изменяются с течением времени.

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

- **Сторонние силы** — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов в источнике тока.

- **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 Ом = 1 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  $T_0 = 293 \text{ K}$ ,  $\Delta T = T - T_0$ ,  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

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

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.

■ **Изотопический эффект** — зависимость критической температуры от массы ионов в кристаллической решётке.

Электрический ток в сверхпроводнике обусловлен согласованным движением пар электронов, связанных между собой взаимодействием с кристаллической решёткой. При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений.

При параллельном соединении резисторов проводимость цепи равна сумме их проводимостей.

■ **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 сопротивление цепи.

■ **Закон Ома для замкнутой цепи с несколькими последовательно соединёнными источниками тока:** сила тока в замкнутой цепи с последовательно соединёнными источниками тока прямо пропорциональна алгебраической сумме их ЭДС и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\sum \mathcal{E}}{R_{\text{н}}}.$$

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

■ **Шунт** — проводник, присоединяемый параллельно амперметру для увеличения предела его измерений:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{А}}}{n - 1},$$

где  $R_{\text{А}}$  — сопротивление амперметра,  $n$  — кратность изменения предела измерений.

■ **Вольтметр** измеряет электрическое напряжение. Включается в цепь параллельно.

■ **Дополнительное сопротивление** — проводник, присоединяемый последовательно с вольтметром для увеличения предела его измерений:

$$R_{\text{д}} = R_{\text{V}}(n - 1),$$

где  $R_V$  — сопротивление вольтметра. Количество теплоты, выделяющееся в проводнике, равно работе электрического тока.

- **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:

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

Потребителю передаётся максимальная мощность, если сопротивление нагрузки равно суммарному сопротивлению источника тока и подводющих проводов.

Жидкости, как и твёрдые тела, могут быть проводниками электрического тока.

- **Электролиты** — вещества, растворы и расплавы которых обладают ионной проводимостью.

- **Электролитическая диссоциация** — расщепление молекул электролита на положительные и отрицательные ионы под действием растворителя.

- **Электролиз** — выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита, при протекании через его раствор (или расплав) электрического тока.

- **Закон Фарадея:** масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через раствор (расплав) электролита:

$$m = kQ,$$

где  $k$  — электрохимический эквивалент вещества.

Единица электрохимического эквивалента — килограмм на кулон (1 кг/Кл).

- **Объединённый закон Фарадея:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} Q,$$

где  $M$  — молярная масса,  $n$  — валентность химического элемента; постоянная Фарадея  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль.

## § 17. 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. 52), состоящий из FeO (31%) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (69%).

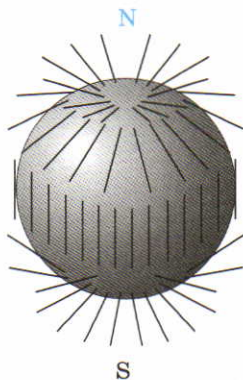
Согласно китайской легенде император Хванг Ти (около 2600 лет до н. э.) вёл войско в сплошном тумане с помощью поворачивающейся вокруг оси магнитной фигурки, всегда смотрящей на юг. Начиная со II в. н. э. в Китае изготавливались *постоянные магниты*, надолго сохраняющие магнитные свойства. В XI в. магнитный 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. 53). 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, назвали северным (N), а на юг — южным (S). Опыты Перегрина показали, что *одноимённые магнитные полюса отталкивают друг друга, а разноимённые притягивают* (рис. 54).



▲ 52

*Притяжение стальных предметов магнитом*



▲ 53

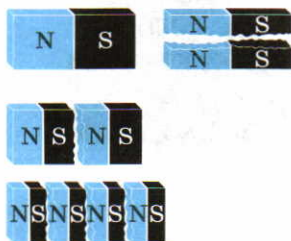
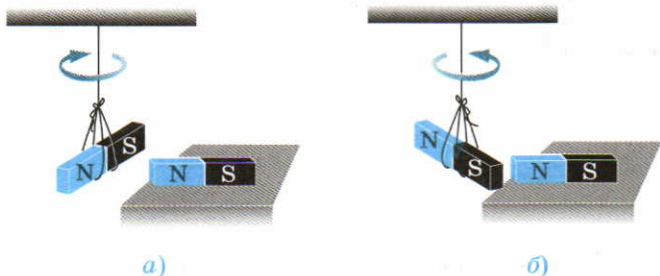
*Иголки вблизи поверхности намагниченного шара*



## 54

Взаимодействие полюсов магнитов:

- а) отталкивание одноимённых полюсов;  
б) притяжение разноимённых полюсов



## 55

Возникновение двух полюсов в любых фрагментах магнита

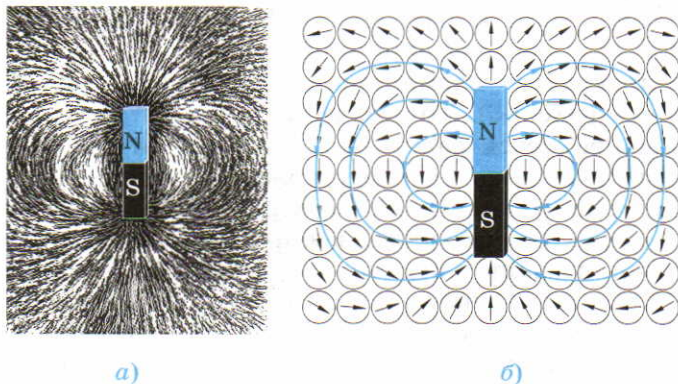
Предполагая, что взаимодействие магнитов обуславливается магнитными зарядами, находящимися на полюсах, Перегрин пытался их разделить. Однако все его попытки получить *магнитный монополю* (магнитный заряд) не увенчались успехом. Каждый фрагмент разделённого магнита имел два полюса: северный и южный (рис. 55).

**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 Перегринна) 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. 56, а).

## 56

Магнитное поле постоянного магнита:

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



Тем самым 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* (рис. 56, 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.

### ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте основные результаты опытов Перегринга.
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?

## § 18. Магнитное поле электрического тока

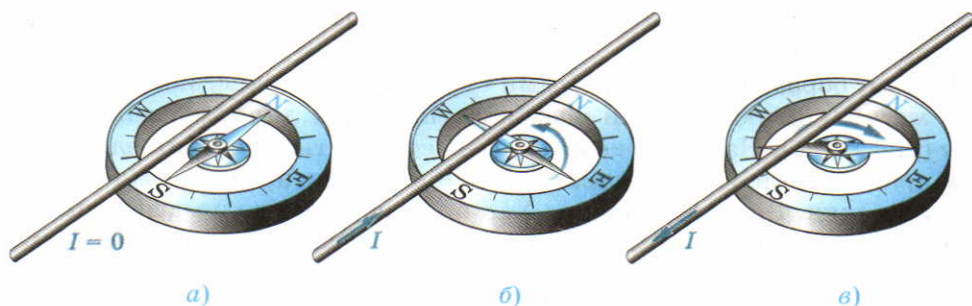
**Опыт Эрстеда.** Впервые взаимосвязь электричества и магнетизма зафиксирована в 1735 г. в одном из научных лондонских журналов. В статье отмечалось, что в результате удара молнии в комнате были разбросаны в разные стороны и сильно намагничены ножи и вилки. Это сообщение свидетельствовало о магнитном 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. 57, а), а при включении тока отклоняется почти перпендикулярно проводнику (рис. 57, б). Изменение направления тока сопровождалось аналогичным отклонением, но только в противоположную сторону (рис. 57, в). Таким образом, было показано, что электрический ток воздействует на магнитную стрелку.

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.





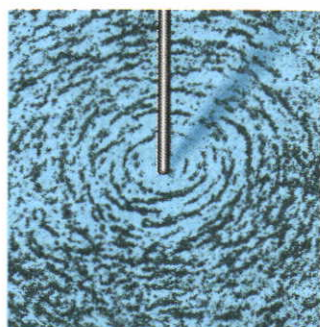
## ▲ 57

## Опыт Эрстеда

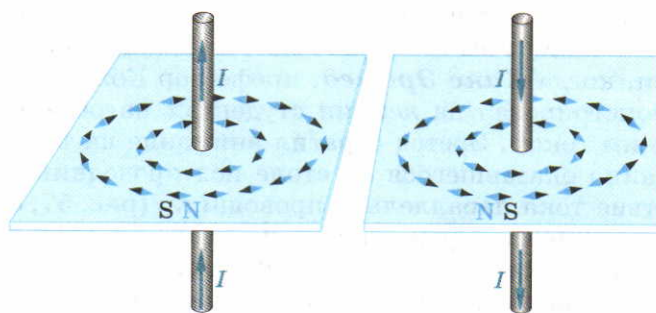
В плоскости, перпендикулярной проводнику с током, железные опилки и магнитные стрелки располагаются по касательным к концентрическим окружностям (рис. 58, а). Пространственная ориентация опилок и стрелок изменяется на противоположную (на  $180^\circ$ ) при изменении направления тока в проводнике (рис. 58, б).

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

**Вектор магнитной индукции.** В магнитном поле тока магнитная стрелка устанавливается в определенном направлении. Это свидетельствует о том, что величина, характеризующая магнитное поле, должна быть векторной и связанной с ориентацией магнитной стрелки.



а)



б)

## ▲ 58

Магнитное действие проводника с током в перпендикулярной плоскости: а) на железные опилки; б) на магнитные стрелки



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

Модуль вектора  $\vec{B}$  будет определён нами в § 20.

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

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 движения конца его рукоятки в данной точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в этой точке.*

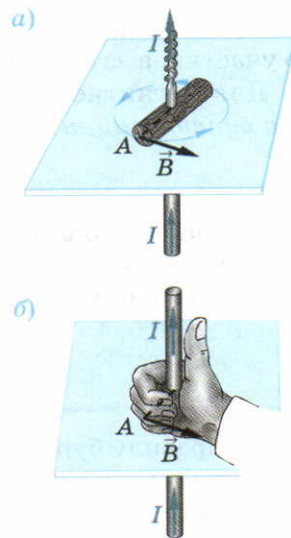
На рисунке 59, а с помощью правила буравчика определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в точке А.

- **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 59, б с помощью правила правой руки определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в точке А (сравните с рис. 59, а). Воспользовавшись правилом буравчика, определим направление вектора магнитной индукции вблизи кольцевого тока. Сначала найдём направление вектора магнитной индукции в центре кольцевого тока, находящегося в плоскости чертежа и протекающего по часовой стрелке (рис. 60, 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 уча-

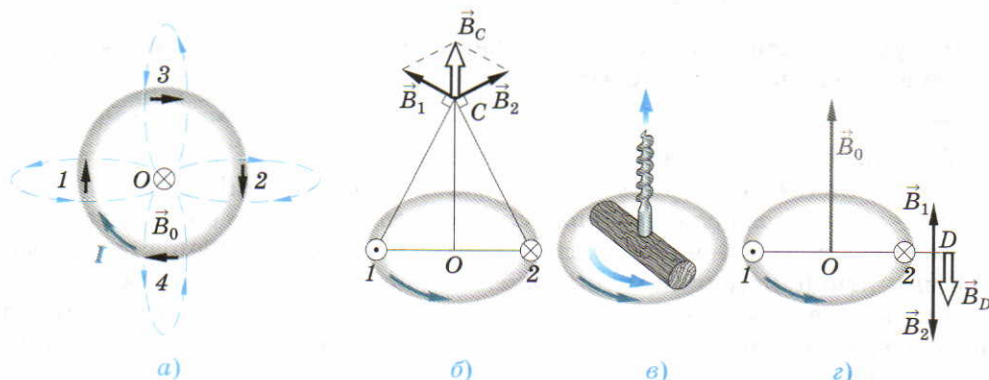


### ▲ 59

*Определение направления вектора индукции:*

*а) по правилу буравчика;*

*б) по правилу правой руки*



## ▲ 60

Магнитное поле кольцевого тока:

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

стки, 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:**

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

По правилу буравчика все прямолинейные участки (1, 2, 3, 4) 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. 60, б). Воспользуемся принципом суперпозиции. Элементарные прямые токи в диаметрально противоположных точках 1 и 2 кольца направлены соот-



ветственно к нам  $\odot$  и от нас  $\otimes$ . По правилу буравчика эти токи создают индукцию магнитного поля  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ . Суммарный вектор индукции, созданный 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. 60, 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. 60, 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.

## ВОПРОСЫ

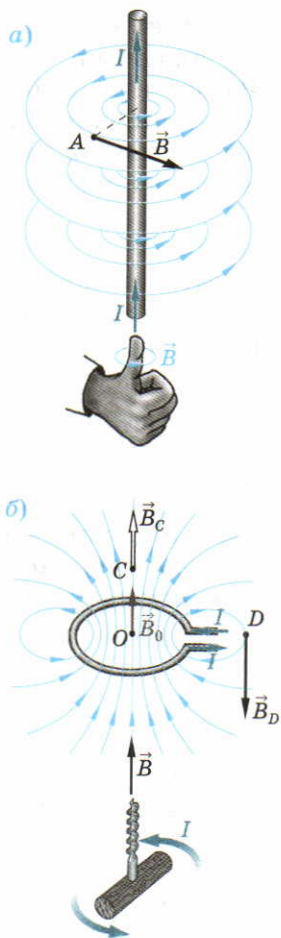
1. В чём состоит и что доказывает опыт Эрстеда?
2. Какая векторная физическая величина характеризует магнитное поле?
3. Сформулируйте правило буравчика и правило правой руки, определяющее направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током.
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для 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?

## § 19. 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.**





## ▲ 61

Линии магнитной индукции для основных конфигураций тока:

- а) прямой ток;  
б) виток с током

**Земной магнетизм.** Большой вклад в изучение природы магнетизма внёс французский учёный **Андре Ампер**. Ампер выдвинул гипотезу,

Линии индукции магнитного поля для прямого проводника с током являются concentрическими окружностями с центром на оси проводника, лежащими в плоскостях, перпендикулярных проводнику (сравните рис. 61, а и 58, 59). Для поля, созданного витком с током, линии магнитной индукции изображены на рисунке 61, б. На этом же рисунке показаны векторы индукции в точках *O*, *C* и *D*.

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

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

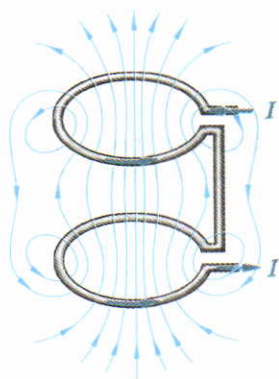
Это означает, что *магнитных зарядов* (подобных электрическим) *не существует*.

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 62.

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. 63, а), имеют практически ту же конфигурацию, что и линии индукции магнитного поля полосового постоянного магнита (рис. 63, б).

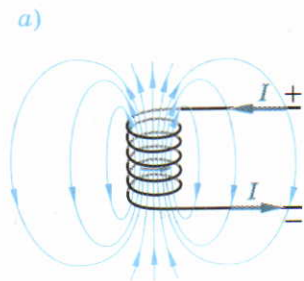
*Северный полюс магнита — полюс, из которого выходят линии магнитной индукции.*

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



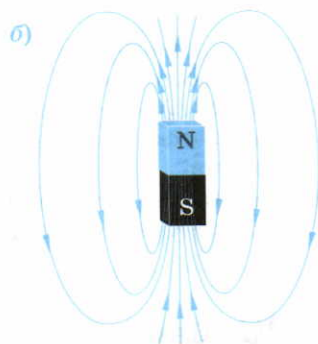
## ▲ 62

Линии индукции магнитного поля для двух витков



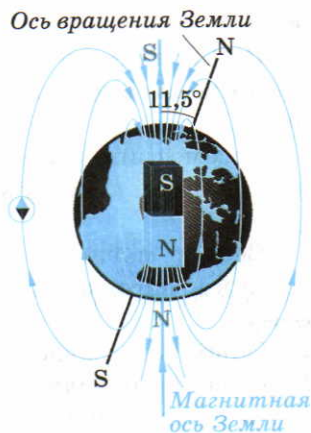
## ▲ 63

Линии индукции магнитного поля:  
а) катушки с током;  
б) постоянного полосового магнита



что магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Подобие линий индукции постоянного полосового магнита и катушки с током (см. рис. 63) 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. 64). Правда, северный полюс этого магнита N близок к Южному полюсу Земли, а южный S — к ее 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.



## ▲ 64

Магнитное поле Земли



## ВОПРОСЫ

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?

## § 20. 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. Действуя 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.

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. 65).

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. 65, а) или противоположно ему.

Если направление тока в проводнике составляет угол  $\alpha$  с вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 65, 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:

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha. \quad (57)$$

Направление силы Ампера определяется *правил*ом 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 отогнутый (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника (рис. 65, б).

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

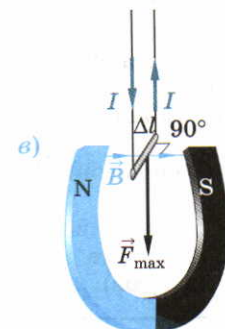
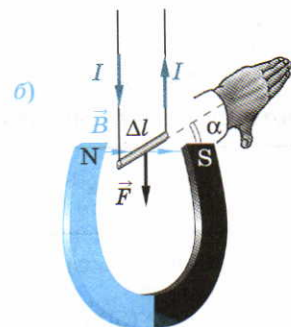
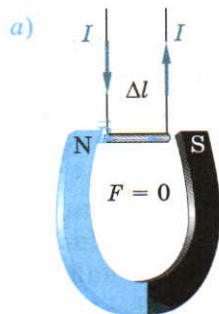
**Модуль вектора магнитной индукции.** Максимальная сила  $F_{\max}$  действует на отрезок проводника, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, так как при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$  (рис. 65, в)

$$F_{A \max} = IB\Delta l. \quad (58)$$

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:

$$B = \frac{F_{A \max}}{I\Delta l}. \quad (59)$$



### ▲ 65

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

а)  $\alpha = 0$ ;

б) произвольный угол  $\alpha$ ;

в)  $\alpha = 90^\circ$

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.

В таблице 4 приводятся значения магнитной индукции полей, созданных различными источниками.

Таблица 4

#### 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)	$10^{-2}$		

#### ВОПРОСЫ

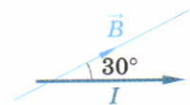
1. Почему магнитное поле действует на магнитную стрелку?
2. Сформулируйте закон Ампера. Запишите его математическое выражение.
3. Как ориентирована сила Ампера относительно направления тока и вектора магнитной индукции?
4. Как определяется направление силы Ампера? Сформулируйте правило левой руки.
5.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

## ЗАДАЧИ

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. [0,36 Н]
2. Проводник длиной  $l = 20$  см расположен горизонтально (рис. 66). 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? [0,01 Н]
3. Прямой проводник, длина которого  $l = 10$  см, масса  $m = 10$  г, подвешен горизонтально на двух лёгких проводящих нитях в однородном магнитном поле (рис. 67). Линии индукции магнитного поля направлены горизонтально и перпендикулярно проводнику. Сила тока, протекающего по проводнику,  $I = 4,2$  А, индукция магнитного поля  $B = 0,1$  Тл. Найдите силу натяжения нитей. [0,07 Н]
4. Прямой проводник, длина которого  $l = 10$  см, масса  $m = 10$  г, подвешен горизонтально на двух лёгких проводящих нитях в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены вертикально. На какой угол отклоняются нити от вертикали при пропускании по проводнику тока? Индукция магнитного поля  $B = 0,1$  Тл, сила тока в проводнике  $I = 9,8$  А. [45°]
5. Найдите силу, действующую на каждый отрезок проводника с током (рис. 68), 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. [ $F_{12} = F_{45} = 0$ ;  $F_{23} = 7,5$  мН;  $F_{34} = 4,2$  мН]

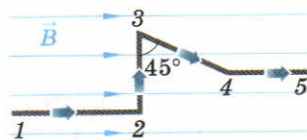
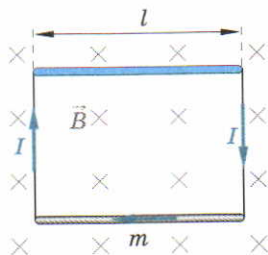
## § 21. Рамка с током в однородном магнитном поле

**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*.



▲ 66

67 ▲



▲ 68

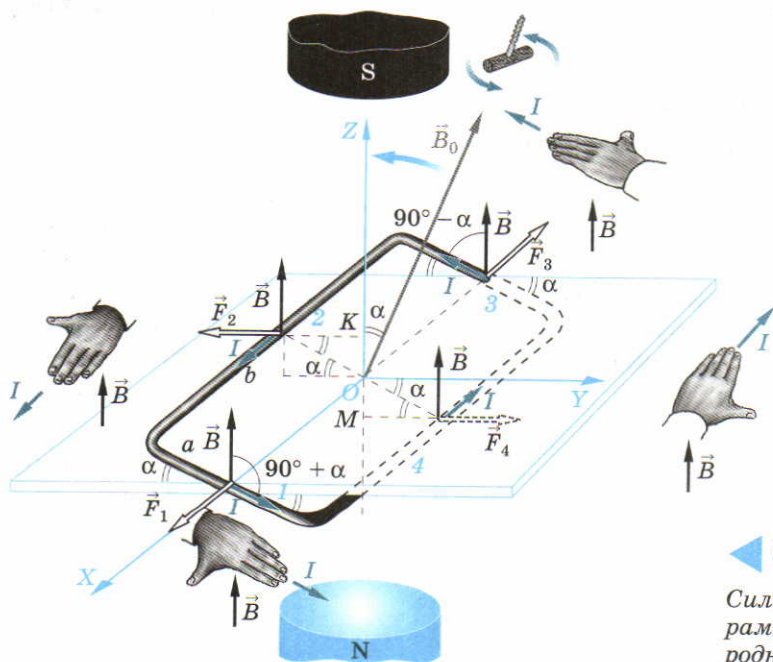


**Однородное магнитное поле — поле, во всех точках которого вектор магнитной индукции имеет одно и то же значение.**

Линии индукции однородного магнитного поля так же, как и линии напряжённости однородного электростатического поля, — параллельные прямые. Число линий магнитной индукции, проходящих через перпендикулярную к ним единичную площадку, 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. 69). 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.**



69

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 69, 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:

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

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

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

Силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_3$  лишь растягивают рамку, не вызывая движения 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  $O$ :

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

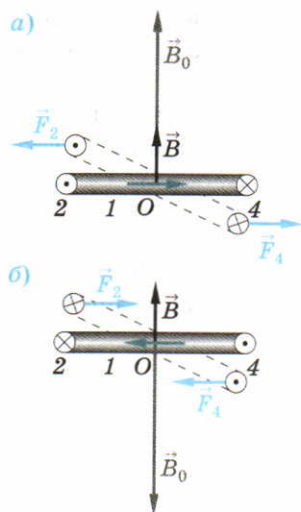
$$M_2 = M_4 = IbB \frac{a}{2} \sin \alpha.$$

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:

$$\boxed{M = ISB \sin \alpha,} \quad (60)$$

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





## ▲ 70

*Устойчивое и неустойчивое положения рамки с током в магнитном поле:*

- а)  $\alpha = 0$  — устойчивое равновесие;  
 б)  $\alpha = 180^\circ$  — неустойчивое равновесие

Как следует из формулы (60), вращающий момент сил, действующих на рамку, равен нулю ( $M = 0$ ) 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  $X$  (рис. 70). При таком рассмотрении рамки 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 вернется в начальное положение, её равновесие устойчиво, а если не вернется, то неустойчиво.

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

В первом случае (рис. 70, а) эти силы стремятся вернуть рамку в первоначальное положение, когда  $\alpha = 0$ . Во втором случае (рис. 70, 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.*

Витком тока является орбита электрона в атоме. Вращению электрона вокруг ядра со скоростью  $\vec{v}_e$  соответствует ток  $I$ , протекающий в противоположную сторону (рис. 71, а). В области ядра орбитальный ток создаёт собственную индукцию  $\vec{B}_0$ , перпендикулярную плоскости орбиты. В отсутствие внешнего магнитного поля ориентация плоскости орбиты электрона в атоме произвольна. При включении внешнего магнитного поля плоскость орбиты электрона в атоме выстраивается в среднем по времени перпендикулярно направлению магнитной индукции внешнего поля. При этом направления собственной и внешней индукции совпадают (рис. 71, б).



**Принципиальное устройство электроизмерительного прибора и электродвигателя.** Поворот рамки с током в магнитном поле используют в электроизмерительных приборах (амперметрах, вольтметрах) магнитоэлектрической системы. В магнитном поле постоянного магнита располагается катушка, намотанная на цилиндр из мягкого железа, способная вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 72). 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 (60)) и числу витков  $N$ . Катушка поворачивается до тех пор, пока момент 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:

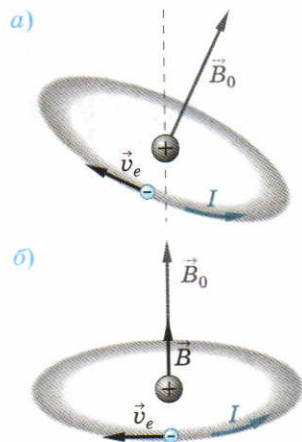
$$M_{\text{упр}} = C\alpha,$$

где  $C$  — постоянный коэффициент пропорциональности. Равенство моментов  $C\alpha = NISB$  позволяет найти измеряемую силу тока:

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

Измеряемая сила тока прямо пропорциональна углу отклонения стрелки.

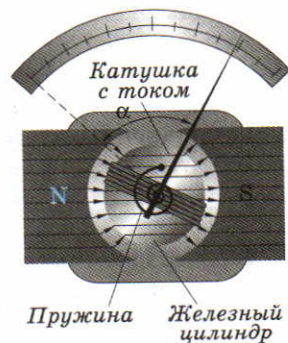
Вращение рамки с током в магнитном поле используется в электродвигателях постоянного тока, преобразующих электрическую энергию в механическую. Схематически устройство электродвигателя приведено на рисунке 73. Рамка с током, находящаяся в положении неустойчивого равновесия, поворачивается на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси. В момент, когда рамка проходит положение устойчивого равновесия, коллектор изменяет направление тока в рамке на противо-



### ▲ 71

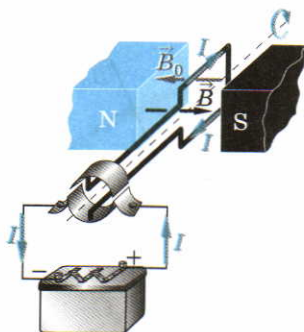
*Плоскость орбиты электрона в атоме в отсутствие и при наличии внешнего магнитного поля:*

- а)  $B = 0$ ;  
б)  $B \neq 0$



### ▲ 72

*Принципиальное устройство электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы*



## ▲ 73

Принципиальная схема  
электродвигателя  
постоянного тока

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

ложное. 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.

ВОПРОСЫ

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

ЗАДАЧИ

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?  
[5 мН · м]
3. В однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл находится прямоугольная рамка со сторонами 4 и 5 см. Сила тока, протекающего 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°. Найдите модули и направление сил, действующих на каждую сторону рамки, а также момент сил, вращающий рамку.  
[0,02 Н; 0,05 Н; 1,73 мН · м]
4. Проволочная рамка в виде равнобедренного треугольника со сторонами  $a = 5$  см и основанием  $b = 6$  см находится в плоскости чертежа. Основание треугольника расположено горизонтально, параллельно вектору магнитной индукции (рис. 74). Какая сила тока  $I$  начинает протекать по рамке, если при индукции  $B = 0,2$  Тл на рамку дей-

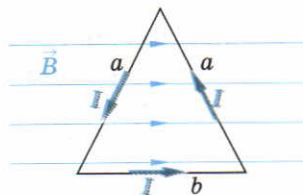


ствует вращающий момент  $M = 0,24 \text{ мН} \cdot \text{м}$ ? Относительно какой оси будет вращаться рамка?

[1 А]

5. Определите модуль магнитной индукции, если максимальный вращающий момент  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$  действует на проволочную катушку, площадь поперечного сечения которой  $10 \text{ см}^2$ , при силе тока в рамке  $2 \text{ А}$ . Число витков в катушке  $1000$ .

[25 мТл]



▲ 74

## § 22. 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. 75, а):

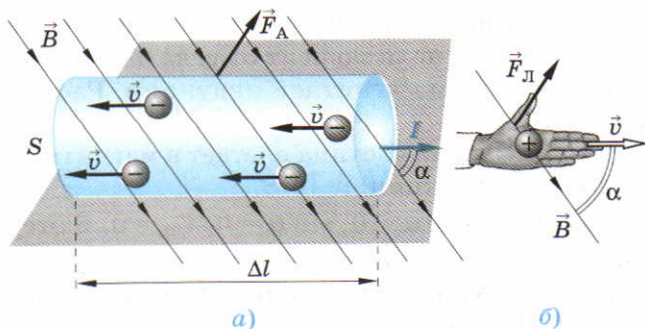
$$F_A = I\Delta l B \sin \alpha,$$

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

$$N = nS\Delta l,$$

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



75 ▶

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:

$$F_{\text{Л}} = \frac{F_{\text{А}}}{N}.$$

**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

$$F_{\text{Л}} = qvB\sin \alpha, \quad (61)$$

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.

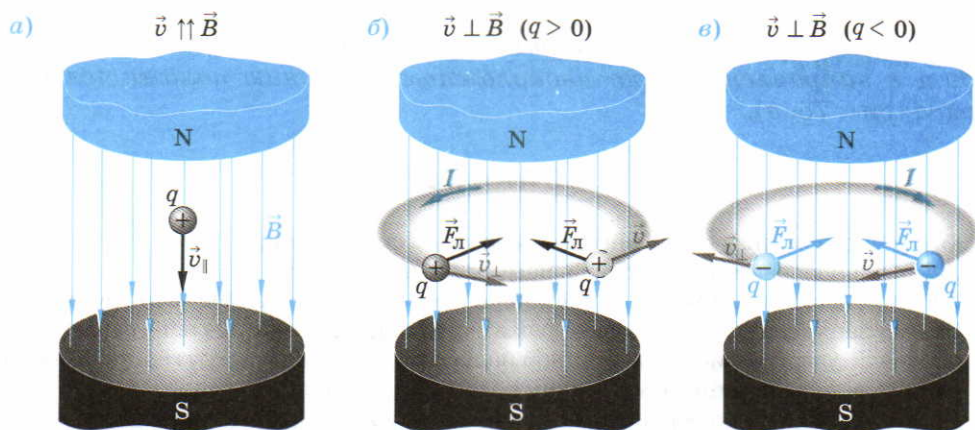
- **Правило левой руки**

*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. 75, 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.

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

В этом случае  $\alpha = 0$ ,  $\sin \alpha = 0$ ,  $F_{\text{Л}} = 0$ . В отсутствие силы Лоренца частица (согласно принципу инерции (Ф-10, § 19)) будет продолжать двигаться равномерно и прямолинейно с начальной скоростью вдоль линий магнитной индукции (рис. 76, а).



## ▲ 76

*Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле*

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

2. 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  $\vec{v}_\perp$ , двигаться по окружности (рис. 76, 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

$$R = \frac{mv_\perp}{qB}. \quad (62)$$

*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:

$$T = \frac{2\pi R}{v_\perp} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (63)$$

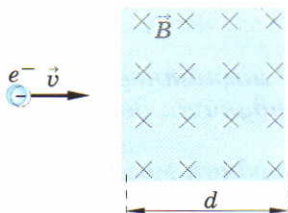
В соответствии с правилом левой руки для определения направления силы Лоренца *вращение отрицательного заряда по окружности происходит в направлении, противоположном вращению положительного заряда* (рис. 76, в).

### ВОПРОСЫ

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. Докажите, что период обращения по окружности заряженной частицы в поперечном магнитном поле не зависит от её скорости.

### ЗАДАЧИ

1. Индукция однородного магнитного поля  $B = 0,3$  Тл направлена вдоль оси  $X$ . 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).  
[2,4 · 10<sup>-13</sup> Н]
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).  
[17 см; 0,22 мкс]
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.  
[0,2 Тл]
4. Два электрона влетают в однородное магнитное поле со скоростью  $v = 5 \cdot 10^6$  м/с. Один из электронов влетает в поле в начале координат в положительном направлении оси  $X$ , двигаясь затем по окружности, пересекающей положительное направление оси  $Z$  на расстоянии  $D = 8$  см. Второй электрон летит прямолинейно в положительном направлении оси  $Y$ . Найдите модуль и направление вектора магнитной индукции ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).



5. Электрон влетает в область однородного магнитного поля шириной  $d$  перпендикулярно его границе и вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 77). Нарисуйте возможные траектории электрона для различных значений его скорости. Рассчитайте основные параметры этих траекторий.



## § 23. Масс-спектрограф и циклотрон

**Масс-спектрограф.** Вращение заряженных частиц в магнитном поле широко используется в физическом эксперименте.

*Масс-спектрограф* — прибор для измерения масс заряженных частиц.

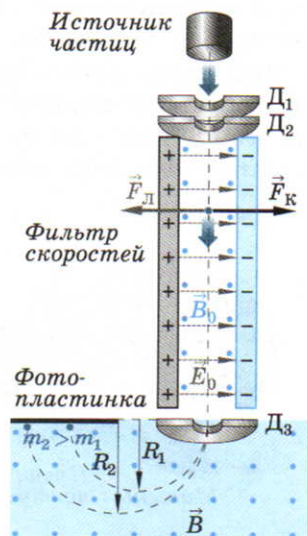
Принцип измерения масс заряженных частиц основан на том, что радиус окружности, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле, пропорционален массе частицы (формула (62)). Зная радиус окружности, можно найти массу частицы:

$$m = \frac{qB}{v_{\perp}} R.$$

Если известны заряд частицы и магнитная индукция, должна быть задана скорость  $v_{\perp}$ , с которой частица влетает в магнитное поле. Источник заряженных частиц испускает частицы с различными скоростями (рис. 78). Диафрагмы  $D_1$  и  $D_2$  направляют частицы в фильтр скоростей, который выделяет частицы с определённой скоростью  $v_{\perp}$ .

В фильтре скоростей заряженная частица попадает во взаимно перпендикулярные электрическое (с напряженностью  $\vec{E}_0$ ) и магнитное (с индукцией  $\vec{B}_0$ ) поля. На ион, движущийся между пластинами конденсатора, действуют в противоположных направлениях две силы: электрическая  $F_K = qE_0$  и магнитная (сила Лоренца)  $F_L = qv_{\perp}B_0$ . Через диафрагму  $D_3$  пройдут только те ионы, для которых эти силы уравновешены, т. е.  $qE_0 = qv_{\perp}B_0$ , т. е. ионы, обладающие скоростью  $v_{\perp} = \frac{E_0}{B_0}$ . Ионы, движущиеся с другими скоростями, через фильтр не пройдут. По местоположению следа, который оставляют ионы на фотопластинке, находят радиус  $R$  полуокружности, описываемой ионом под действием поперечного магнитного поля с индукцией  $B$ . Масса иона определяется по формуле

$$m = \frac{qBB_0}{E_0} R.$$



▲ 78

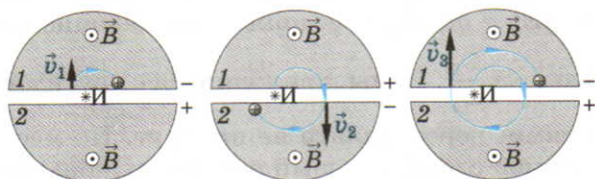
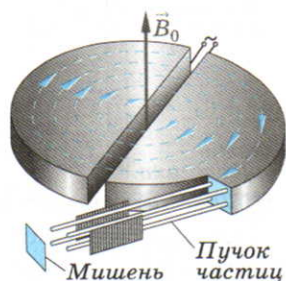
Принципиальная схема масс-спектрографа

С помощью подобных масс-спектрографов была определена масса всех химических элементов, обнаружены многие изотопы.

**Циклотрон.** Для сообщения высоких энергий заряженным частицам используют ускорители.

*Циклотрон* — циклический ускоритель заряженных частиц, в котором заряженные частицы движутся под действием электрического и магнитного полей по раскручивающейся спирали.

В циклотроне ускоряемые частицы движутся внутри пустотелых полуцилиндров (дуантов), помещённых между полюсами сильного электромагнита (рис. 79, а). К зазору между дуантами подводится переменное электрическое поле. Процесс ускорения заряженных частиц до энергий, необходимых для бомбардировки частиц-мишеней, происходит следующим образом. От источника заряженная частица попадает со скоростью  $v_1$  в дуант 1, двигаясь по полуокружности под действием силы Лоренца в течение промежутка времени  $T/2$  (рис. 79, б). В момент времени  $t = T/2$  электрическое поле ускоряет положительный заряд, влетающий в дуант 2 со скоростью  $v_2 > v_1$ . Поэтому радиус полуокружности, описываемой частицей в дуанте 2, оказывается большим, чем в дуанте 1. В момент времени  $t = T$  изменившаяся полярность электрического поля вновь ускоряет заряженную частицу, влетающую в дуант 1 со скоростью  $v_3 > v_2$  и движущуюся по полуокружности ещё большего радиуса. Далее процесс ускорения частиц продолжается. Период переменного напряжения равен периоду обращения частицы. *Ускорение частиц в циклотроне производит электрическое поле в зазоре между дуантами. Закручивая частицы в циклотроне, магнитное поле позволяет сделать ускоритель более ком-*



## ▲ 79

Ускорение заряженных частиц в циклотроне:

а) принципиальная схема циклотрона; б) процесс ускорения частиц



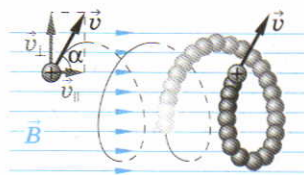
*пактным.* На последнем витке плоской раскручивающейся спирали пучок быстрых заряженных частиц выводится наружу, бомбардируя частицы мишени.

## В О П Р О С Ы

1. Зачем требуется фильтр скоростей в масс-спектрографе? Как производится фильтрация частиц?
2. В чём состоит принцип измерения масс в масс-спектрографе?
3. Для каких целей предназначен циклотрон? Опишите его принципиальное устройство.
4. Каким образом и где в циклотроне происходит ускорение заряженных частиц?
5. Для чего в циклотроне используется магнитное поле?

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

**Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле.** Наиболее общий вариант, когда заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под произвольным углом к линиям индукции, является 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. 80). 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*.



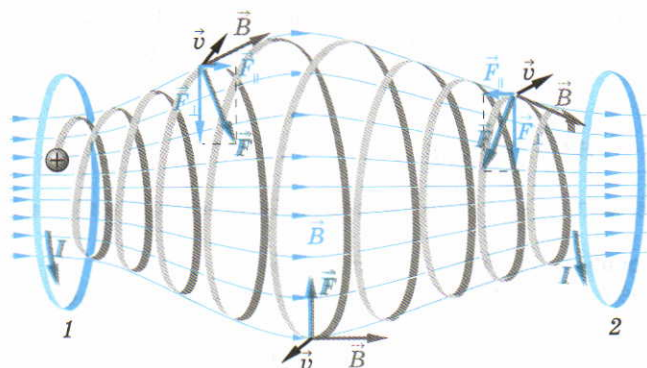
### ▲ 80

*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. 81).

Сгущение линий индукции в какой-либо пространственной области (как и для линий напряжённости электрического поля) означает большее





## 81

*Движение заряженных частиц в магнитной ловушке*

значение индукции магнитного поля в этой области. Индукция магнитного поля вблизи витков с током (см. рис. 81) больше, чем в пространстве между ними.

Изменение радиусов винтовой линии объясняется различием индукции в разных точках пространства. Согласно формуле (62) 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 винтовой линии с изменяющимся радиусом (см. рис. 81). 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 пространства высокотемпературной плазмы ( $T \approx 10^6$  К) при управляемом термоядерном синтезе.

**Радиационные пояса Земли.** 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 заря-

женных 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. 82), располагающийся на высоте от 2400 до 6000 км, и внешний, находящийся на высоте от 12 000 до 20 000 км.

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.



▲ 82

Радиационные пояса Земли

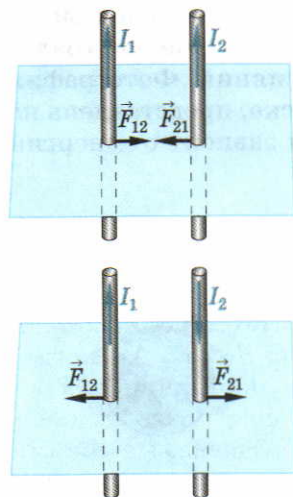
## ВОПРОСЫ

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?

## § 25. Взаимодействие электрических токов

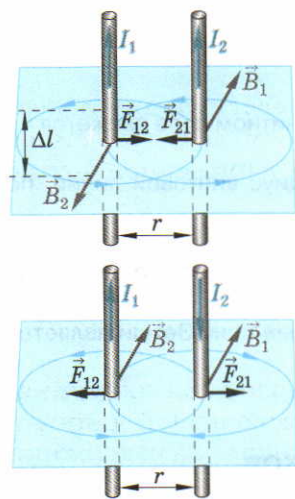
**Опыт Ампера с параллельными проводниками.** Как показал Эрстед, электрический ток действует на магнитную стрелку, т. е. создаёт магнитное поле. Ампер доказал, что магнитное поле воздействует на проводник с током. Он предположил также, что магнитные свойства тела определя-





### ▲ 83

Взаимодействие параллельных и антипараллельных токов



### ▲ 84

Физика магнитного взаимодействия токов

ются 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. 83). 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 втором проводнике (по правилу буравчика) создаёт магнитное поле индукцией  $\vec{B}_1$  в горизонтальной плоскости, перпендикулярной второму току, направленной от нас (рис. 84). 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 индукцией  $\vec{B}_2$  в горизонтальной плоскости, перпендикулярной току  $I_1$ , направленной к нам. Сила Ампера  $\vec{F}_{12}$ , действующая на участок проводника с током  $I_1$  длиной  $\Delta l$ , в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}_2$  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 тока  $I_2$ ). Таким образом, мы доказали, что *парал-*



тельно 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.

Для такого взаимного расположения проводников

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

или

$$I_2 \Delta l B_1 = I_1 \Delta l B_2. \quad (64)$$

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:

$$F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l. \quad (65)$$

Коэффициент пропорциональности

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

**Единица силы тока.** Формула (65) 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.

Сравнение формул (64) и (65) показывает, что магнитная индукция, создаваемая током, протекающим по проводнику бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, на расстоянии  $r$  от него определяется выражением

$$B = k_m \frac{I}{r}. \quad (66)$$

Таким образом, индукция магнитного поля убывает при увеличении расстояния от проводника с током.

## 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. Как сила взаимодействия параллельных токов зависит от расстояния между ними?
4. В каких единицах измеряется сила тока? Дайте определение ампера.
5. Какова величина вектора магнитной индукции на расстоянии  $r$  от бесконечного проводника, если сила тока в проводнике  $I$ ?

## § 26. 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. 85, 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

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

Следовательно, поток несжимаемой жидкости (или поток вектора скорости)

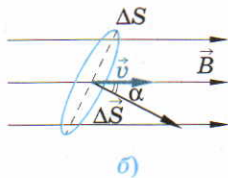
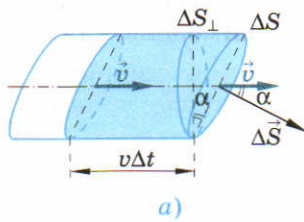
$$\Phi_v = v \Delta S \cos \alpha. \quad (67)$$

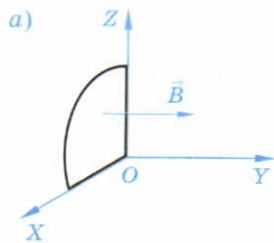
### ▲ 85

*Поток вектора:*

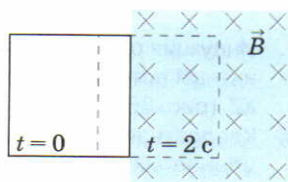
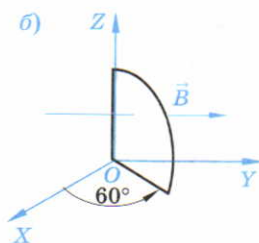
- а) скорости жидкости;  
б) магнитной индукции

Часто вводится вектор площади контура  $\Delta S$ , равный по модулю площади  $\Delta S$  и направленный перпендикулярно площади. Направление вектора площади определяется по правилу буравчика для контурных токов. Необходимо лишь выбрать направление обхода контура, ограничивающе-





▲ 86



▲ 87

го площадь. Тогда поток вектора скорости определяется как скалярное произведение векторов  $\vec{v}$  и  $\Delta\vec{S}^1$ :

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

**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:**

$$\Phi = (\vec{B}\Delta\vec{S}) = B\Delta S \cos \alpha. \quad (68)$$

Магнитный поток равен произведению модуля вектора магнитной индукции  $B$  на площадь  $\Delta S$  и косинус угла между векторами  $\vec{B}$  и  $\Delta\vec{S}$  (рис. 85, 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 ( $\cos \alpha = 1$ ).

### ВОПРОСЫ

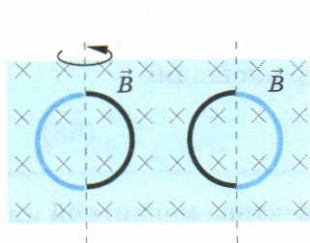
1. Как определяется поток жидкости? Чему он равен?
2. Дайте определение магнитного потока.
3. Как определяется направление вектора площади контура?
4. В каких единицах измеряется магнитный поток?
5. В каком случае магнитный поток равен 1 Вб?

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

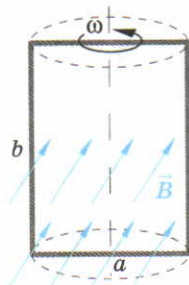


## ЗАДАЧИ

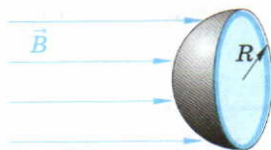
1. Индукция однородного магнитного поля  $B = 0,1$  Тл направлена по оси  $Y$ . Найдите магнитный поток сквозь четверть круга радиусом  $R = 10$  см, расположенную в плоскости  $XZ$  (рис. 86, а); под углом  $60^\circ$  к плоскости  $XZ$  (рис. 86, б). [**0,785 мВб; 0,39 мВб**]
2. Квадратная рамка со стороной  $a = 10$  см вдвигается со скоростью  $v = 3$  см/с в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 10^{-2}$  Тл, направленной перпендикулярно плоскости рамки (рис. 87). Найдите магнитный поток сквозь рамку в момент времени  $t = 2$  с. [**60 мкВб**]
3. Проволочное кольцо радиусом  $R$ , находящееся в плоскости чертежа, поворачивается на  $180^\circ$  относительно вертикальной оси (рис. 88). Индукция магнитного поля  $\vec{B}$  перпендикулярна плоскости чертежа. Найдите изменение магнитного потока сквозь кольцо в результате его поворота. [ **$2\pi BR^2$** ]
4. Найдите магнитный поток  $\Phi$  в произвольный момент времени  $t$ , пронизывающий прямоугольную рамку со сторонами  $a$  и  $b$ , вращающуюся с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 89). Индукция однородного магнитного поля  $\vec{B}$  перпендикулярна плоскости чертежа. Постройте график зависимости  $\Phi(t)$ . [ **$Bab\cos\omega t$** ]
5. Найдите магнитный поток, создаваемый однородным магнитным полем с индукцией  $\vec{B}$  и проходящий сквозь полусферу радиусом  $R$  (рис. 90). [ **$\pi BR^2$** ]



▲ 88



▲ 89



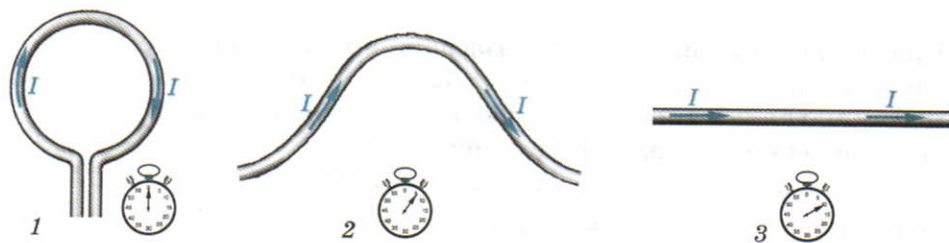
▲ 90

## § 27. 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.

При пропускании тока через гибкий свободный проводник, согнутый в виде кругового витка, проводник распрямляется (рис. 91).

Это происходит в результате действия магнитных сил отталкивания между диаметрально противоположными отрезками проводника, по ко-



▲ 91

*Распрямление витка с током в результате действия магнитных сил*

торым 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 (см. Ф-10, § 31). 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  $B$  (направленной перпендикулярно плоскости чертежа — от нас) действует сила Ампера (рис. 92). 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

$$\delta A = F_A x = IB\Delta l x,$$

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

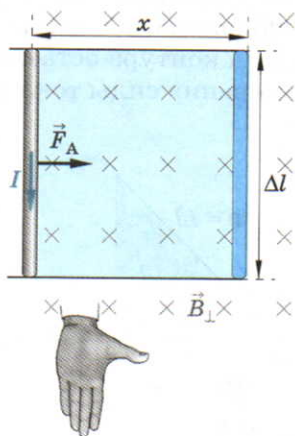
$$\delta A = I\Delta\Phi. \quad (69)$$

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

**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, пропорционально силе тока, т. е.  $B \sim I$ . Следовательно,  $\Phi \sim I$ , или

$$\Phi = LI, \quad (70)$$

где  $L$  — индуктивность витка.



▲ 92

*Сила Ампера, действующая на движущийся проводник с током*

**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 (71) 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

$$\Delta\Phi = L\Delta I. \quad (71)$$

Выражение для элементарной работы при таком изменении силы тока согласно формуле (69) имеет вид:

$$\delta A = LI\Delta I. \quad (72)$$

Графически элементарная работа определяется площадью трапеции со средней линией  $LI_1$  и высотой  $\Delta I$  (рис. 93).

При изменении силы тока в проводнике от нуля до  $I$  суммарная работа определяется площадью прямоугольного треугольника под прямой  $\Phi = LI$  со сторонами  $LI$  и  $I$ :

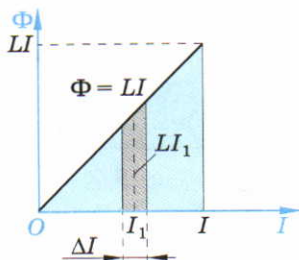
$$A = \frac{LI^2}{2}.$$

### ▲ 93

*Геометрическая интерпретация энергии магнитного поля контура с током.*

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

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (73)$$





### 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 катушке индуктивностью  $L$  при силе тока в ней  $I$ ?

### 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. Проводник, длина которого  $l = 0,5$  м, перемещается поступательно на расстояние  $d = 20$  см в плоскости чертежа (см. рис. 92). Найдите индукцию однородного магнитного поля  $B$ , если известно, что сила тока, протекающего по проводнику  $I = 6$  А, а сила Ампера совершает работу  $A = 60$  мДж. **[0,1 Тл]**
3. При силе тока  $2,5$  А в катушке возникает магнитный поток  $5$  мВб. Найдите индуктивность катушки. **[2 мГн]**
4. В катушке, индуктивность которой  $0,5$  Гн, сила тока  $6$  А. Найдите энергию магнитного поля, запасённую в катушке. **[9 Дж]**
5. Конденсатор, ёмкость которого  $C = 0,2$  мкФ, зарядили до напряжения  $U_0 = 100$  В и соединили с катушкой индуктивностью  $L = 1$  мГн. В определённый момент времени  $t$  в результате разрядки конденсатора напряжение на нём стало равным  $U = 50$  В, а в катушке сила тока стала  $I = 1$  А. Найдите количество теплоты, выделившееся за промежуток времени  $t$  в катушке (обладающей некоторым сопротивлением). **[0,25 мДж]**

## § 28. Магнитное поле в веществе

**Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.** Согласно гипотезе Ампера в любом теле существуют микроскопические токи, обусловленные движением заряженных частиц. Эти микроскопические токи создают собственное магнитное поле  $\vec{B}_c$ , поэтому магнитная индукция  $\vec{B}$  в среде отличается от индукции  $\vec{B}_0$  внешнего магнитного поля в той же точке пространства в отсутствие среды, т. е. в вакууме. Магнитная индукция в среде складывается из индукции внешнего магнитного поля и собственной индукции вещества:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c. \quad (74)$$

Микроскопические токи под действием внешнего магнитного поля определённым образом ориентируются: чем больше индукция  $\vec{B}_0$ , тем больше индукция собственного магнитного поля среды:

$$\vec{B}_c = \chi \vec{B}_0, \quad (75)$$

где  $\chi$  — магнитная восприимчивость среды ( $\chi$  — греческая буква «хи»).

Вектор собственной магнитной индукции среды может быть как сонаправлен с вектором магнитной индукции внешнего поля, так и противоположен ему.

Разная магнитная восприимчивость веществ определяет различие их магнитных свойств. Существует три основных класса веществ с резко отличающимися магнитными свойствами: *диамагнетики*, *парамагнетики* и *ферромагнетики*.

**Диамагнетик** — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, направленный противоположно вектору магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля, значительно меньше его по модулю:

$$\vec{B}_c \updownarrow \vec{B}_0, \quad B_c \ll B_0.$$

Для диамагнетика  $\chi < 0$ , при этом  $|\chi| \ll 1$ .

Диамагнетиками являются многие газы (водород, гелий, азот, двуокись углерода), плазма, металлы (золото, серебро, медь, висмут), стекло, вода, соль, резина, алмаз, дерево, пластики и т. д.

**Парамагнетик** — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля, меньше его по модулю:

$$\vec{B}_c \upuparrows \vec{B}_0, \quad B_c < B_0.$$

Для парамагнетика  $\chi > 0$ , при этом  $|\chi| \approx 1$ .

Парамагнетиками являются кислород, алюминий, платина, уран, щелочные и щелочноземельные металлы.

Для ферромагнетика  $\chi > 0$ , при этом  $|\chi| \gg 1$ .



**Ферромагнетик** — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля, значительно превышает его по модулю:

$$\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0, \quad B_c \gg B_0.$$

Ферромагнетиками являются железо, кобальт, никель, их сплавы, редкоземельные элементы.

Подставляя выражение (75) для индукции собственного магнитного поля среды в формулу (74), получаем

$$\vec{B} = (1 + \chi)\vec{B}_0,$$

или

$$\vec{B} = \mu\vec{B}_0, \quad (76)$$

где  $\mu = 1 + \chi$  — магнитная проницаемость среды.

**Магнитная проницаемость среды** — физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (77)$$

В диамагнетике внешнее магнитное поле незначительно ослабляется, так что  $\mu \leq 1$  (например, для золота  $\mu = 0,999961$ ).

В парамагнетике внешнее магнитное поле незначительно усиливается, так что  $\mu \geq 1$  (например, для платины  $\mu = 1,00025$ ).

В ферромагнетике внешнее магнитное поле значительно усиливается (например, для чистого железа  $\mu \approx 10^4$ ).

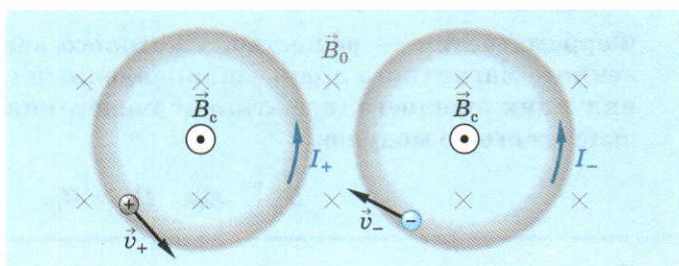
**Диамагнетизм.** Выясним, какие физические процессы определяют диамагнитные свойства плазмы.

Внешнее магнитное поле  $\vec{B}_0$ , приложенное к плазме, действует на свободные положительные и отрицательные заряды (ионы и электроны). Заряды, имеющие компоненту скорости  $v_{\perp}$ , перпендикулярную направлению индукции  $\vec{B}_0$ , начинают двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной  $\vec{B}_0$ . Если  $\vec{B}_0$  направлена перпендикулярно плоскости чер-



94 ▶

## Диамагнетизм плазмы



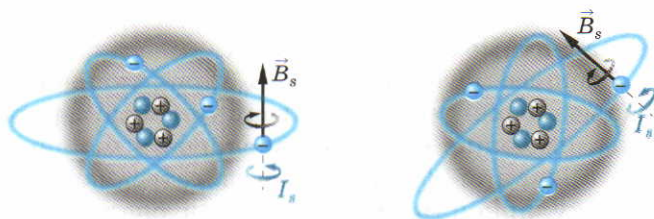
тежа (от нас), ионы и электроны закручиваются в противоположном направлении (рис. 94). Так как за направление электрического тока принимается движение положительных зарядов, токи  $I_+$  и  $I_-$ , соответствующие движению этих зарядов, протекают по окружности в одну сторону (против часовой стрелки). Собственная индукция  $\vec{B}_c$ , создаваемая этими токами, будет направлена (по правилу буравчика для витка с током) к нам, противоположно  $\vec{B}_0$ :  $\vec{B}_c \uparrow \downarrow \vec{B}_0$ . Аналогично движутся и другие свободные заряды в плазме. Этим объясняется диамагнетизм плазмы, т. е. ослабление в плазме внешнего магнитного поля.

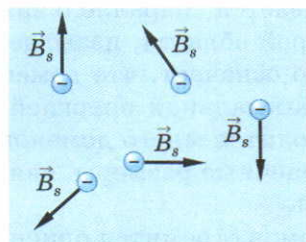
**Парамагнетизм.** В атомах парамагнетиков источником собственного магнитного поля является микроток, обусловленный (в классическом понимании) вращением валентного электрона вокруг собственной оси, или *спином* (от англ. spin — волчок). Учитывая, что электрон заряжен отрицательно, микроток  $I_s$  направлен противоположно направлению скорости вращения электрона вокруг собственной оси (рис. 95). Как и у витка с током, собственная индукция спина  $\vec{B}_s$  направлена по правилу буравчика вдоль оси вращения. У соседнего атома ось вращения валентного электрона может быть ориентирована в пространстве иначе (рис. 96, а). В силу хаотичности расположения атомов *резльтирующая собственная индукция в парамагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля равна нулю*.

При помещении парамагнетика во внешнее магнитное поле элементарные витки с током (вращающиеся вокруг своей оси электроны) начинают выстраиваться так, чтобы направление их собственной индукции  $\vec{B}_s$

95 ▶

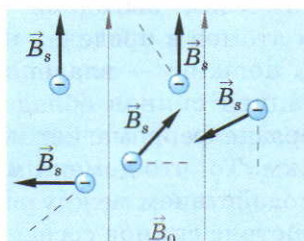
## Парамагнетизм лития





$$\sum \vec{B}_s = 0$$

а)



$$\sum \vec{B}_s \neq 0$$

б)

## 96

*Ориентация спинов в парамагнетике:*  
 а) в отсутствие внешнего магнитного поля ( $\vec{B}_0 = 0$ );  
 б) во внешнем магнитном поле ( $\vec{B}_0 \neq 0$ )

совпало с  $\vec{B}_0$  (рис. 96, б). Расположение осей вращения валентных электронов атомов перестаёт быть хаотичным, поэтому результирующая собственная индукция  $\vec{B}_c$  в парамагнетике становится отличной от нуля и сонаправленной с  $\vec{B}_0$  (рис. 96):

$$\vec{B}_c = \sum \vec{B}_s \neq 0, \quad \vec{B}_c \uparrow \vec{B}_0.$$

Магнитное поле в парамагнетике усиливается по сравнению с приложенным к нему внешним магнитным полем.

Нагревание парамагнетика приводит к уменьшению собственного магнитного поля, а следовательно, к уменьшению его магнитной проницаемости  $\mu$ .

## ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называют диа-, пара- и ферромагнетиками?
2. Какая физическая величина называется магнитной проницаемостью? Какие значения принимает магнитная проницаемость для диа-, пара- и ферромагнетиков?
3. Чем объясняется диамагнетизм плазмы?
4. Почему магнитное поле в парамагнетике усиливается по сравнению с приложенным к нему внешним магнитным полем?
5. Как и почему изменяется магнитная проницаемость парамагнетика с ростом температуры?

## § 29. Ферромагнетизм

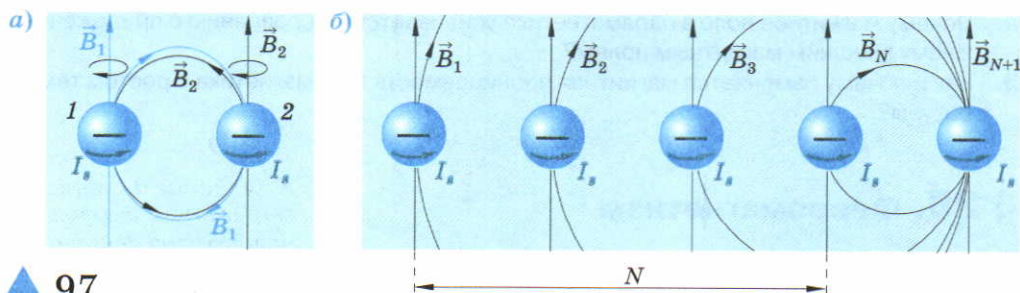
**Доменная структура.** В атомах ферромагнетиков собственная индукция создаётся не только валентными электронами, но и электронами внутренних электронных оболочек. Это заметно увеличивает результирующую собственную индукцию атома. В результате взаимодействия атомов



ферромагнетика энергетически выгодной оказывается параллельная ориентация спинов всех атомов в пределах некоторой области, называемой *доменом* (от франц. *domaine* — владение). Это означает, что домен с параллельной ориентацией спинов обладает минимальной энергией. В макроскопическом образце ферромагнетика находится много доменов размером порядка 0,5 мкм. То, что домен имеет конечные размеры, связано с магнитным взаимодействием между спинами.

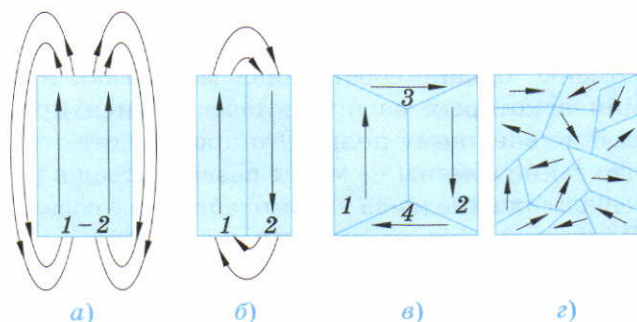
Магнитное взаимодействие спинов соседних атомов стремится ориентировать их антипараллельно друг другу (рис. 97, а). Магнитная индукция  $\vec{B}_1$  спина электрона 1 направлена в области электрона со спином 2 противоположно собственной индукции  $\vec{B}_2$  спина электрона 2 и наоборот  $\vec{B}_2 \uparrow \downarrow \vec{B}_1$ . Однако взаимодействие атомов, вызывающее параллельную ориентацию спинов, оказывается сильнее. В домене число атомов с параллельными спинами велико. Поэтому результирующей индукции, созданной  $N$  атомами домена, оказывается достаточно для переворота спинов атомов, начиная с  $N + 1$  (рис. 97, б). Возникает деление доменов. Домен (1—2) (рис. 98, а) делится на два домена: 1 и 2 с антипараллельными спинами (рис. 98, б). Суммарное магнитное поле доменов 1 и 2 приводит к образованию доменов 3 и 4 (рис. 98, в). В поликристаллах ориентация спинов в различных доменах хаотична, так что результирующая *собственная индукция в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля равна нулю* (рис. 98, г).

**Ферромагнетик во внешнем магнитном поле.** Примерная структура доменов в отсутствие внешнего магнитного поля показана на рисунке 99, а. При приложении к ферромагнетикку внешнего магнитного поля сначала (при не очень большой индукции  $\vec{B}_0$ ) происходит обратимый поворот доменов в направлении  $\vec{B}_0$  и их рост (рис. 99, б). Это означает, что при выключе-



▲ 97  
Магнитное взаимодействие спинов:  
а) соседних; б) на значительных расстояниях





## 98

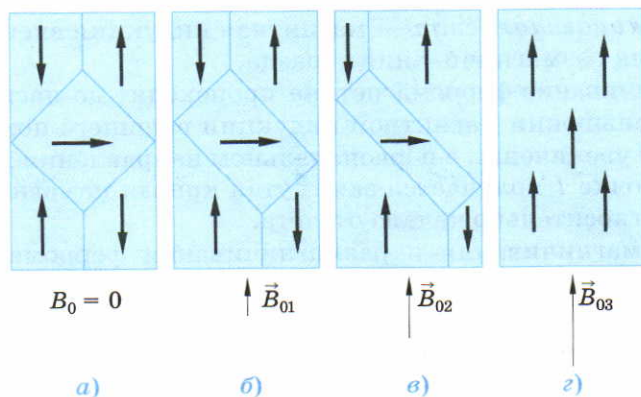
Деление доменов:  
 а) один домен; б) два домена; в) четыре домена; г) в реальной ферромагнетике

чении поля доменная структура ферромагнетика восстанавливается. В более сильном магнитном поле поворот и рост доменов становится необратимым (рис. 99, в): первоначальная доменная структура не восстанавливается при выключении магнитного поля. Подобным образом перетянутая пружина не принимает первоначальные размеры даже в отсутствие внешних сил. Начиная с некоторого значения индукции внешнего магнитного поля, возникает явление насыщения, при котором все домены выстраиваются в направлении внешнего поля (рис. 99, г).

Зависимость собственной индукции от индукции внешнего магнитного поля характеризуется *кривой намагничивания* (рис. 100).

При увеличении индукции  $\vec{B}_0$  внешнего поля в результате выстраивания доменов возрастает собственная индукция  $\vec{B}_c$  ферромагнетика.

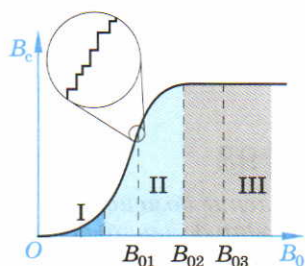
Точные измерения собственной индукции позволяют уловить поворот отдельных доменов в направлении индукции  $\vec{B}_0$  внешнего магнитного поля. При каждом повороте домена  $\vec{B}_c$  возрастает скачком.



## 99

Изменение доменной структуры ферромагнетика под действием внешнего магнитного поля:

а)  $B_0 = 0$ ; б)  $B_{01} \neq 0$ ;  
 в)  $B_{02} > B_{01}$ ; г)  $B_{03} > B_{02}$



## ▲ 100

*Кривая намагничивания для поликристаллического железа:*

*I — область обратимого поворота и роста доменов;*

*II — область необратимого поворота и роста доменов;*

*III — область насыщения*

**Остаточная намагниченность — собственная магнитная индукция в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля.**

*Магнитожёсткие ферромагнетики* — ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность велика (рис. 101, а, б).

Особенно велика остаточная намагниченность у сплава альника (51% Fe, 24% Co, 14% Ni, 8% Al, 3% Cu).

*Магнитомягкие ферромагнетики* — ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность мала (рис. 101, в).

К магнитомягким ферромагнетикам относят чистое железо, некоторые сорта стали. Для полного размагничивания образца следует изменить направление вектора индукции внешнего магнитного поля на противоположное остаточной намагниченности.

*Коэрцитивная (задерживающая) сила* — магнитная индукция внешнего поля, необходимая для размагничивания образца.

Дальнейшее перемагничивание ферромагнетика происходит до насыщения в точке 1. При уменьшении магнитной индукции внешнего поля до нуля и последующем её увеличении в первоначальном направлении до состояния насыщения в точке 1 получается замкнутая кривая намагничивания, симметричная относительно начала отсчёта.

Замкнутая кривая намагничивания и размагничивания ферромагнетика называется *петлёй гистерезиса* (от греч. hysteresis — отставание).

Форма петли — важнейшая характеристика ферромагнитного материала. Чем шире петля, тем труднее размагнитить образец.

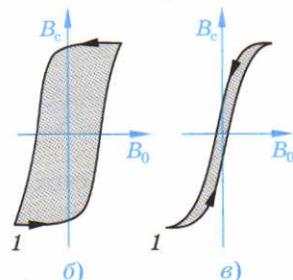
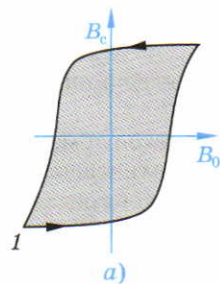


Магнитожёсткие ферромагнетики с широкой петлей гистерезиса (рис. 101, а) применяют для изготовления постоянных магнитов, так как у них велика остаточная намагниченность и коэрцитивная сила. Магнитожёсткие ферромагнетики с узкой петлей гистерезиса (рис. 101, б) применяют для изготовления элементов памяти компьютеров, магнитных лент видеомagneтофонов, кредитных карточек, так как обладают высокой остаточной намагниченностью и легко перемагничиваются из-за малости коэрцитивной силы.

Магнитомягкие ферромагнетики с узкой петлей гистерезиса (рис. 101, в) используют в устройствах, где требуется постоянное быстрое перемагничивание образца, которое облегчается из-за малой остаточной намагниченности и коэрцитивной силы (например, в трансформаторах, электродвигателях).

Исчезновение ферромагнитных свойств вещества вследствие нарушения ориентации доменов может происходить при механическом воздействии на образец (например, при ударе).

**Температура Кюри.** Ферромагнитные свойства могут также исчезать при сильном нагревании образца. Беспорядочное тепловое движение атомов становится столь значительным, что упорядоченная доменная структура ферромагнетика разрушается: материал становится парамагнетиком. Переход ферромагнетика в парамагнитное состояние происходит при определённой критической температуре, различной для разных материалов, называемой *температурой Кюри*. Впервые в 1894 г. известный французский учёный **Пьер Кюри** открыл это явление и измерил критическую температуру железа:  $T_K = 768^\circ\text{C}$ .



### ▲ 101

*Петля гистерезиса для различных ферромагнитных материалов*

**Температура Кюри** — критическая температура, выше которой происходит переход вещества из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Поэтому сильный нагрев постоянного магнита приводит к его размагничиванию.



## В О П Р О С Ы

1. Какое движение заряженных частиц создаёт собственную индукцию в ферромагнетике?
2. Что такое домены в ферромагнетике? Как изменяется доменная структура под действием внешнего магнитного поля?
3. Что такое кривая намагничённости? Объясните её ход.
4. Чем отличаются магнито-жесткие ферромагнетики от магнито-мягких?
5. В чём суть явления гистерезиса? Как зависит способность ферромагнетика к перемагничиванию от ширины петли гистерезиса?

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

- Электрический ток оказывает магнитное действие. Таким образом, магнитное поле порождается движущимися зарядами.
- **Вектор магнитной индукции** — 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:
 
$$B = \frac{F_{A\max}}{I\Delta l}.$$
 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.

ции. 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  $B$ :

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha,$$

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 вектор магнитной индукции входил 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 сече-



ния, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

- Индукция магнитного поля убывает при увеличении расстояния до проводника с током. Взаимодействие проводников с током является следствием магнитного взаимодействия движущихся зарядов в проводниках.

Под действием магнитной силы движущиеся параллельно в противоположных направлениях разноимённые заряды притягиваются, а одноимённые — отталкиваются.

- **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:

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

- **Магнитная проницаемость среды** — физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной

среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

- **Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики** — основные классы веществ с резко отличающимися магнитными свойствами.
- **Диамагнетик** — вещество, в котором внешнее магнитное поле незначительно ослабляется ( $\mu \leq 1$ ).
- **Парамагнетик** — вещество, в котором внешнее магнитное поле незначительно усиливается ( $\mu \geq 1$ ).
- **Ферромагнетик** — вещество, в котором внешнее магнитное поле значительно усиливается ( $\mu \gg 1$ ).
- **Кривая намагничивания** — зависимость собственной магнитной индукции от индукции внешнего магнитного поля.
- **Коэрцитивная сила** — магнитная индукция внешнего поля, необходимая для размагничивания образца.
- **Магнитожёсткие ферромагнетики** — ферромагнетики с большой остаточной намагниченностью.
- **Магнитомягкие ферромагнетики** — ферромагнетики с малой остаточной намагниченностью.
- **Петля гистерезиса** — замкнутая кривая намагничивания и размагничивания ферромагнетика.





# Электромагнетизм

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

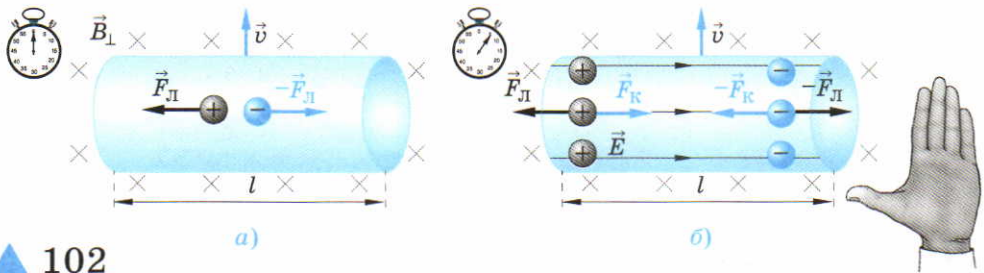
**Разделение разноимённых зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле.** Электрическое и магнитное поля порождаются одними и теми же источниками — электрическими зарядами. Кулоновское взаимодействие неподвижных зарядов возникает как следствие существования вокруг каждого заряда электростатического поля, действующего на другие электрические заряды. Магнитное взаимодействие движущихся зарядов (электрических токов) — результат существования магнитного поля, созданного токами. В отличие от электрического поля, действующего как на неподвижные, так и на движущиеся электрические заряды, магнитное поле действует только на движущиеся заряды.

Взаимосвязь электрических и магнитных явлений впервые была доказана Эрстедом.

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 направленно 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. 102, а). Это приводит к пространственному разделению положительных и отрицательных зарядов (рис. 102, б). В металлическом проводнике электроны под действием силы Лоренца смещаются вправо (рис. 102, 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 разде-



### ▲ 102

Разделение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле:

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

ление зарядов заканчивается, когда сила Кулона  $F_K$  становится равной силе Лоренца  $F_L$ .

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

$$E = vB_{\perp}.$$

Этой напряжённости поля соответствует определённая разность потенциалов между концами проводника.

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

$$\mathcal{E}_i = U = El = vBl. \quad (78)$$

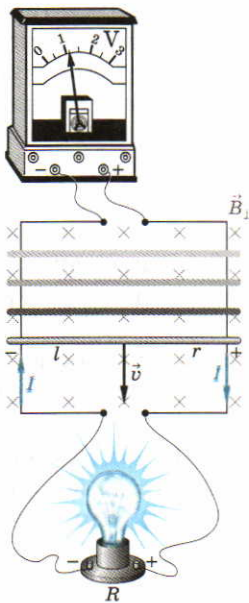
Проводящая перемычка, движущаяся по двум параллельным проводам, замкнутым на лампу и помещённым в магнитное поле, является простейшим генератором постоянного тока (рис. 103). Вольтметр фиксирует заметную разность потенциалов лишь при наличии сильного магнитного поля (см. формулу (78)).

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

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R+r} = \frac{vB_{\perp}l}{R+r}. \quad (79)$$

### ▲ 103

Возникновение ЭДС на концах проводника, движущегося в магнитном поле



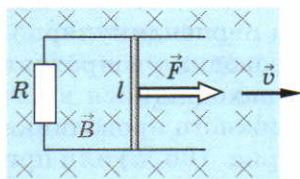


В О П Р О С Ы

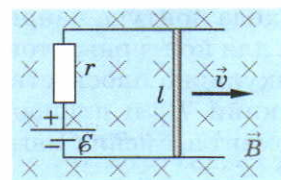
1. Какая сила вызывает перераспределение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле?
2. Какая сила препятствует перераспределению зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле?
3. При каком условии заканчивается перераспределение зарядов в проводнике, движущемся в магнитном поле?
4. Чему равна 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 (рис. 103), можно рассчитать по формуле (79).

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. **[0,45 В]**
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, 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. **[0,2 В]**
4. Проводящая перемычка длиной  $l = 0,2$  м может скользить без трения по проводам, замкнутым на резистор  $R = 2$  Ом (рис. 104). Вектор магнитной индукции  $B = 0,2$  Тл направлен перпендикулярно плоскости движения перемычки. Какую силу следует приложить к перемычке, чтобы она двигалась равномерно со скоростью  $v = 5$  м/с? Сопротивлением перемычки можно пренебречь. **[4 мН]**
5. Проводящая перемычка длиной  $l = 0,5$  м равномерно скользит со скоростью  $v = 5$  м/с по проводам, замкнутым на источник тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 1,5$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,2$  Ом (рис. 105). Система находится в магнитном поле, индукция которого перпендикулярна плоскости движения перемычки и равна  $B = 0,2$  Тл. Найдите силу тока, протекающего через перемычку, и его направление. Сопротивлением перемычки можно пренебречь. **[5 А]**



▲ 104



▲ 105



## § 31. 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 контур.

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 (69)) 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.

Рассмотрим особенности возникновения индукционного тока в каждом случае.

Предположим, что прямоугольный контур в плоскости чертежа образован двумя параллельными проводниками, соединёнными подводными проводами («шинами»), сопротивлением которых можно пренебречь (рис. 106). 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, может удаляться от него с постоянной скоростью  $\vec{v}$  (рис. 106, а) или приближаться к нему (рис. 106, б).

Найдём сначала изменение магнитного потока через контур при движении проводника вправо. 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:

$$\Phi' = B_{\perp}lv. \quad (80)$$

При сравнении формул (80) и (78) видно, что по модулю производная от магнитного потока по времени равна ЭДС индукции, возникающей в контуре. Для определения знака индукционного тока в контуре его направление сравнивается с выбранным направлением обхода контура.

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

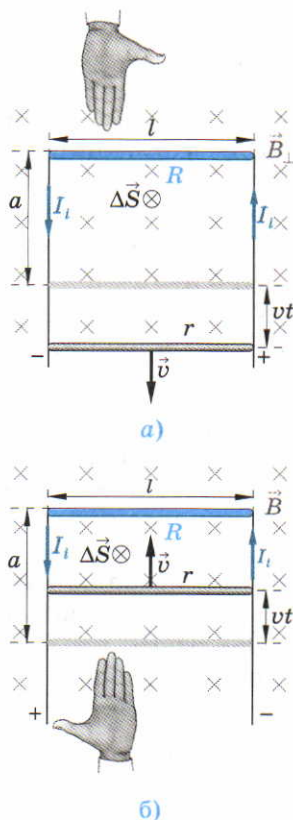
*Направление индукционного тока (так же как и величина ЭДС индукции) считается отрицательным, если оно противоположно выбранному направлению обхода контура.*

**Закон Фарадея—Максвелла.** На рисунке 106, а 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:

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'. \quad (81)$$

**Закон электромагнитной индукции, или закон Фарадея—Максвелла**

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



**▲ 106**

*Возникновение индукционного тока при изменении площади контура:*

- а) при увеличении площади;*
- б) при уменьшении площади*



Воспользуемся законом Фарадея—Максвелла для определения ЭДС индукции, когда проводник движется так, как показано на рисунке 106, б. Оставляя прежним направление обхода контура (по часовой стрелке), получаем

$$\Phi = B_{\perp} l(a - vt).$$

Следовательно,

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

Положительное значение ЭДС индукции означает, что она вызывает индукционный ток в направлении обхода контура. Сила индукционного тока определяется формулой (79).

ЭДС индукции равна работе по перемещению единичного заряда вдоль замкнутого контура, совершаемой силами вихревого электрического поля, порождаемого в пространстве изменением со временем магнитного потока через этот контур.

При движении проводника возникающий индукционный ток создаёт собственное магнитное поле  $\vec{B}_i$  и собственный магнитный поток  $\Phi_i$  через контур. Так как  $B_i \sim I_i \sim \mathcal{E}_i = -\Phi'$ , а  $\Phi_i \sim B_i$ , то

$$\Phi_i \sim (-\Phi'). \quad (82)$$

Условие пропорциональности (82) является математической формулировкой правила определения направления индукционного тока, установленного российским физиком *Э. Х. 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 (рис. 106, а)  $\Phi' > 0$ . Следовательно, согласно выражению (82) 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 (рис. 106, б)  $\Phi' < 0$ . В этом случае  $\Phi_i > 0$ , т. е. магнитный поток  $\Phi_i$  индукционного тока не позволит потоку  $\Phi$  резко убывать, поддерживая его.

### В О П Р О С Ы

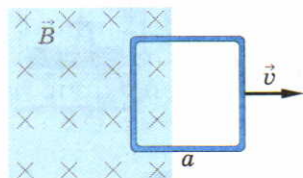
1. В чём состоит явление электромагнитной индукции?
2. Изменение каких физических величин может привести к изменению магнитного потока?



3. В каком случае направление индукционного тока  $\vec{j}$  считается положительным, а в каком — отрицательным?
4. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Запишите его математическое выражение.
5. Сформулируйте правило Ленца. Приведите примеры его применения.

### ЗАДАЧИ

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. 107). Какой силы ток пойдёт по рамке и в каком направлении, если её выдвигать из резко очерченной области поля со скоростью  $v = 5$  м/с?



**[10 мА, по часовой стрелке]**

2. Найдите значение ЭДС индукции в проволочной рамке при равномерном уменьшении магнитного потока на 6 мВб за 0,05 с.

**▲ 107**

**[0,12 В]**

3. При равномерном возрастании индукции магнитного поля, перпендикулярного поперечному сечению проволочной 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?

**[500]**

4. В магнитном поле расположена квадратная проволочная рамка со стороной  $a = 0,1$  м и сопротивлением  $R = 0,2$  Ом. Вектор индукции перпендикулярен плоскости рамки и направлен в её сторону, а его модуль изменяется по закону  $B = B_0 + \gamma t^2$ , где  $B_0 = 0,02$  Тл,  $\gamma = 5 \cdot 10^{-3}$  Тл/с<sup>2</sup>. Найдите величину сил, действующих на стороны рамки, и их направление в момент времени  $t = 2$  с.

**[4 мкН]**

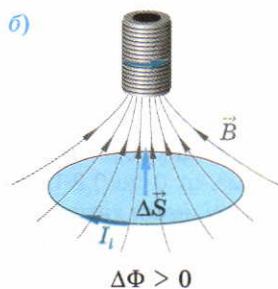
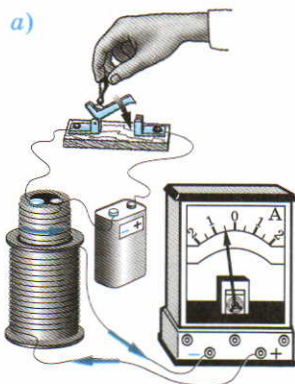
5. Проволочное медное кольцо радиусом  $R$  и поперечным сечением  $S$  лежит на столе. Какой заряд  $q$  пройдёт по кольцу, если его перевернуть с одной стороны на другую? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли равна  $B$ , удельное сопротивление меди  $\rho$ .

**[ $BRS/\rho$ ]**

## § 32. Способы получения индукционного тока

**Опыты Фарадея с катушками.** Рассмотрим возникновение индукционного тока в катушке при изменении модуля индукции внешнего магнитного поля. В экспериментах по изучению магнитных явлений часто используются катушки, состоящие из большого числа витков  $N$ . Это связано с тем, что ЭДС индукции, возникающие в отдельных витках, суммируются, что облегчает обнаружение индукционного тока.

Первоначально электромагнитная индукция была открыта Фарадеем в эксперименте с двумя вставленными друг в друга катушками (рис. 108, а).



### ▲ 108

*Возникновение индукционного тока в наружной катушке при включении тока во внутренней:*

*а) опыт Фарадея;  
б) его объяснение*

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. Для объяснения этого эффекта найдём изменение магнитного потока и направление индукционного тока.

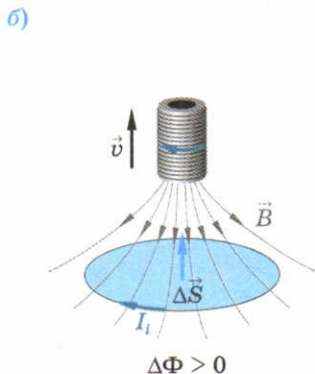
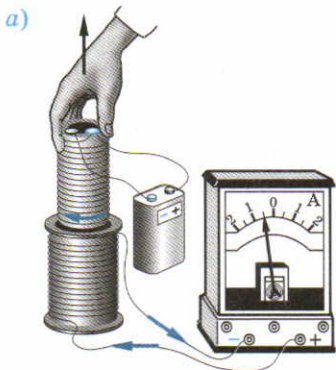
При замыкании ключа ток начинает протекать по внутренней катушке в направлении, показанном на рисунке 108, а. Он создаёт поле, вектор магнитной индукции которого направлен вверх в области наружной катушки. Если выбрать направление обхода витка наружной катушки вправо по ближайшей к нам стороне, то вектор 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. 108, б).

Индукционный ток возникает в наружной катушке, и в случае, если ток во внутренней катушке поддерживается постоянным, но она перемещается относительно наружной (рис. 109, а). Направление тока определяется следующим образом. Магнитное поле, созданное внутренней катушкой

в области наружной, будем считать однородным. Его индукция направлена вниз (по правилу буравчика). Следовательно, магнитный поток через витки наружной катушки будет отрицательным. До выдвижения внутренней катушки (считая магнитное поле однородным)  $\Phi_1 = -B_1S$ , после выдвижения  $\Phi_2 = -B_2S$ . 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. 109, б).

Это означает, что индукционный ток  $I_i$  протекает противоположно направлению обхода (влево по ближайшей к нам стороне).





◀ 109

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

**Опыт Фарадея с постоянным магнитом.** Фарадей обнаружил, что ещё одним способом индуцирования тока в катушке является вдвигание в катушку постоянного магнита (рис. 110, а). При вдвигании в катушку северного полюса магнита индукция магнитного поля (рис. 110, б), пронизывающего витки катушки, направленная вниз, возрастает, т. е.  $B_2 > B_1$ .

$$\Delta\Phi = -B_2S - (-B_1S) = -(B_2 - B_1)S < 0,$$

поэтому

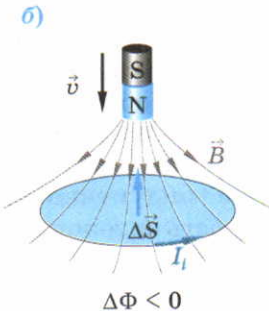
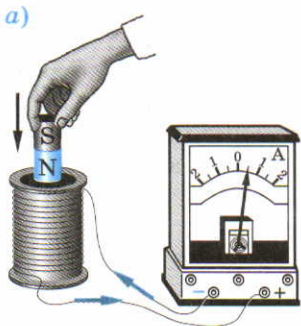
$$\mathcal{E}_i = -\Phi' > 0.$$

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.

ВОПРОСЫ

1. Почему в опытах по изучению магнитных явлений используются катушки, состоящие из большого числа витков?



◀ 110

*Возникновение индукционного тока в катушке при вдвигании в неё постоянного магнита: а) опыт Фарадея; б) его объяснение*

2. Объясните причину возникновения индукционного тока в опыте Фарадея с двумя катушками. Как определяется направление тока?
3. Почему в наружной катушке возникает индукционный ток при выдвигании внутренней катушки, подключённой к источнику тока? Как определяется его направление?
4. Объясните, почему возникает индукционный ток в катушке при вдвигании в неё магнита.
5. С одинаковым ли ускорением падает маленький полосовой магнит через вертикально стоящую катушку при замкнутой и разомкнутой обмотке катушки?

## § 33. Опыты Генри

**Самоиндукция.** В опытах Фарадея индукционный ток возникал вследствие изменения магнитного потока в катушке, вызванного изменением индукции внешнего магнитного поля. Американский учёный **Джозеф Генри** в 1832 г. впервые наблюдал возникновение индукционного тока в катушке, когда магнитный поток в ней увеличивался или уменьшался 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 или индуктивности контура.**

ЭДС индукции возникает при изменении магнитного потока. Если это изменение вызывается собственным током или связано с изменением индуктивности  $L$ , то говорят об *ЭДС самоиндукции*.

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

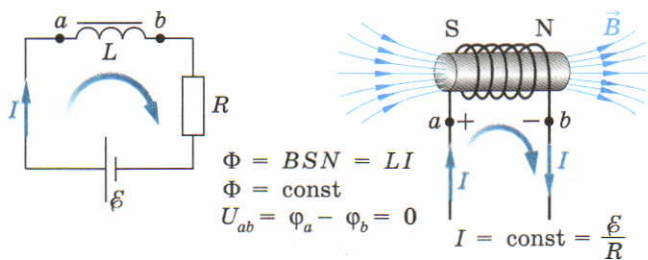
так как  $\Phi = Li$ , где  $L$  — индуктивность катушки. Обычно в опытах с индукционными токами используют *соленоиды* — катушки с ферромагнитными сердечниками, имеющие большую индуктивность, так как  $\mathcal{E}_{si} \sim L$ . Индуктивность катушки из  $N$  витков пропорциональна  $N^2$ . Это связано 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 результирующим 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

$$\mathcal{E}_{si} = -Li'.$$

(83)





◀ 111

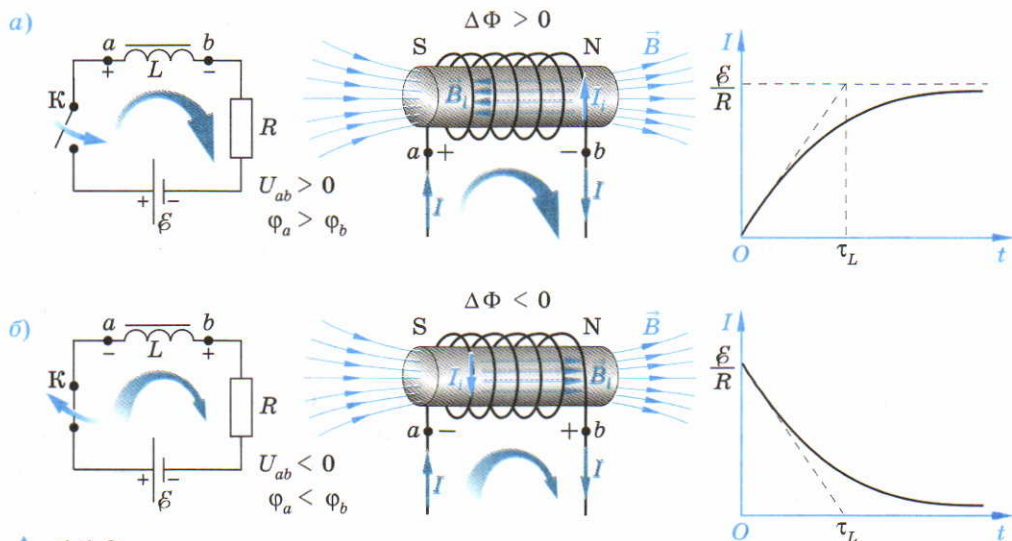
Постоянный ток в  $L-R$  цепи

Если через соленоид протекает постоянный ток ( $I = \text{const}$ ), ЭДС самоиндукции отсутствует  $\varepsilon_{si} = 0$  (рис. 111). Так как катушка наряду с индуктивностью обладает электрическим сопротивлением  $R$ , то сила тока через неё

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

**Токи замыкания и размыкания.** Как следует из формулы (83), 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. 112, а) магнитный поток сквозь соленоид возрастает:  $\Delta\Phi > 0$ . Согласно правилу Ленца, возникает индукцион-



▲ 112

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

ный ток  $I_i$ , создающий магнитное поле индукцией  $\vec{B}_i$ , направленной против индукции внешнего поля  $\vec{B}$ . При протекании индукционного тока положительные заряды оказываются в точке  $a$ , а отрицательные — в точке  $b$ . Полярность ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока через катушку, так как эта ЭДС включена встречно ЭДС внешнего источника. 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 (83) становится равной нулю и устанавливается сила тока значением  $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ .

При размыкании ключа К (рис. 112, б) ток самоиндукции протекает в ту же сторону, в которую протекал ток в цепи до размыкания. ЭДС самоиндукции поддерживает электрический ток без изменения. Реально ЭДС самоиндукции ускоряет движение электронов в проводнике, из которого сделана катушка. Поэтому в течение некоторого времени релаксации  $\tau_L$  в разомкнутой цепи продолжает протекать ток самоиндукции.

Согласно закону Ома для  $L-R$  цепи

$$i_{si} = \frac{\mathcal{E}_{si}}{R} = -\frac{LI'}{R}.$$

Изменение тока в единицу времени

$$i' = \frac{-I}{L/R} = -\frac{I}{\tau_L}. \quad (84)$$

Величина  $(-I)$  в числителе формулы (84) характеризует полное изменение тока при размыкании. Следовательно, промежуток времени  $\tau_L = = L/R$  в знаменателе формулы (84) определяет по порядку величины время протекания тока размыкания, или *время релаксации  $L-R$  цепи*.

Время релаксации является характеристикой инерционных свойств любой электрической цепи. В случае  $L-R$  цепи оно определяет как время протекания тока размыкания, так и время нарастания тока замыкания.

Геометрически производная  $i'$  в формуле (84) характеризуется тангенсом угла наклона касательной к кривой  $i(t)$ . При  $t = 0$  касательная к графику  $i(t)$  (рис. 112, б) пересекает ось  $t$  в точке  $\tau_L$ . Так можно оценить графически время релаксации.

Если в цепь включён соленоид большой индуктивности, ЭДС самоиндукции может значительно превысить ЭДС источника тока. Появление значительной разности потенциалов в месте размыкания цепи часто приво-



дит к электрическому пробую 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.

### ВОПРОСЫ

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

## § 34. 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.**

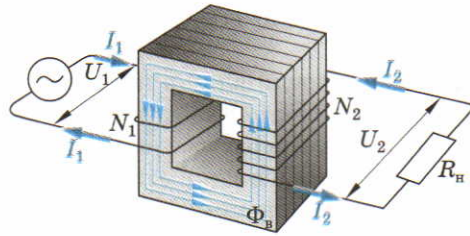
Принципиальное устройство трансформатора представлено на рисунке 113. В простейшем варианте трансформатор состоит из магнито-мягкого стального сердечника, на который надеты две катушки с проволочными обмотками.

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

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

## 113 ▶

Принципиальная схема трансформатора, подключённого к нагрузке



Обозначение трансформатора на схемах

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  $\Phi_{\text{в}}$  во вторичной обмотке оказывается таким же, как и в первичной. В каждом витке этих обмоток возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\dot{\Phi}'_{\text{в}}.$$

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):

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \dot{\Phi}'_{\text{в}}, \quad \mathcal{E}_2 = -N_2 \dot{\Phi}'_{\text{в}}.$$

Отношение ЭДС индукции в обмотках

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (85)$$

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:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (86)$$

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 во вторичной обмотке должно быть меньше числа витков 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. 114). Изолирующее покрытие пластин ограничивает индукционные токи в пределах каждого слоя, что заметно снижает ЭДС индукции и силу индукционных токов.

В небольших трансформаторах в качестве материала сердечника иногда используются ферриты — ферромагнетики, имеющие большое сопротивление по сравнению с сопротивлением железа. Потери мощности в трансформаторах составляют 2—3% от мощности источника в первичной обмотке. Поэтому мощность тока во вторичной обмотке можно считать равной мощности тока в первичной обмотке:

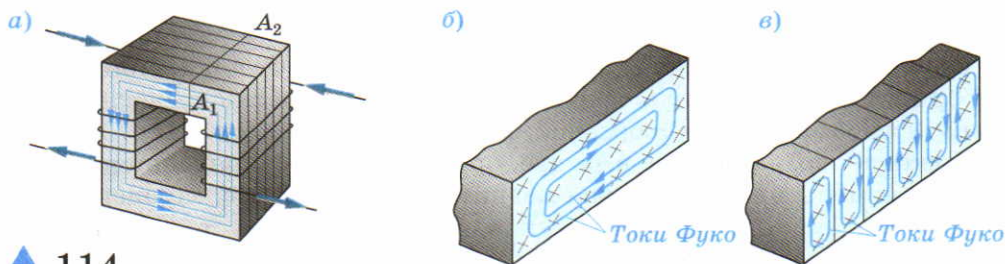
$$I_1 U_1 = I_2 U_2. \quad (87)$$

Следовательно,

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

При повышении напряжения с помощью трансформатора ( $U_2 > U_1$ ) во столько же раз уменьшается сила тока ( $I_2 < I_1$ ) и наоборот.

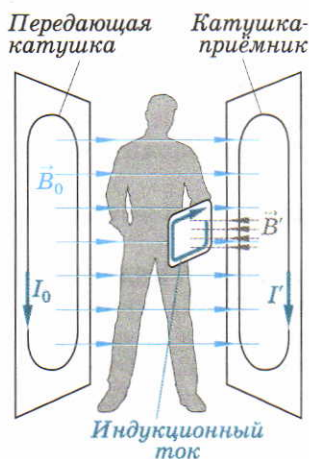
**Электромагнитная индукция в современной технике.** Приведём характерные примеры использования электромагнитной индукции в современной технике.



### ▲ 114

Токи Фуко: а) в сердечнике трансформатора;

б) без ламинирования (в сечении  $A_1$ — $A_2$ ); в) с ламинированием (в сечении  $A_1$ — $A_2$ )



## ▲ 115

### Детектор металла

Для обнаружения металлических предметов применяются специальные детекторы (рис. 115). 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. 256).

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.

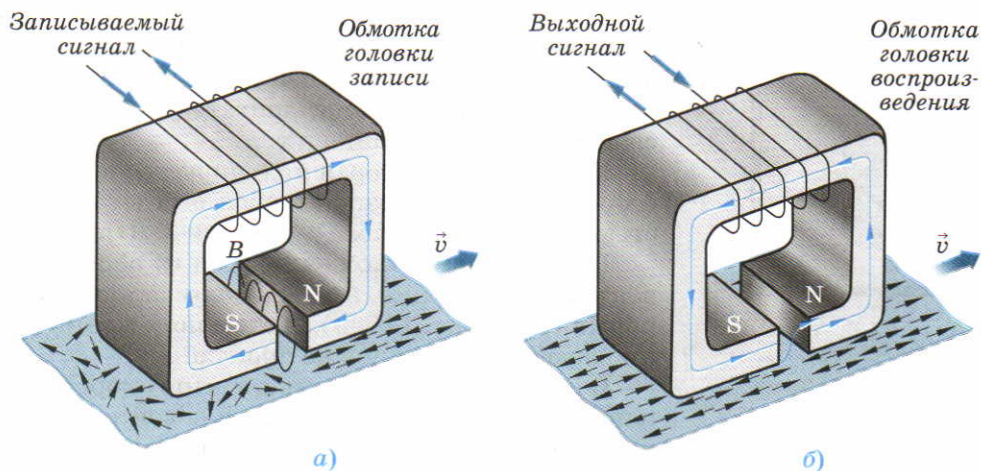
В сверхпроводнике индукционный ток существует достаточно долго, поэтому в результате отталкивания токов в сверхпроводнике и в постоянном магните высокотемпературный проводник зависает над магнитом (рис. II на цветной вклейке, с. 256).

Индукционные токи, возникающие в проводниках (токи Фуко), используются для их нагревания. 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. 116, а). Магнитное поле, возникающее в зазоре, ориентирует беспорядочно расположенные домены на движущейся магнитной ленте. При воспроизведении записи остаточная индукция доменов, движущихся вместе с лентой, создаёт магнитное поле в зазоре головки воспроизведения (рис. 116, б).

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





▲ 116

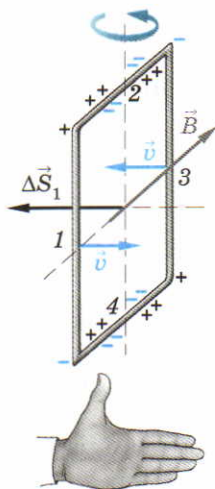
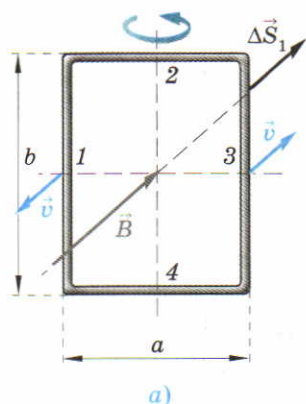
Запись и воспроизведение информации с помощью магнитной ленты:  
 а) головка записи; б) головка воспроизведения

ВОПРОСЫ

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?

**§ 35. 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 дви-



б)

## ▲ 117

Разделение зарядов в рамке, вращающейся в магнитном поле:

- а)  $\alpha = 0$ ;  
б)  $\alpha = 90^\circ$

жения, 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  $\omega$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  (рис. 117).

В начальном положении угол  $\alpha$ , образуемый вектором индукции  $\vec{B}$  с вектором площади  $\Delta\vec{S}$ , равен нулю (рис. 117, а). В этом положении рамки разделения зарядов не происходит.

В правой половине рамки вектор скорости сонаправлен вектору индукции, в левой — 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. 117, б). 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

$$\mathcal{E}_i = 2\mathcal{E}_{i1} = \omega B \Delta S, \quad (88)$$

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:

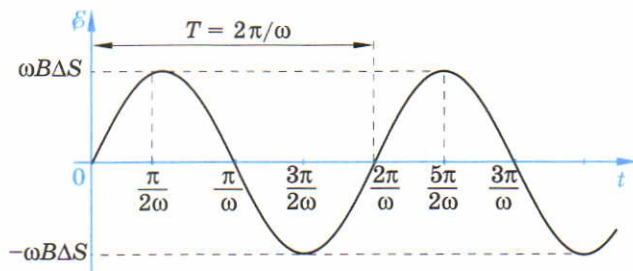
$$\Phi = B \Delta S \cos \omega t. \quad (89)$$

Тогда

$$\mathcal{E}_i = -\Phi' = \mathcal{E}_{i\max} \sin \omega t, \quad (90)$$

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





## 118 ▶

ЭДС индукции в рамке как функция времени

Гармоническая зависимость  $\mathcal{E}_i(t)$  приведена на рисунке 118.

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. 257). 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 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 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?

### ЗАДАЧИ

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  $B = 0,5$  Тл, направленной перпендикулярно оси вращения. Найдите максимальную ЭДС, индуцируемую в рамке, и зависимость ЭДС от времени. **[0,63 В]**
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>. **[50 Гц]**
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. **[220 В]**
4. При полёте вертолета плоскость вращения его винта составляет с горизонтом угол  $\alpha = 30^\circ$ . Винт радиусом  $R = 5$  м вращается с частотой  $\nu = 10$  Гц. Найдите разность потенциалов между центром и краем винта. Вертикальная составляющая магнитного поля Земли  $B = 5 \cdot 10^{-4}$  Тл.  **$[\pi B \nu R^2 \sin \alpha = 0,2 \text{ В}]$**
5. Проводящая катушка с площадью поперечного сечения  $S = 100$  см<sup>2</sup> состоит из  $N = 200$  витков и равномерно вращается с периодом  $T = 20$  мс в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,2$  Тл вокруг оси, перпендикулярной вектору магнитной индукции. Концы катушки замкнуты на резистор сопротивлением  $R = 100$  Ом. Найдите, как изменяется сила тока через резистор со временем, определите частоту изменения силы тока и максимальное значение силы тока.

$$\left[ I_{\max} = \frac{2\pi NBS}{TR} = 1,26 \text{ А} \right]$$

## § 36. 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. При большой длине линии электропередачи её электрическое сопротивление становится значительным. Это приводит к существенным потерям передаваемой



мощности в подводящих проводах, пропорциональной сопротивлению линии  $r$ . Согласно формуле (46) потери мощности в подводящих проводах составляют

$$P_{\text{п}} = \frac{P^2}{U^2} r,$$

где  $P$  — мощность источника тока (генератора),  $U$  — передаваемое напряжение.

Оценим мощность, теряемую в подводящих проводах.

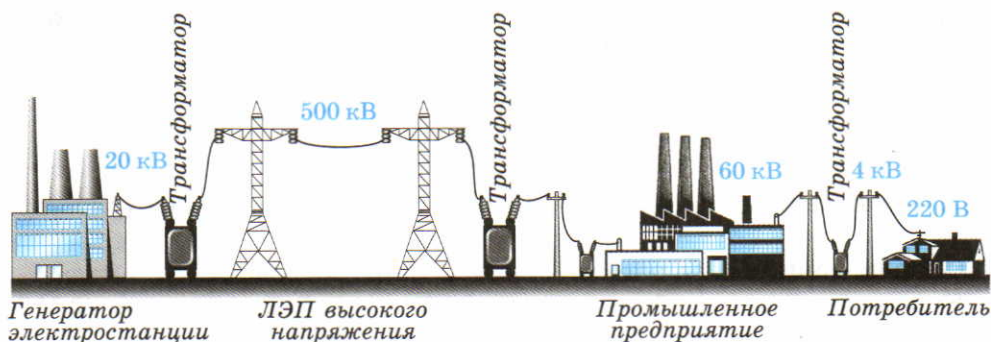
Крупный город потребляет электрическую мощность порядка 20 МВт. Из-за потерь мощности электростанция должна вырабатывать существенно большую мощность. Сопротивление 1 км двухпроводной линии из медного провода диаметром 1 см равно:  $r_1 = \rho \frac{l}{S} = 1$  Ом. Тогда при передаче электроэнергии при напряжении 200 В потери мощности на 1 км подводящих проводов составляют:

$$P_{\text{п}} = \frac{(20 \cdot 10^6)^2}{200^2} \cdot 1 = 10^{10} \text{ Вт/км} = 10^7 \text{ кВт/км}.$$

При передаче на расстояние 100 км потери мощности составят  $10^9$  кВт. Значительно уменьшить сопротивление линии практически невозможно. Поэтому уменьшение потерь мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) достигается за счёт повышения передаваемого напряжения. Потери мощности обратно пропорциональны квадрату передаваемого напряжения. Например, электроэнергия от Самарской ГЭС в Москву передаётся при напряжении 400 кВ. При таком напряжении потери энергии и их стоимость уменьшаются по сравнению с предыдущим вариантом в  $\left(\frac{400 \cdot 10^3}{200}\right)^2 = 4$  млн раз.

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



### ▲ 119

*Принципиальная схема передачи электроэнергии на расстояние и её распределения*

(рис. 119). 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.

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 (напряжение, используемое большинством индивидуальных потребителей).

В России и странах ЕС (Европейского сообщества) используется переменное напряжение с частотой 50 Гц. Такой эталон частоты выбран с учётом инерционности человеческого зрения, позволяющего различать сигналы длительностью не менее 0,05 с. Частота 50 Гц достаточна для того, чтобы человеческий глаз не замечал изменения интенсивности излучения ламп накаливания.



## ВОПРОСЫ

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?

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- 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:

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

- **Правило Ленца:** индукционный ток в контуре имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, препятствует

его 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:

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

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

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

### § 37. Векторные диаграммы для описания переменных токов и напряжений

**Представление гармонического колебания на векторной диаграмме.** Переменное напряжение, получаемое потребителем от электростанции через ЛЭП, изменяется с течением времени по гармоническому закону.

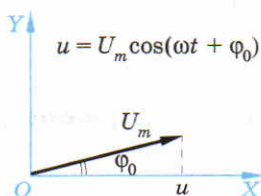
Мгновенное значение напряжения — напряжение в данный момент времени  $t$  можно представить в виде:

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (91)$$

где  $U_m$  — амплитуда (максимальное значение) напряжения,  $\omega$  — круговая частота колебаний, равная угловой скорости вращения ротора генератора электростанции.

Аргумент косинуса  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  определяет *фазу колебаний* в момент времени  $t$ .

**Фаза колебаний — аргумент функции, описывающей гармонические колебания.**



▲ 120

Представление гармонического колебания в виде вектора

При заданной амплитуде фаза определяет мгновенное значение колеблющейся величины. Начальная фаза колебаний  $\varphi_0$  — фаза колебаний в начальный момент времени, т. е. при  $t = 0$ .

Для наглядного описания гармонических колебаний используется метод векторных диаграмм. В методе векторных диаграмм гармоническое колебание представляют в виде вектора. Модуль этого вектора равен амплитуде колебаний, а угол, образуемый вектором с осью X, равен начальной фазе колебаний (рис. 120). Воз-



возможность такого представления гармонического колебания следует из взаимосвязи гармонического колебательного движения с вращением по окружности (см. Ф-10, § 18).

Рассмотрим подробнее эту взаимосвязь, чтобы обосновать метод векторных диаграмм. Предположим, что вектор с модулем  $I_m$  в начальный момент ( $t = 0$ ) направлен по оси  $X$ . Если определить начальную фазу  $\varphi_0$  как угол, образуемый вектором с осью  $X$  в начальный момент времени, то  $\varphi_0 = 0$ . Пусть этот вектор вращается в плоскости  $XY$  с угловой скоростью  $\omega$  против часовой стрелки (рис. 121, а). Через время  $t$  вектор поворачивается на угол  $\omega t$ .

Проекция вектора  $I_m$  на ось  $X$  изменяется по косинусоидальному закону  $I_m \cos \omega t$ . Поэтому косинусоидальное колебание удобно представить в виде вектора длиной  $I_m$ , направленного по оси  $X$ , т. е. имеющего начальную фазу, равную нулю. Любое синусоидальное колебание можно рассматривать как косинусоидальное с определённой начальной фазой. Так как

$$I_m \sin \omega t = I_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (92)$$

то синусоидальное колебание можно представить в виде вектора длиной  $I_m$ , направленного противоположно оси  $Y$ . Этот вектор имеет начальную фазу  $(-\pi/2)$  (рис. 121, б).

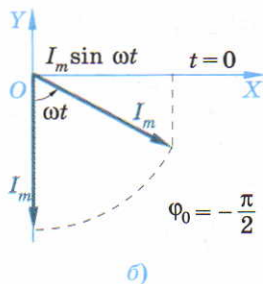
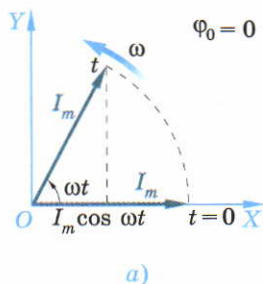
Рассмотрим теперь вращение вокруг начала координат вектора с модулем  $U_m$ , имеющего начальную фазу  $\varphi_0$  (рис. 122, а). При угловой скорости вращения  $\omega$  его проекция на ось  $X$  изменяется по закону  $U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ .

Косинусоидальное колебание  $U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$  представляется в виде вектора длиной  $U_m$ , составляющего с осью  $X$  угол  $\varphi_0$  (рис. 122, б). Синусоидальное колебание можно выразить как косинусоидальное:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi_0) = U_m \cos \left( \omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2} \right), \quad (93)$$

и поэтому представить вектором длиной  $U_m$ , составляющим с осью  $X$  угол  $\varphi_0 - \pi/2$ . Этот угол играет роль начальной фазы для этого вектора.

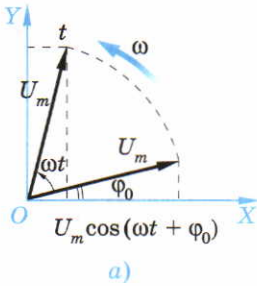
При наличии двух гармонических колебаний



## ▲ 121

*Векторная диаграмма для:*

- а) косинусоидальных колебаний;*
- б) синусоидальных колебаний*



а)

$$\begin{cases} u_1 = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1), \\ u_2 = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (94)$$

их разностью фаз  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  на векторной диаграмме является угол между ними (рис. 123). Говорят, что *второе колебание опережает первое по фазе на  $\Delta\varphi$*  или что *первое колебание отстает по фазе от второго на  $\Delta\varphi$* . Такая терминология связана с тем, что векторы вращаются против часовой стрелки.

**Сложение двух колебаний.** Сложение колебаний на векторной диаграмме происходит по правилу сложения векторов, т. е. по правилу параллелограмма или треугольника.

Рассмотрим сложение двух колебаний с одинаковой амплитудой  $U_m$ :

$$\begin{cases} u_1 = U_m \cos \omega t, \\ u_2 = U_m \sin \omega t. \end{cases} \quad (95)$$

Найдём сначала результат сложения этих колебаний аналитически:

$$\begin{aligned} u_1 + u_2 &= U_m \left( \cos \omega t + \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right) = \\ &= 2U_m \cos \frac{\pi}{4} \cdot \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right). \end{aligned}$$

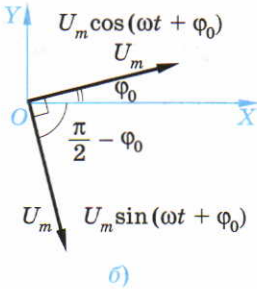
Следовательно,

$$u_1 + u_2 = U_m \sqrt{2} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right). \quad (96)$$

Тот же результат легко получается с помощью векторной диаграммы (рис. 124). Косинусoidalному колебанию соответствует вектор с модулем  $U_m$ , направленный по оси  $X$ , так как  $\varphi_0 = 0$ . Второе колебание можно тоже записать через косинус с начальной фазой  $(-\pi/2)$ :

$$u_2 = U_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Этому колебанию соответствует вектор с модулем  $U_m$ , направленный противоположно оси  $Y$ , так как  $\varphi_0 = \pi/2$ .

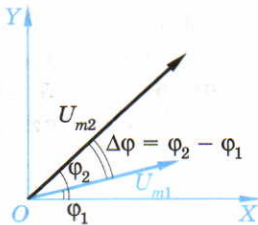


б)

## ▲ 122

Колебания с начальной фазой на векторной диаграмме:

- а) косинусоидальные;  
б) синусоидальные



## ▲ 123

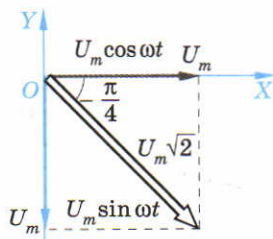
Разность фаз двух гармонических колебаний



Сложение векторов даёт вектор с модулем  $U_m\sqrt{2}$  и начальной фазой  $(-\pi/4)$ . Такое колебание описывается зависимостью (97).

### ВОПРОСЫ

1. Дайте определение мгновенного значения напряжения, фазы колебаний и начальной фазы колебаний.
2. Как гармоническое колебание представляют на векторной диаграмме?
3. Как изображаются на векторной диаграмме косинусоидальное и синусоидальное колебания?
4. Как изображаются на векторной диаграмме два синхронных колебания?
5. Как происходит сложение колебаний на векторной диаграмме?



### 124

Сложение колебаний на векторной диаграмме

### ЗАДАЧИ

1. Напряжение меняется с течением времени по закону  $u = 10\cos(2\pi/T)(t + T/6)$  В. Найдите амплитуду, круговую частоту, начальную фазу и мгновенное значение напряжения в момент времени  $t = T/4$ . **[10В;  $2\pi/T$ ;  $\pi/3$ ;  $-8,5$ В]**
2. Изобразите на векторной диаграмме гармоническое колебание силы тока  $i = 4\cos(10t + 3\pi/4)$  А.
3. Изобразите на векторной диаграмме гармоническое колебание напряжения  $u = 6\sin(5t - \pi/3)$  В.
4. Какое из двух колебаний  $u_1 = 10\cos(\omega t + \pi/4)$ ,  $u_2 = 10\sin(\omega t + \pi/4)$  отстаёт по фазе? Чему равно это отставание? Покажите его на векторной диаграмме. **[ $\pi/2$ ]**
5. Сложите на векторной диаграмме колебания, описанные в задаче 4. Запишите закон результирующего колебания. **[14,  $14\cos\omega t$ ]**

## § 38. Резистор в цепи переменного тока

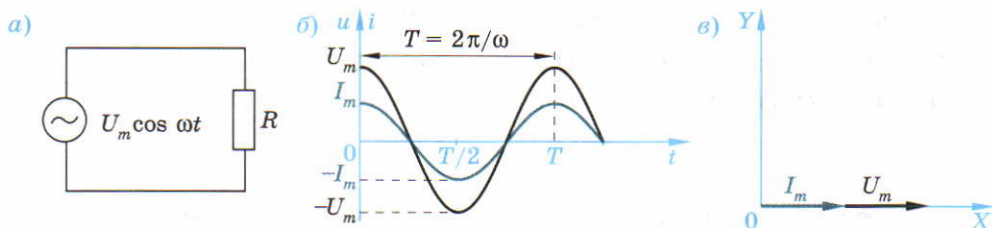
**Сила тока в резисторе.** Предположим, что в качестве нагрузки генератора переменного тока используется резистор с сопротивлением  $R$  (рис. 125, а). Напряжение, созданное генератором на концах резистора, изменяется по закону

$$u = U_m \cos \omega t. \quad (97)$$

В соответствии с законом Ома сила тока в резисторе будет

$$i = \frac{U}{R} = I_m \cos \omega t, \quad (98)$$

где  $I_m = U_m/R$  — амплитуда силы тока.



## ▲ 125

Резистор в цепи переменного тока:

а) схема включения; б) изменение со временем напряжения и силы тока; в) векторная диаграмма

Напряжение и сила тока в резисторе синхронно меняются с течением времени по косинусоидальному закону (рис. 125, б).

Напряжение и сила тока в резисторе совпадают по фазе в любой момент времени. На векторной диаграмме (рис. 125, в) векторы  $U_m$  и  $I_m$ , имеющие нулевую начальную фазу, направлены по оси  $X$ .

**Действующее значение силы переменного тока.** При включении в цепь переменного тока амперметра, рассчитанного на измерение постоянного тока, его стрелка будет колебаться с частотой 50 Гц. Однако её колебания, из-за инерции составляющие доли миллиметра, будут незаметны на глаз. Прибор не показывает изменение силы тока в пределах от  $-I_m$  до  $+I_m$ . Напомним, что сила тока 1 А была введена как сила постоянного тока (см. § 25). Возникает вопрос: какой переменный ток эквивалентен по действию постоянному току 1 А?

Среди известных действий электрического тока — химического, магнитного и теплового, только тепловое действие не зависит от изменения направления тока. Тепловая мощность, выделяемая в резисторе, пропорциональна квадрату силы тока (см. (44)):  $P = I^2 R$ .

Сила переменного тока 1 А — сила тока, выделяющего в проводнике такое же количество теплоты, что и постоянный ток 1 А за тот же промежуток времени.

Амперметр переменного тока измеряет действующее значение силы тока.

**Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при котором в проводнике выделяется такое же количество теплоты, что и при переменном токе за тот же промежуток времени.**



Если переменный ток изменяется по гармоническому закону, в качестве промежутка времени выбирается период изменения тока. Чтобы найти действующее значение силы тока, протекающего через резистор, воспользуемся выражением для мгновенной мощности тока, выделяемой в резисторе:

$$P_{\text{мг}} = i^2 R = I_m^2 R \cos^2 \omega t.$$

Учитывая, что  $\cos^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t)$ , получаем:

$$P_{\text{мг}} = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t. \quad (99)$$

Графиком зависимости мгновенной мощности тока от времени является косинусоида с амплитудой  $I_m^2 R/2$ , периодом  $T/2 = \pi/\omega$ . Косинусоида сдвинута вверх по вертикальной оси на  $I_m^2 R/2$  (рис. 126).

Равенство количества теплоты, выделяемого за период переменным и постоянным током, означает равенство средних тепловых мощностей этих токов. Из рисунка 126 видно, что средняя мощность  $\bar{P}_{\text{мг}}$ , выделяемая за период переменным гармоническим током, равна

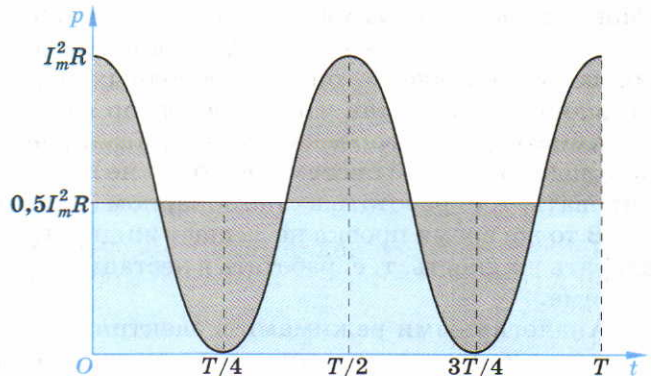
$$\bar{P}_{\text{мг}} = \frac{I_m^2 R}{2}.$$

Такая же мощность  $P_{\text{п}} = \bar{P}_{\text{мг}}$  выделяется в резисторе при протекании постоянного тока  $I_{\text{д}}$ :

$$P_{\text{п}} = I_{\text{д}}^2 R.$$

Действующее значение силы переменного тока получается, если приравнять эти мощности:

$$I_{\text{д}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (100)$$



## 126

Мгновенная тепловая мощность, выделяемая в резисторе за период изменения силы тока

Действующее (эффективное) значение силы переменного гармонического тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитуды. Аналогично определяется действующее (эффективное) значение переменного гармонического напряжения:

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (101)$$

В цепях переменного тока резистор часто называют *активным сопротивлением*.

**Активное сопротивление** — сопротивление элемента электрической цепи, в котором электрическая энергия необратимо преобразуется во внутреннюю.

Активным сопротивлением обладают электролампы, электродвигатели, трансформаторы и т. д.

#### ВОПРОСЫ

1. Как связаны между собой напряжение и сила тока в резисторе?
2. Что означает выражение: «Сила переменного тока в 1 А»? Почему сравнивают именно тепловое действие переменного и постоянного токов?
3. Дайте определение действующего значения переменного тока.
4. Как связано действующее значение силы тока (или напряжения) с его амплитудным значением?
5. Какое сопротивление в цепи переменного тока называют активным?

## § 39. Конденсатор в цепи переменного тока

**Разрядка конденсатора.** В цепи, содержащей конденсатор, постоянный ток протекать не может, так как цепь оказывается разомкнутой. Между обкладками конденсатора нет свободных носителей зарядов ни в воздухе, ни в диэлектрике, так что конденсатор является разрывом цепи для постоянного тока. Зазор между обкладками конденсатора аналогичен пробке в водопроводной системе, которая не позволяет воде постоянно циркулировать, т. е. работать в стационарном (не зависящем от времени) режиме. В то же время пробка не мешает жидкости заполнять систему, а также сливать жидкость, т. е. работать в нестационарном (зависящем от времени) режиме.

Аналогичными режимами в электрической цепи является зарядка и разрядка конденсатора, при которых заряженные частицы перемещают-



ся по проводникам, соединяющим обкладки конденсатора, но не перемещаются в зазоре между ними. Если заряженный до напряжения  $U_0$  конденсатор отключить от источника постоянного тока и соединить его обкладки с клеммами лампы накаливания, наблюдается кратковременная вспышка лампы (рис. 127, а). Ток  $I_p$ , протекающий через лампу от положительной обкладки к отрицательной, приводит к разрядке конденсатора. Попадающие на отрицательную пластину положительные заряды быстро нейтрализуют её.

**Время релаксации  $R$ — $C$ -цепи.** Оценим время разрядки конденсатора ёмкостью  $C$ , заряженного до напряжения  $U_0$ , через сопротивление  $R$ . В отсутствие внешней ЭДС суммарная разность потенциалов в контуре на сопротивлении и конденсаторе равна нулю:

$$U_R + U_C = 0,$$

или

$$IR + U_C = 0.$$

Так как

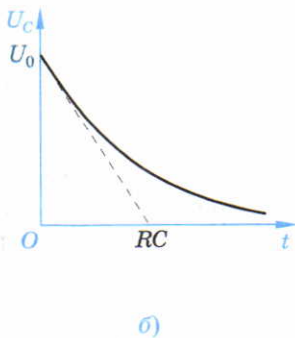
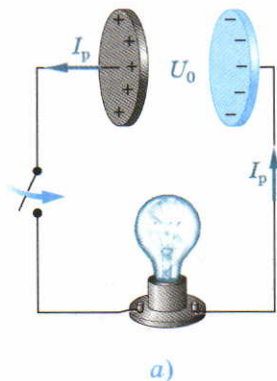
$$I = q' = CU'_C,$$

то изменение напряжения на конденсаторе в единицу времени равно:

$$U'_C = \frac{(-U_C)}{RC} = \frac{(-U_0)}{\tau_C}. \quad (102)$$

Величина  $(-U_0)$  в числителе формулы (102) характеризует полное изменение напряжения на конденсаторе при его разрядке. Следовательно, величина  $\tau_C = RC$  в знаменателе формулы (102) определяет по порядку величины время разрядки конденсатора, или *время релаксации  $R$ — $C$ -цепи*.

Геометрически производная  $U'_C$  в формуле (102) характеризуется тангенсом угла наклона касательной к кривой  $U_C(t)$ . При  $t = 0$  касательная к



### 127

Разрядка конденсатора:  
а) через лампу;  
б) зависимость напряжения на конденсаторе от времени

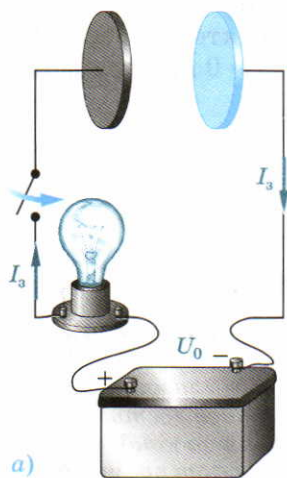
зависимости  $U_C(t)$  (рис. 127, б) пересекает ось  $t$  в точке  $\tau_C = RC$ . Так можно найти графически время релаксации  $R$ — $C$ -цепи.

**Зарядка конденсатора. Ток смещения.** При подключении конденсатора к источнику постоянного напряжения  $U_0$  в цепи возникает кратковременный импульс тока  $I_3$ , который заряжает конденсатор до напряжения источника (рис. 128, а). После зарядки конденсатора ток прекращается. Время релаксации  $\tau_C = RC$  характеризует как время разрядки, так и время зарядки конденсатора (рис. 128, б).

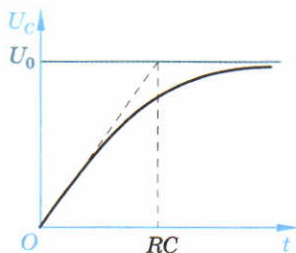
При подключении к конденсатору генератора прямоугольных импульсов длительностью  $T$  с амплитудой напряжения  $U_0$  (рис. 129, а) зависимость от времени напряжения на конденсаторе повторяет кривые зарядки и разрядки при постоянном напряжении (рис. 129, б).

В процессе зарядки ток, протекающий по подводящим проводам, или ток проводимости, создаёт вокруг себя переменное магнитное поле. Линиями индукции этого поля являются концентрические окружности (рис. 130). 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, она должна существовать и внутри него, где ток проводимости отсутствует. Магнитное поле возникает при наличии тока. По определению

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



а)

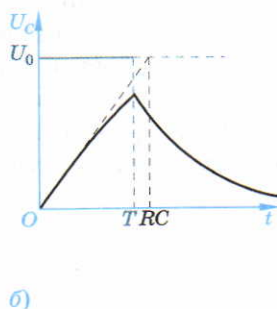
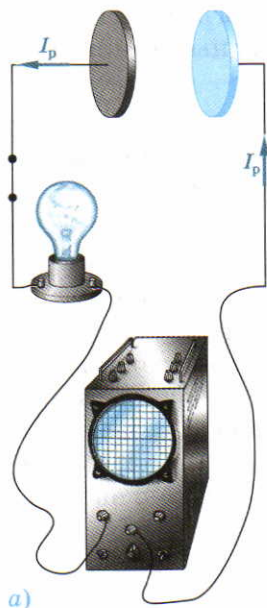


б)

## 128

Зарядка конденсатора от источника постоянного напряжения: а) схема зарядки; б) изменение со временем напряжения на конденсаторе





## 129

Зарядка конденсатора импульсным напряжением:

- а) схема зарядки;  
б) зависимость напряжения на конденсаторе от времени

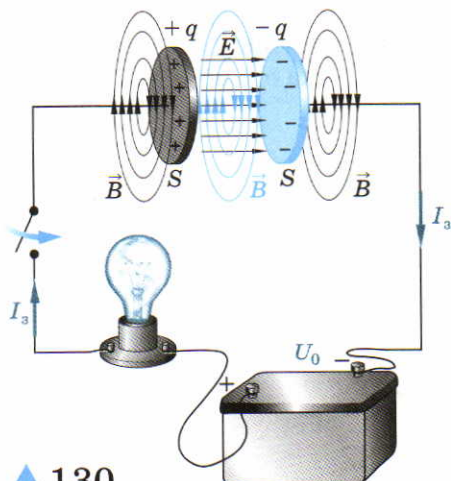
т. е. сила тока равна изменению заряда в единицу времени. При зарядке плоского конденсатора изменение заряда на его пластинах приводит к изменению напряжённости электрического поля внутри конденсатора. Напряжённость электрического поля внутри плоского конденсатора (см. Ф-10, § 81) равна:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{S\epsilon_0}.$$

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

$$I_{\text{см}} = S\epsilon_0 \frac{dE}{dt}.$$

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



## 130

Ток смещения при зарядке конденсатора от аккумулятора

*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*.

**Ёмкостное сопротивление.** Предположим, что в качестве нагрузки генератора переменного тока используется конденсатор ёмкостью  $C$  (рис. 131, а). Переменное напряжение на обкладках конденсатора изменяется по закону:

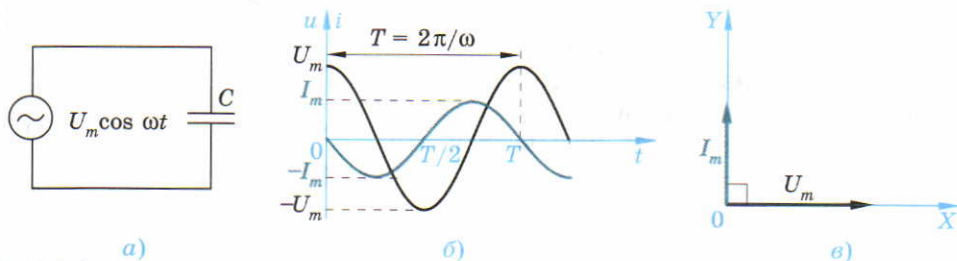
$$u = U_m \cos \omega t.$$

Оно вызывает в конденсаторе переменный ток (ток проводимости в подводящих проводах и равный ему ток смещения между обкладками конденсатора).

Установим связь между амплитудами переменного напряжения и тока в цепи. Электрический ток в цепи возникает в результате изменения заряда конденсатора:  $i = q'$ .

Заряд на его обкладках изменяется по закону:

$$q = Cu = CU_m \cos \omega t. \quad (103)$$



▲ 131

Конденсатор в цепи переменного тока: а) схема включения; б) переменное напряжение и сила тока в цепи конденсатора; в) векторная диаграмма

Следовательно, сила тока

$$i = \frac{dq}{dt} = -I_m \sin \omega t, \quad (104)$$

где  $I_m = \omega C U_m$  — амплитуда силы тока.

Графиком зависимости силы тока от времени является отражённая от оси  $t$  синусоида (рис. 131, б). Для изображения силы тока на векторной диаграмме удобно представить выражение (104) в виде:

$$i = I_m \cos (\omega t + \pi/2). \quad (105)$$

Начальная фаза колебаний напряжения равна нулю, а тока —  $\pi/2$  (рис. 133, в).

*Колебания силы тока в цепи конденсатора опережают по фазе колебания напряжения на его обкладках на  $\pi/2$ .*

Мгновенная мощность переменного тока на конденсаторе определяется выражением

$$p = iu = -0,5I_m U_m \sin 2\omega t. \quad (106)$$

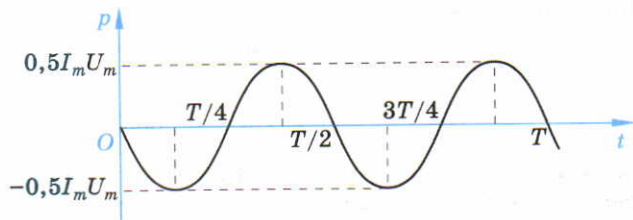
Из графика зависимости мгновенной мощности на конденсаторе от времени (рис. 132) следует, что *среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период  $T$  равно нулю*. Принято говорить, что элементы цепи, для которых средняя мощность переменного тока равна нулю, обладают *реактивным сопротивлением*. Для этих элементов разность фаз колебаний силы тока и напряжения составляет  $\pi/2$ . Реактивное сопротивление конденсатора называется *ёмкостным сопротивлением*. Найдём сопротивление конденсатора переменному току, или ёмкостное сопротивление, с помощью закона Ома как отношение амплитуды переменного напряжения к амплитуде силы тока:

$$x_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C}. \quad (107)$$

Ёмкостное сопротивление обратно пропорционально частоте переменного тока. Конденсатор оказывает значительное сопротивление току ма-

### 132

Зависимость мгновенной мощности на конденсаторе от времени





лой частоты. Постоянный ток можно рассматривать как предельный случай переменного тока, у которого частота  $\omega \rightarrow 0$ . В этом случае  $x_C \rightarrow \infty$  и ток через конденсатор не протекает. Для токов высоких частот ёмкостное сопротивление мало.

### ВОПРОСЫ

1. Почему постоянный ток не может протекать через конденсатор?
2. Что характеризует время релаксации  $R$ – $C$ -цепи? Чему оно равно?
3. Как, зная зависимость напряжения на конденсаторе от времени при разрядке через сопротивление  $R$ , можно графически найти время релаксации?
4. Какое физическое явление называют магнитоэлектрической индукцией?
5. Как соотносятся фазы силы тока, протекающего через конденсатор, и напряжения на его обкладках? Чему равно ёмкостное сопротивление конденсатора?

### ЗАДАЧИ

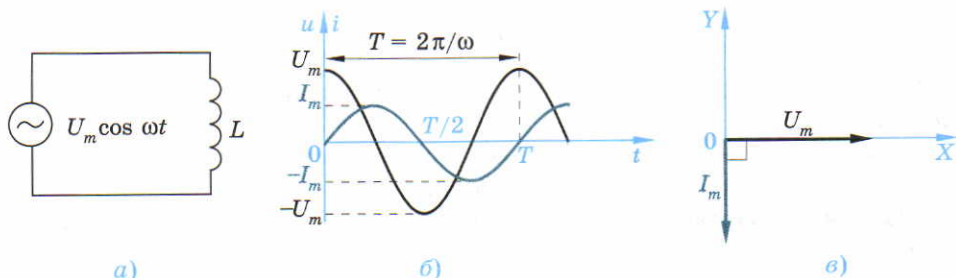
1. Заряд на обкладках плоского конденсатора с течением времени изменяется по закону  $q = \alpha t - \beta t^2$ , где  $\alpha = 10$  мкКл/с,  $\beta = 0,25$  мкКл/с<sup>2</sup>. Найдите силу тока смещения в момент времени  $t = 2$  с. **[9 мкА]**
2. Напряжение на конденсаторе электроёмкостью  $C = 0,5$  мкФ изменяется по закону  $u = 10 \sin(100\pi t)$  В. Найдите, как изменяется со временем сила тока через конденсатор. **[ $i = 1,57 \cos(100\pi t)$  мА]**
3. По данным задачи 2 постройте график зависимости мгновенной мощности переменного тока на конденсаторе от времени.
4. При какой частоте переменного тока ёмкостное сопротивление конденсатора электроёмкостью 1 мкФ равно 3,2 кОм? **[50 Гц]**
5. Постройте график зависимости ёмкостного сопротивления конденсатора от частоты. Как изменится ёмкостное сопротивление при увеличении частоты в 2,5 раза?

## § 40. Катушка индуктивности в цепи переменного тока

**Индуктивное сопротивление.** Предположим, что в качестве нагрузки генератора переменного тока включена катушка индуктивностью  $L$  (рис. 133, а). Переменное напряжение, созданное генератором на катушке, изменяется по закону:

$$u = U_m \cos \omega t.$$

Найдём закон изменения силы тока в катушке. При изменении силы тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции:



### ▲ 133

Катушка индуктивности в цепи переменного тока: а) схема включения; б) переменное напряжение и сила тока в катушке индуктивности; в) векторная диаграмма

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{di}{dt}.$$

В любой момент времени ЭДС самоиндукции равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки, созданному внешним генератором:

$$L \frac{di}{dt} = U_m \cos \omega t. \quad (108)$$

Будем искать решение уравнения (108) в виде:

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (109)$$

Подстановка решения (109) в уравнение (108) даёт:

$$\omega L I_m \cos \omega t = U_m \cos \omega t.$$

Следовательно, амплитуда силы тока  $I_m$  в катушке связана с амплитудой переменного напряжения  $U_m$  законом Ома:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}, \quad (110)$$

где  $X_L = \omega L$  — индуктивное сопротивление катушки.

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте переменного тока. При увеличении частоты тока вихревое электрическое поле заметно препятствует тем изменениям тока, которые его вызвали.

**Разность фаз между силой тока в катушке и напряжением на ней.** Графиком зависимости (109) силы тока от времени является синусоида (рис. 133, б). Для изображения силы тока на векторной диаграмме удобно представить выражение (109) в виде:

$$i = I_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (111)$$

Начальная фаза колебаний напряжения равна нулю, а тока —  $-\pi/2$  (рис. 133, в).

*Колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на  $\pi/2$  от колебаний напряжения на ней.*

Мгновенная мощность переменного тока в катушке определяется выражением

$$p = iu = 0,5I_m U_m \sin 2\omega t. \quad (112)$$

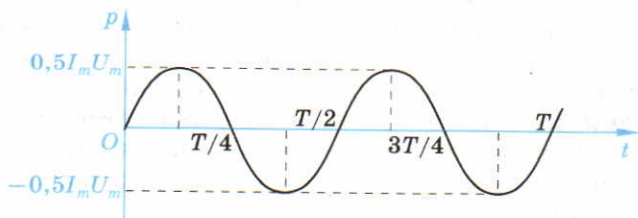
Из графика зависимости мгновенной мощности в катушке от времени (рис. 134) следует, что *среднее значение мощности переменного тока в катушке индуктивности за период  $T$  равно нулю*. Индуктивное сопротивление является реактивным сопротивлением.

### ВОПРОСЫ

1. Почему при изменении силы тока в катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции?
2. Чему равно индуктивное сопротивление катушки?
3. Как соотносятся фазы силы тока, протекающего через катушку индуктивности, и напряжения на ней?
4. Чему равно среднее значение мощности переменного тока в катушке за период?
5. Почему индуктивное сопротивление катушки называют реактивным сопротивлением?

### ЗАДАЧИ

1. Рассчитайте величину индуктивного сопротивления катушки индуктивностью  $L = 20$  мГн на частоте 50 Гц. **[6,28 Ом]**
2. Постройте график зависимости индуктивного сопротивления катушки от частоты переменного тока. Как изменится индуктивное сопротивление при увеличении частоты в 3 раза?
3. Катушка индуктивностью  $L = 10$  мГн обладает активным сопротивлением 10 Ом. При каком значении частоты переменного тока индуктивное сопротивление катушки будет в 10 раз больше её активного сопротивления? **[1590 Гц]**



◀ 134

*Зависимость мгновенной мощности в катушке от времени*



4. Катушка индуктивностью  $L = 0,35$  Гн включена в сеть с действующим значением напряжения  $U_d = 220$  В и частотой  $\nu = 50$  Гц. Найдите действующее значение силы тока, протекающего через катушку. Изобразите напряжение и силу тока на векторной диаграмме. [2 А]
5. К катушке приложено напряжение, изменяющееся с течением времени по закону  $u = 311\cos(100\pi t)$ . Найдите индуктивность катушки, если действующее значение силы тока, протекающего через неё, равно 7 А. [0,1 Гн]

## § 41. Свободные гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре

**Энергообмен между электрическим и магнитным полями.** Колебания силы тока в нагрузке генератора переменного тока являются вынужденными колебаниями, возникающими под действием приложенного переменного напряжения. Такими колебаниями являются, например, колебания силы тока в резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности.

Однако существует также 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 проводов сопротивлением  $R$ .

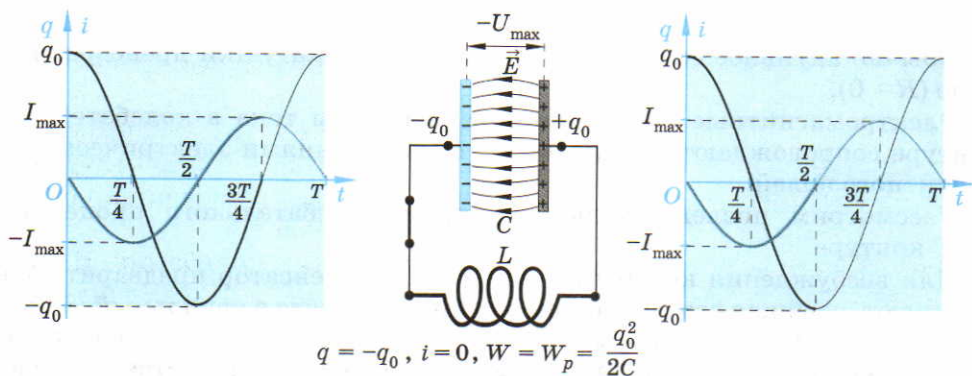
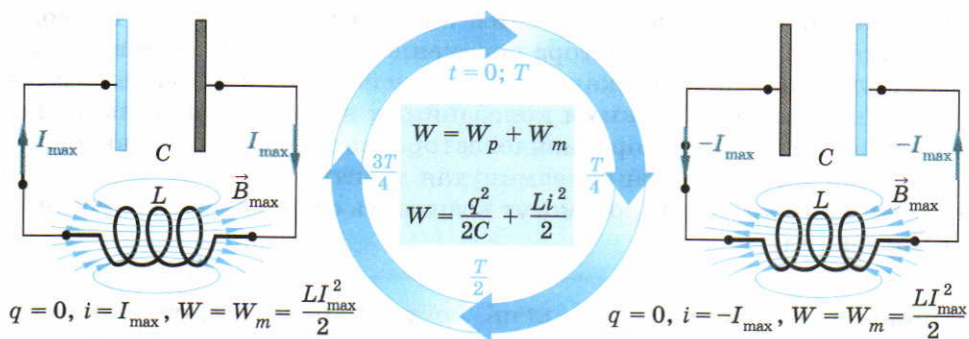
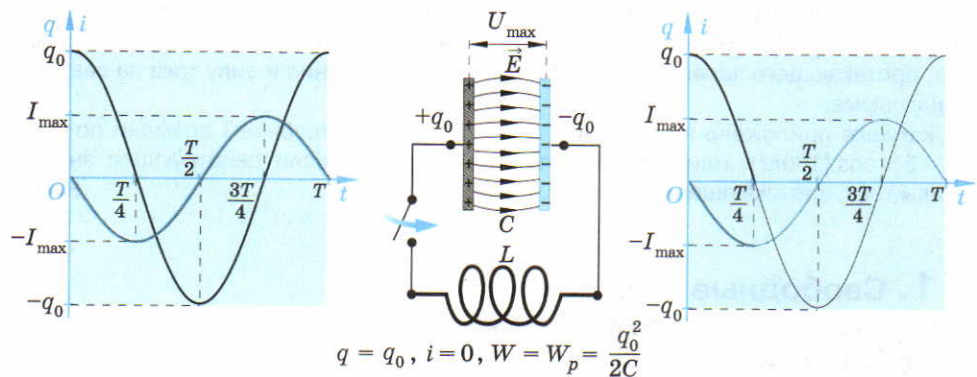
Обычно активное сопротивление проводов и катушки пренебрежимо мало ( $R \approx 0$ ).

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. 135) между обкладками конденсатора возникает электрическое поле. Полная энергия в контуре определяется энергией электрического поля конденсатора:

$$W = W_p = \frac{q_0^2}{2C}.$$



### ▲ 135

*Энергообмен между электрическим и магнитным полями в колебательном контуре*

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:

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (113)$$

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:

$$W = W_m = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (114)$$

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, 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 ( $R = 0$ ) в контуре совершаются гармонические незатухающие колебания заряда на обкладках конденсатора и силы тока в катушке индуктивности.

**Частота и период собственных гармонических колебаний.** Найдём уравнение этих колебаний с помощью закона Ома. ЭДС самоиндукции катушки равна разности потенциалов  $U_C$  на пластинах конденсатора:

$$-Li' = U_C. \quad (115)$$

Учитывая, что  $i = q'$ ,  $U_C = \frac{q}{C}$ , получаем

$$Lq'' = -\frac{1}{C}q. \quad (116)$$



Проверим подстановкой, что решением уравнения (116) является функция

$$q = q_0 \cos \omega_0 t, \quad (117)$$

для которой при  $t = 0$ ,  $q = q_0$ . При вычислении второй производной от  $q$  по времени отметим, что её первая производная равна силе тока:

$$i = q' = -q_0 \omega_0 \sin \omega_0 t = -I_m \sin \omega_0 t; \quad I_m = q_0 \omega_0, \quad (118)$$

$$q'' = -q_0 \omega_0^2 \cos \omega_0 t. \quad (119)$$

Подставим выражения для  $q$  из (117) и  $q''$  из (119) в уравнение (118):

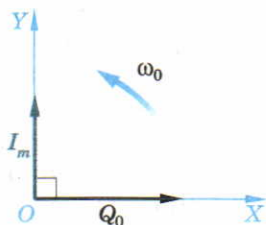
$$-Lq_0 \omega_0^2 \cos \omega_0 t = -\frac{q_0}{C} \cos \omega_0 t.$$

Переносим  $-\frac{q_0}{C} \cos \omega_0 t$  в левую часть уравнения с противоположным знаком и вынося  $q_0 \cos \omega_0 t$  за скобки, получаем выражение для *круговой частоты собственных колебаний в контуре*:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (120)$$

Период собственных колебаний заряда на конденсаторе и силу тока в катушке индуктивности позволяет определить следующая формула, впервые полученная в 1853 г. английским учёным *Уильямом Томсоном*:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{LC}. \quad (121)$$



### ▲ 136

*Сила тока и заряд в колебательном контуре*

На векторной диаграмме видно, что колебания силы тока, изменяющейся по закону  $i = I_m \cos(\omega_0 t + \pi/2)$  (сравните с формулой (118)), опережают колебания заряда на  $\pi/2$  (рис. 136).

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, происходящими по законам (117), (118).

### ВОПРОСЫ

1. Какую электрическую цепь называют колебательным контуром?
2. Почему сохраняется полная энергия электромагнитного поля в колебательном контуре?

3. Объясните, почему в контуре возникают гармонические незатухающие колебания заряда и силы тока.
4. По какому закону изменяют со временем заряд на конденсаторе и силу тока в катушке индуктивности?
5. Как зависит период собственных колебаний в колебательном контуре от величины электроёмкости конденсатора и индуктивности катушки?

### ЗАДАЧИ

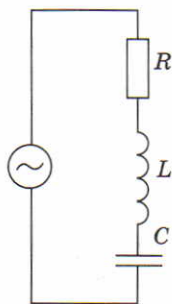
1. Конденсатор электроёмкостью 1 мкФ, заряженный до напряжения 225 В, подключили к катушке с индуктивностью 10 мГн. Найдите максимальную силу тока в контуре. [2,25 А]
2. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью  $L = 4$  мГн и плоского воздушного конденсатора. Площадь пластин конденсатора  $S = 10$  см<sup>2</sup>, расстояние между ними  $d = 1$  мм. Найдите период собственных колебаний в контуре. [1,18 мкс]
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. [800—530 кГц]
4. Колебательный контур состоит из двух одинаковых конденсаторов, включённых последовательно, и катушки индуктивности. Период собственных колебаний контура  $T = 50$  мкс. Чему равен период колебаний контура, если конденсаторы включить параллельно? [100 мкс]
5. Напряжение на конденсаторе ёмкостью  $C = 1$  мкФ, включённом в колебательный контур, изменяется по закону  $u_C = 200 \cos(10^3 t)$ . Найдите индуктивность контура и максимальную силу тока в нём. [1 Гн; 0,2 А]

## § 42. Колебательный контур в цепи переменного тока

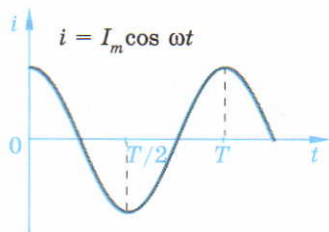
**Вынужденные электромагнитные колебания в колебательном контуре.** Для получения электромагнитных колебаний в реальном колебательном контуре (в котором нельзя пренебречь джоулевыми потерями энергии,  $R \neq 0$ ) надо компенсировать потери энергии на нагревание проводников. Такая компенсация возможна при подключении контура в цепь генератора переменного тока, осуществляющего постоянную «подпитку» контура энергией (рис. 137, а). Предположим, что сила переменного тока частотой  $\nu$ , протекающего через  $L$ — $C$ — $R$ -контур, изменяется по гармоническому закону (рис. 137, б):

$$i = I_m \cos \omega t. \quad (122)$$

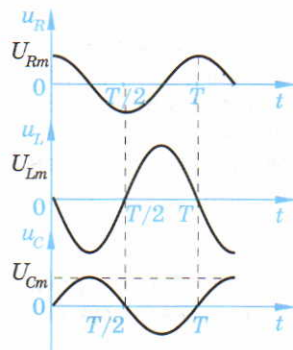
Найдём полное сопротивление колебательного контура. Согласно закону Ома это сопротивление определяется отношением амплитуды при-



а)



б)



в)

## ▲ 137

Колебательный контур в цепи переменного тока:  
 а) схема включения; б) график изменения силы тока;  
 в) графики напряжений на элементах цепи

ложенного к контуру напряжения к амплитуде силы тока, протекающего в нём:

$$Z = \frac{U_m}{I_m}. \quad (123)$$

В любой момент времени мгновенное значение приложенного напряжения равно сумме мгновенных значений напряжений на последовательно включённых элементах цепи: резисторе  $u_R$ , катушке индуктивности  $u_L$  и конденсаторе  $u_C$ :

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (124)$$

Напряжение на резисторе совпадает по фазе с силой тока (см. § 39):

$$u_R = U_{Rm} \cos \omega t, \quad (125)$$

$$U_{Rm} = I_m R.$$

Колебания напряжения на катушке индуктивности опережают по фазе колебания силы тока в ней на  $\pi/2$  (см. § 41):

$$u_L = U_{Lm} \cos(\omega t + \pi/2), \quad (126)$$

$$U_{Lm} = I_m X_L = I_m \omega L.$$

Колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на  $\pi/2$  (см. § 40):

$$u_C = U_{Cm} \cos(\omega t - \pi/2), \quad (127)$$



$$U_{Cm} = I_m X_C = I_m \frac{1}{\omega C}.$$

Зависимости мгновенных напряжений на элементах контура от времени приведены на рисунке 137, в. Амплитуду напряжения, приложенного к контуру, особенно легко получить с помощью векторной диаграммы в результате сложения векторов  $\vec{U}_{Rm}$ ,  $\vec{U}_{Lm}$  и  $\vec{U}_{Cm}$  (рис. 138).

Изобразим на диаграмме векторы, соответствующие колебаниям силы тока  $I_m$  и напряжений  $U_{Rm}$ ,  $U_{Lm}$  и  $U_{Cm}$  (рис. 138, а). Сложение противоположно направленных векторов  $\vec{U}_{Lm}$  и  $\vec{U}_{Cm}$  даёт вектор  $\vec{U}_{Lm} - \vec{U}_{Cm}$ , направленный в сторону большего по модулю вектора  $U_{Lm}$ . Амплитуда напряжения  $U_m$ , приложенного к колебательному контуру, находится из теоремы Пифагора (рис. 138, б):

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}. \quad (128)$$

Подставляя в выражение (130) значения амплитуд  $U_{Rm}$ ,  $U_{Lm}$ ,  $U_{Cm}$ , получаем:

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (129)$$

Мгновенное значение напряжения, приложенного к контуру, изменяется по гармоническому закону:

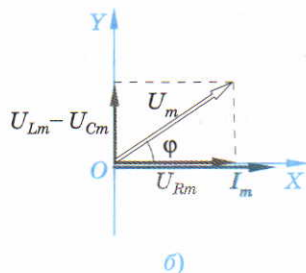
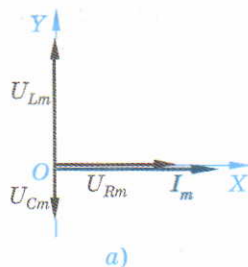
$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $\varphi$  — сдвиг по фазе между напряжением и силой тока:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}. \quad (130)$$

Полное сопротивление колебательного контура зависит от частоты тока:

$$Z = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (131)$$



### ▲ 138

*Векторная диаграмма для колебательного контура:*

*а) напряжение на элементах;*

*б) напряжение, приложенное к контуру*

**Резонанс в колебательном контуре.** Если амплитуда переменного напряжения, приложенного к колебательному контуру, постоянна, то амплитуда вынужденных колебаний силы тока в контуре зависит от частоты:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (132)$$

Амплитуда силы тока будет максимальной при минимальном полном сопротивлении (знаменатель формулы (132)). Сопротивление  $R$  не зависит от частоты, а минимальное значение квадрата разности  $\omega L$  и  $1/(\omega C)$  равно нулю. Поэтому максимальная амплитуда силы тока возникает, если:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Это равенство справедливо, если частота вынужденных колебаний

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0. \quad (133)$$

Полученная резонансная частота совпадает с частотой собственных колебаний в контуре.

**Резонанс в колебательном контуре — физическое явление резкого возрастания амплитуды колебаний тока в контуре при совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний в контуре.**

*Резонансная кривая — график зависимости амплитуды вынужденных колебаний силы тока от частоты приложенного к контуру напряжения.*

Для построения резонансной кривой рассмотрим предельные случаи малых ( $\omega \ll \omega_0$ ) частот и больших ( $\omega \gg \omega_0$ ) частот, а также случай резонанса ( $\omega = \omega_0$ ).

1. При малой частоте, когда  $\omega \rightarrow 0$ , наибольшей величиной в знаменателе равенства (132) является  $1/(\omega C)$ . Извлекая квадратный корень из знаменателя, получаем:

$$I_m = \omega C U_m, \text{ т. е. } I_m \sim \omega.$$

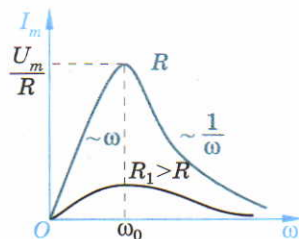
2. При высокой частоте, когда  $\omega \rightarrow \infty$ , доминирующей величиной в знаменателе выражения (132) является  $\omega L$ . После извлечения квадратного корня из знаменателя, находим

$$I_m \approx \frac{U_m}{\omega L}, \text{ т. е. } I_m \sim \frac{1}{\omega}.$$

3. При резонансе  $I_m = U_m/R$ , поэтому график резонансной кривой имеет характерный максимум при  $\omega = \omega_0$  (рис. 139). Чем больше активное сопротивление, тем менее резко выражен резонанс.

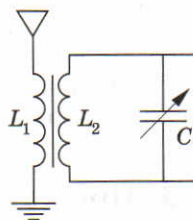
Явление резонанса широко используется в радиотехнике: в схемах настройки радиоприёмников, усилителей, генераторов высокочастотных колебаний. Колебательный контур служит для выделения сигнала требуемой частоты в схеме настройки радиоприёмника на нужную станцию, ведущую передачи на определённой частоте  $\omega$ . Катушка контура является вторичной обмоткой трансформатора, в котором наводится переменное напряжение от катушки антенны, являющейся его первичной обмоткой (рис. 140). Собственная частота колебательного контура изменяется при изменении ёмкости конденсатора ( $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ). При  $\omega_0 = \omega$  принимаемый сигнал создаёт в контуре силу тока, заметно превышающую сигналы других частот.

Дальнейшая обработка принимаемого входного сигнала облегчается, если амплитуда сигнала достаточно велика.



### ▲ 139

*Резонансная кривая для колебательного контура*



### ▲ 140

*Входная цепь простейшего радиоприёмника*

## ВОПРОСЫ

1. Какова зависимость от времени напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе в колебательном контуре, если напряжение на резисторе изменяется с течением времени по закону  $u_R = U_{Rm} \cos \omega t$ ?
2. Изобразите на векторной диаграмме векторы, соответствующие колебаниям силы тока  $I_m$  и напряжений на элементах контура  $L$ ,  $C$ ,  $R$ .
3. Как полное сопротивление колебательного контура переменному току зависит от частоты тока и параметров контура  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ?
4. Охарактеризуйте явление резонанса в колебательном контуре. Как используется явление резонанса в радиотехнике?
5. Нарисуйте резонансную кривую при двух различных значениях активного сопротивления.



### ЗАДАЧИ

1. Колебательный контур включён в сеть переменного напряжения. Действующее значение напряжения на конденсаторе  $U_C = 100$  В, на катушке индуктивности  $U_L = 60$  В, на резисторе  $U_R = 30$  В. Найдите действующее значение напряжения сети. [50 В]
2. Колебательный контур состоит из конденсатора с ёмкостным сопротивлением  $x_C = 2,5$  кОм и катушки индуктивности, индуктивное сопротивление которой  $x_L = 2$  кОм. Найдите полное сопротивление контура. [500 Ом]
3. Колебательный контур, подключённый к генератору, содержит резистор, сопротивление которого  $R = 5$  Ом, катушку индуктивностью  $L = 5$  Гн и конденсатор. Определите ёмкость конденсатора, при которой в контуре при частоте  $1$  кГц возникает резонанс. Найдите показание амперметра (включённого в сеть) при резонансе, если действующее напряжение на генераторе  $220$  В. [5 нФ; 44 А]
4. Электрическая цепь состоит из катушки индуктивностью  $L = 0,2$  Гн, конденсатора ёмкостью  $C = 0,1$  мкФ и резистора сопротивлением  $R = 367$  Ом. Найдите индуктивное сопротивление  $x_L$ , ёмкостное сопротивление  $x_C$  и полное сопротивление контура  $Z$  при частоте тока  $\nu = 1$  кГц. [ $x_L = 1,26$  кОм;  $x_C = 1,6$  кОм;  $Z = 500$  Ом]
5. К генератору переменного тока с частотой  $\nu = 100$  Гц подключены катушка индуктивностью  $L = 0,5$  Гн, конденсатор ёмкостью  $C = 4$  мкФ и резистор сопротивлением  $R = 54$  Ом. Сила тока в цепи  $I = 0,5$  А. Найдите полное сопротивление цепи и максимальное напряжение на генераторе. [100 Ом; 37,8 В]

## § 43. Примесный полупроводник — составная часть элементов схем

**Собственная проводимость полупроводников.** Стремительный прогресс и миниатюризация электроники, повсеместно используемой в компьютерах, радио, телевидении, космической связи, системах автоматики и робототехники, стали возможными благодаря использованию интегральных схем. Эти схемы содержат огромное число элементов: диодов, транзисторов, конденсаторов. В наручных часах около 5000 транзисторов, в карманном калькуляторе около 20 000, а в компьютерном чипе их число может превысить миллион. Составной частью этих миниатюрных элементов схем являются *полупроводники*.

Как известно (см. § 6), к полупроводникам относят вещества, удельное сопротивление которых является промежуточным между удельными сопротивлениями проводников, хорошо проводящих электрический ток, и диэлектриками, практически его не проводящими.

**Проводимость чистых полупроводников в отсутствие примесей называют собственной проводимостью, так как она определяется свойствами самого полупроводника.**

Существует два механизма собственной проводимости — *электронная* и *дырочная*.

Электронная проводимость осуществляется направленным перемещением в межатомном пространстве свободных электронов, покинувших валентную оболочку атома в результате нагревания полупроводника или под действием внешних полей (рис. 141, а).

Вакантное электронное состояние в атоме, образовавшееся при возникновении свободного электрона, обладает положительным зарядом и называется *дыркой* (рис. 141, б). Валентный электрон соседнего атома, притягиваясь к дырке, может перескочить в неё (*рекомбинировать*). При этом на его прежнем месте образуется новая дырка, которая затем может аналогично перемещаться по кристаллу.

*Дырочная проводимость* осуществляется при направленном перемещении валентных электронов между электронными оболочками соседних атомов на вакантные места (дырки).

Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных зарядов.

#### Донорные и акцепторные примеси.

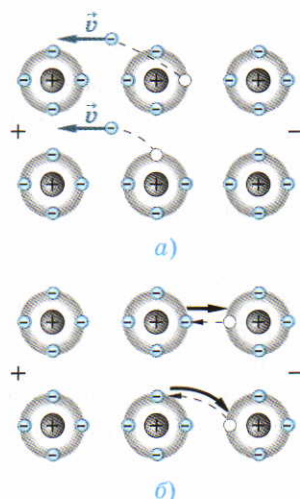
**Примеси в полупроводнике — атомы посторонних химических элементов, содержащиеся в основном полупроводнике.**

Дозированное введение в чистый полупроводник примесей позволяет целенаправленно изменять его проводимость.

**Примесная проводимость — проводимость полупроводников, обусловленная внесением в их кристаллические решётки примесей.**

Изменяя концентрацию атомов примеси, можно значительно изменить число носителей заряда того или иного знака.

Знак носителей заряда определяется валентностью атомов примеси. Различают *донорные* (от лат. *donor* — дарить) и *акцепторные* (от лат.



#### ▲ 141

*Собственная проводимость полупроводника:*

*а) электронная проводимость (образование свободного электрона и дырки);*

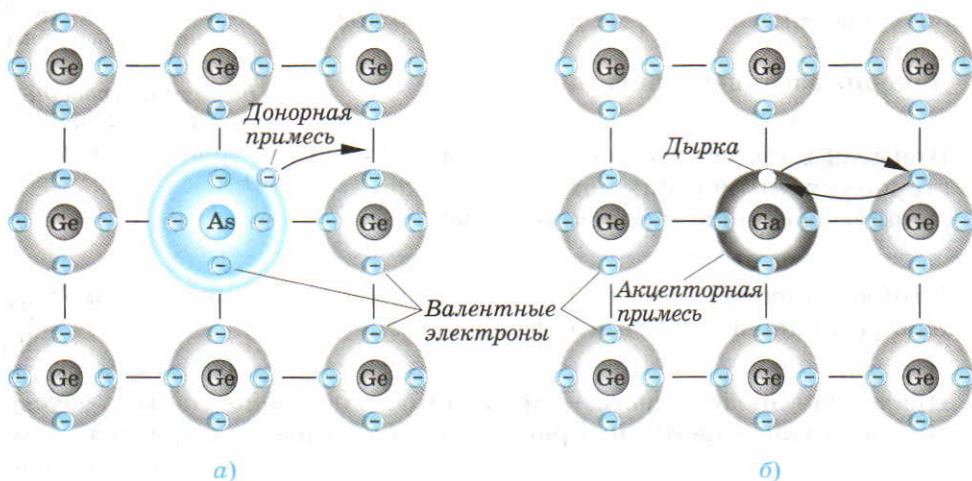
*б) дырочная проводимость (перемещение валентного электрона)*



ассептор — принимать) *примеси*. Валентность атомов донорной примеси больше валентности основного полупроводника. Валентность атомов акцепторной примеси меньше валентности основного полупроводника.

Типичным примером донорной примеси в четырёхвалентном германии Ge являются пятивалентные атомы мышьяка As. Четыре валентных электрона атома As связаны попарно сильными ковалентными связями с электронами соседних атомов Ge (рис. 142, а). Пятый валентный электрон слабее связан с атомом примеси. При внесении полупроводника с донорной примесью в электрическое поле этот электрон легко отрывается от атома, становясь свободным. При добавлении одной десятиллионной доли атомов мышьяка в германии при комнатной температуре концентрация свободных электронов, поставляемых атомами примеси, в тысячу раз превышает концентрацию свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике. Полупроводник с донорной примесью называют *полупроводником n-типа* (от лат. *negativus* — отрицательный), так как он обладает преимущественно электронной проводимостью.

Примером акцепторной примеси в германии Ge являются трёхвалентные атомы галлия Ga (рис. 142, б). Для образования парноэлектронных связей с четырьмя ближайшими соседями у атома Ga не хватает одного электрона. Недостающая вакантная связь является дыркой. Её может заполнить валентный электрон соседнего атома. При этом электроней-



## ▲ 142

Фрагмент кристаллической решётки примесных полупроводников:

а) донорный полупроводник;

б) акцепторный полупроводник



ральный атом Ga, получивший дополнительный электрон, превращается в отрицательный ион  $\text{Ga}^-$ , а дырка возникает у соседнего атома, потерявшего валентный электрон. Из-за этого число дырок возрастает, и полупроводник приобретает преимущественно дырочную проводимость.

Полупроводник с акцепторной примесью называют *полупроводником p-типа* (от лат. *positivus* — положительный), так как дырка имеет положительный заряд.

### ВОПРОСЫ

1. Какую проводимость полупроводников называют собственной? Какие известны механизмы собственной проводимости?
2. Как осуществляется электронная и дырочная проводимость?
3. Какую проводимость полупроводников называют примесной? Охарактеризуйте донорную и акцепторную примеси.
4. Приведите пример полупроводника с донорной примесью. Почему его называют полупроводником *n*-типа?
5. Приведите пример полупроводника с акцепторной примесью. Почему такой полупроводник называют полупроводником *p*-типа?

## § 44. Полупроводниковый диод

***p—n*-Переход.** В месте контакта примесных полупроводников образуется особый слой.

***p—n*-Переход — контактный слой двух примесных полупроводников *p*- и *n*-типа.**

Характерной особенностью *p—n*-перехода является его односторонняя проводимость: он пропускает ток практически только в одном направлении (от полупроводника *p*-типа к полупроводнику *n*-типа).

Для получения *p—n*-перехода кристалл полупроводника (Ge, Si) с примесью *p*-типа (Ga, In) нагревается до температуры порядка 1000 К. При этой температуре пар примеси *n*-типа (As, P), направляемый на поверхность кристалла, диффундирует в неё. При этом на поверхности кристалла образуется область, представляющая из себя полупроводник *n*-типа. Снаружи этот полупроводник покрывается защитной окисной плёнкой. В едином монокристалле возникают два контактирующих друг с другом полупроводника *p*- и *n*-типа.

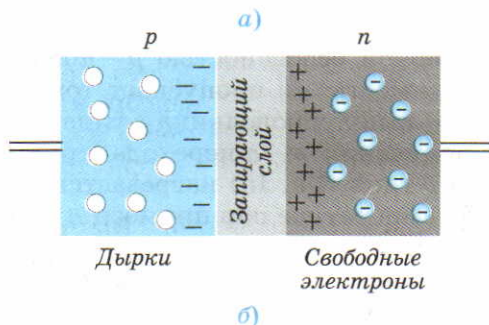
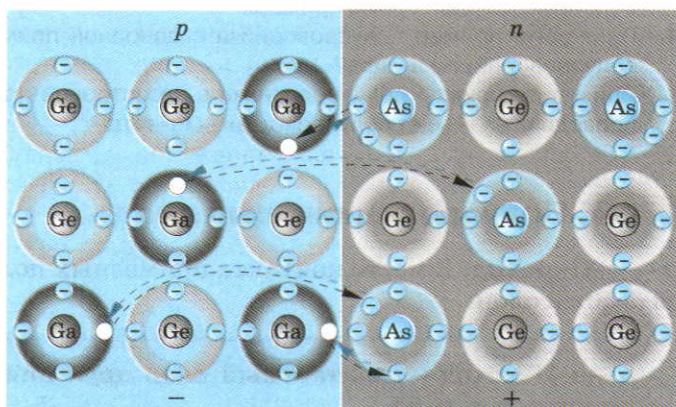
При образовании такого контакта свободные электроны из *n*-области благодаря тепловому движению начинают диффундировать в *p*-область

(где их мало). Аналогично дырки из  $p$ -области (где их много) диффундируют в  $n$ -область<sup>1</sup>.

При обмене частицами  $p$ -область приобретает отрицательный заряд, создаваемый нескомпенсированными отрицательными ионами акцептора ( $Ga^-$ ). Эти ионы образуются как в результате рекомбинации свободных электронов из  $n$ -области с дырками, так и за счёт ухода дырок в  $n$ -область (рис. 143, а).

В то же время  $n$ -область приобретает положительный заряд, образованный нескомпенсированными отрицательными ионами донора. Эти ионы образуются как в результате ухода свободных электронов в  $p$ -область, так и в результате рекомбинации дырок из  $p$ -области с электронами.

Таким образом, в  $p$ — $n$ -переходе образуется двойной электрический слой. Напряжённость поля этого *запирающего слоя* направлена от  $n$ - к



## 143

Образование двойного электрического слоя в  $p$ — $n$ -переходе:

- а) физические процессы;  
б) полярность напряжения

<sup>1</sup> Реально происходит перемещение валентных электронов между соседними атомами из  $n$ -области в  $p$ -область, но при этом дырки синхронно смещаются в противоположном направлении.



*p*-полупроводнику (от плюса к минусу), препятствуя дальнейшему разделению зарядов (рис. 143, б).

**Запирающий слой — двойной слой разноимённых электрических зарядов, создающий электрическое поле на *p*—*n*-переходе, препятствующее свободному разделению зарядов.**

Разность потенциалов на запирающем слое у германия оказывается порядка  $U_3 = 0,3$  В. В некотором смысле запирающий слой аналогичен заряженному конденсатору.

Приложение к *p*—*n*-переходу напряжения противоположной полярности — *прямое включение* (плюс — к *p*-полупроводнику и минус — к полупроводнику *n*-типа) — ослабляет запирающее поле. При этом на контакте вновь возникает движение зарядов электронов из *n*- в *p*-область, а дырок — из *p*- в *n*-область. При прямом включении *p*—*n*-перехода в цепь к источникам напряжения электрический ток протекает в прямом направлении: из *p*- в *n*-область. Чем больше приложенное напряжение, тем больше сила тока. Сила тока через *p*—*n*-переход резко возрастает, когда приложенная разность потенциалов превосходит напряжение на запирающем слое, т. е. при  $U > U_3$ .

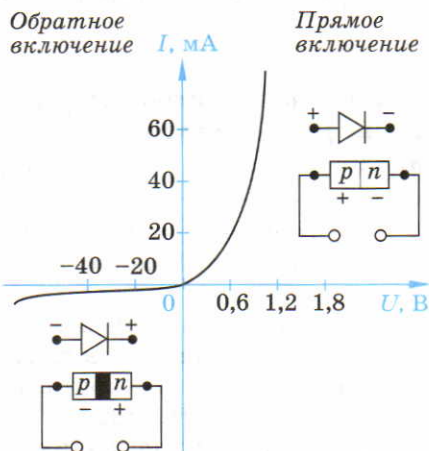
*Обратное включение* *p*—*n*-перехода, когда плюс внешнего источника напряжения подсоединяется к *n*-полупроводнику, а минус — к *p*-полупроводнику, увеличивает запирающее напряжение. Увеличение запирающего напряжения блокирует движение *основных носителей тока* (заряженных частиц, имеющих максимальную концентрацию) — электронов из *n*-области и дырок из *p*-области. Поэтому незначительный ток в *p*—*n*-переходе может протекать лишь вследствие движения неосновных носителей (заряженных частиц, концентрация которых значительно меньше концентрации основных носителей) — свободных электронов из *p*-области и дырок из *n*-области. Небольшая концентрация неосновных носителей приводит к тому, что при обратном включении ток через *p*—*n*-переход оказывается пренебрежимо малым.

Зависимость силы тока через *p*—*n*-переход от напряжения, приложенного к нему, или вольт-амперная характеристика *p*—*n*-перехода приведена на рисунке 144.

**Полупроводниковый диод. Выпрямление переменного тока.** Для преобразования переменного тока в постоянный в электронных схемах используется *полупроводниковый диод*.

**Полупроводниковый диод — элемент электрической системы, содержащий *p*—*n*-переход и два вывода для включения в электрическую цепь.**

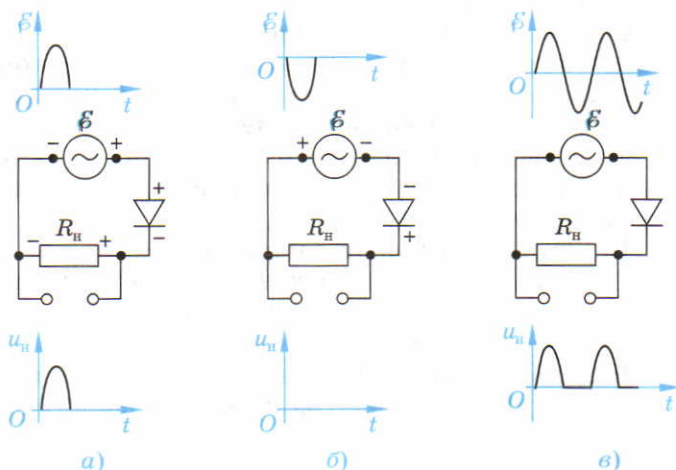




## ▲ 144

Вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода

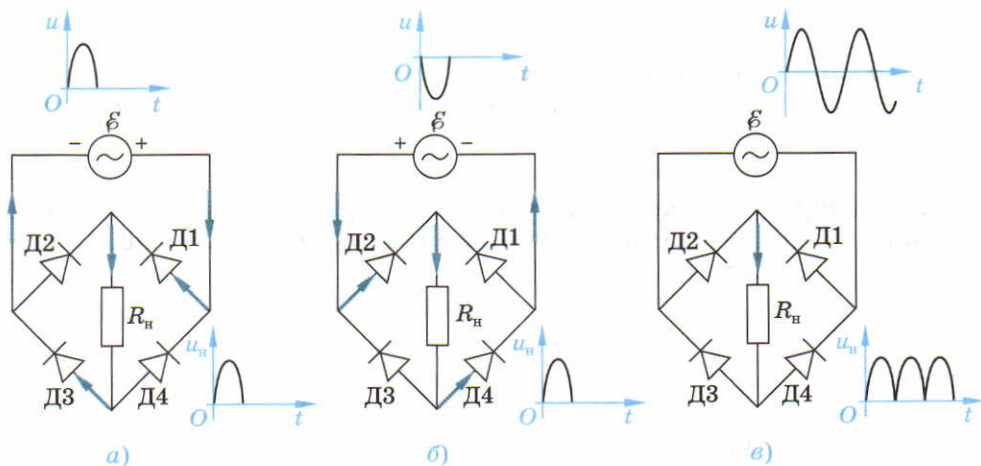
Волном подобно напряжению на генераторе (рис. 145, а). Отрицательный импульс напряжения, соответствующий обратному включению, не проходит через диод, поэтому напряжение на  $R_H$  равно нулю (рис. 145, б). При включении диода в цепь источника переменного напряжения ток через диод проходит только в течение половины периода, когда гармонически изменяющееся напряжение приложено к диоду в прямом направлении



## 145 ▶

Полупроводниковый диод как выпрямитель переменного тока:

а) прямое включение;  
б) обратное включение;  
в) однополупериодное выпрямление



## ▲ 146

Мостиковая схема двухполупериодного выпрямления:

а) положительный импульс; б) отрицательный импульс;  
 в) переменное напряжение

(рис. 145, в). Подобное выпрямление тока называют поэтому однополупериодным выпрямлением.

Мостиковая схема (рис. 146) обеспечивает прохождение тока через нагрузку на протяжении всего периода переменного напряжения генератора, или *двухполупериодное выпрямление*. При подключении мостика к импульсному источнику (рис. 146, а) ток протекает через диод Д1, резистор  $R$  (вниз) и диод Д3. При изменении полярности импульсного источника путь тока изменяется: через диод Д2, резистор  $R$  (вниз) и диод Д4 (рис. 146, б). При подключении мостика к источнику гармонического переменного напряжения ток через сопротивление нагрузки протекает при любой полярности этого напряжения (рис. 146, в).

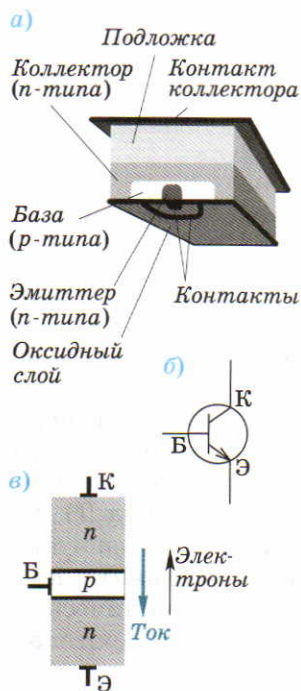
## ВОПРОСЫ

1. Какой контактный слой называют  $p-n$ -переходом? Как он получается технологически?
2. Какой слой называется запирающим в  $p-n$ -переходе? Как образуется запирающий слой в  $p-n$ -переходе?
3. Какое присоединение внешнего напряжения к  $p-n$ -переходу называют прямым (обратным) включением? Какие носители тока называют основными, а какие неосновными?
4. Объясните ход вольт-амперной характеристики  $p-n$ -перехода.
5. Приведите электрические схемы и объясните различие одно- и двухполупериодного выпрямления.

## § 45. Транзистор

**$n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторы.** Если необходимо преобразовать или усилить переменный ток, в электронных схемах используют *транзистор*<sup>1</sup>.

**Транзистор — полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$ -переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь.**



### ▲ 147

**$n-p-n$ -Транзистор:**

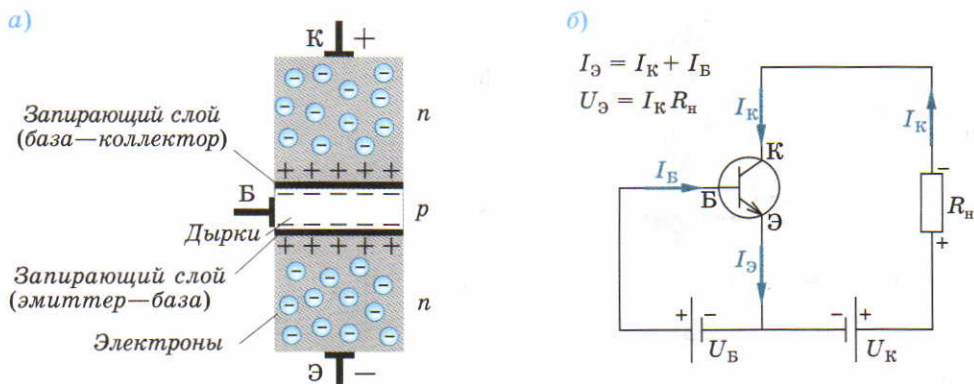
- а) принципиальное устройство;  
 б) обозначение;  
 в) движение зарядов

$n-p-n$ -Транзистор образует три тонких слоя примесных полупроводников (рис. 147, а): *эмиттер*, *базу* и *коллектор*. *Эмиттер*, являющийся в  $n-p-n$ -транзисторе источником свободных электронов, изготавливается из полупроводника  $n$ -типа с высокой концентрацией примеси. *База*, регулирующая силу тока в транзисторе, представляет из себя особенно тонкий слой (толщиной порядка 10 мкм) полупроводника  $p$ -типа с небольшой концентрацией примеси. *Коллектор*, перехватывающий поток носителей заряда, идущих от эмиттера через базу, имеет с этой целью наибольшую площадь контакта. Коллектор изготавливается из полупроводника  $n$ -типа с небольшой концентрацией примеси.

В  $n-p-n$ -транзисторе основными носителями заряда являются свободные электроны, движущиеся от эмиттера к коллектору. Соответственно ток, за направление которого принимается направленное движение положительных зарядов, протекает от коллектора к эмиттеру (рис. 147, в). Поэтому на условном обозначении  $n-p-n$ -транзистора стрелка направлена от базы к эмиттеру (рис. 147, б). Аналогично устройство и  $p-n-p$ -транзистора, в котором основными носителями заряда являются дырки, движущиеся от эмиттера к коллектору. В этом же направлении протекает ток через эмиттер. Это учитывает-

<sup>1</sup> Слово «транзистор» образовано от английских слов transfer — «переносить» и resistor — «сопротивление».





## ▲ 148

Электрические заряды и направление токов в  $n-p-n$ -транзисторе:

а) не включённом в электрическую цепь;

б) включённом в электрическую цепь

ся в условном обозначении на схемах  $p-n-p$ -транзистора, где стрелка направлена от эмиттера к базе (см. рис. 149, а).

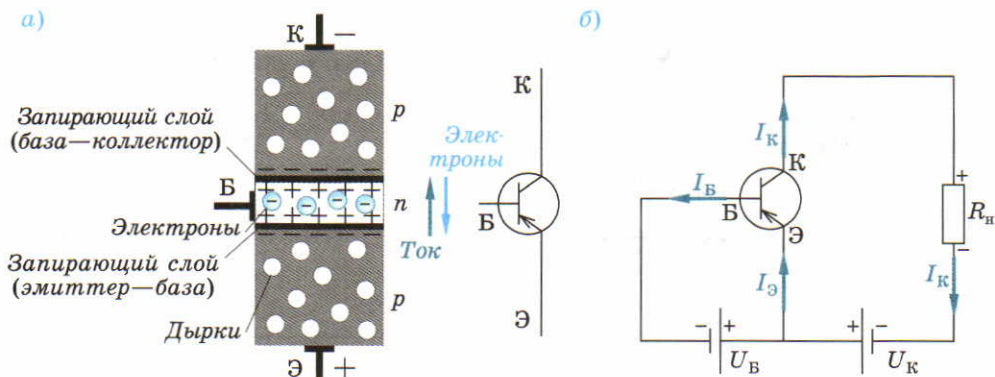
Если  $n-p-n$ -транзистор не включён в электрическую цепь, то на  $p-n$ -переходах образуется запирающий слой (рис. 148, а). При подключении транзистора в электрическую цепь по схеме, приведённой на рисунке 148, б, на  $p-n$ -переход эмиттер—база подаётся небольшое прямое напряжение  $U_{\text{Б}}$ , а на  $p-n$ -переход база—коллектор обратное напряжение  $U_{\text{К}}$ .

При прямом включении напряжения  $U_{\text{БЭ}}$  свободные электроны из эмиттера диффундируют в базу и благодаря её малой толщине почти все достигают коллекторного перехода ( $I_{\text{Б}} \ll I_{\text{Э}}$ ). Под действием положительного потенциала источника  $U_{\text{КЭ}}$  электроны притягиваются к коллектору, так что через сопротивление  $R_{\text{н}}$  протекает сила тока  $I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$ . Сила тока  $I_{\text{К}}$ , протекающего через коллектор (и соответственно через сопротивление нагрузки), значительно превышает силу тока  $I_{\text{Б}}$  через базу.

Небольшая сила тока через базу вызывает значительную силу тока в нагрузке, поэтому транзистор может быть использован для усиления электрических сигналов.

Напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_{\text{н}}$  значительно превышает напряжение, приложенное между базой и эмиттером:

$$U_{\text{н}} = I_{\text{К}} R_{\text{н}} \gg U_{\text{Б}}$$



### ▲ 149

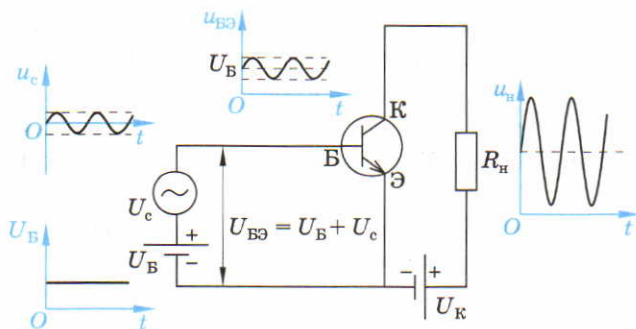
Электрические заряды и направление токов в  $p-n-p$ -транзисторе:

- а) не включённом в электрическую цепь;  
 б) включённом в электрическую цепь

Распределение зарядов и направление токов в  $p-n-p$ -транзисторе, не включённом в аналогичную электрическую цепь, показаны на рисунке 149, а.

Противоположная полярность источников тока в схеме на рисунке 149, б по сравнению с предыдущей схемой объясняется тем, что в  $p-n-p$ -транзисторе основными носителями зарядов являются дырки из эмиттера.

**Усилитель на транзисторе.** Одной из наиболее распространённых схем усиления слабых электрических сигналов, использующих транзистор, является *схема с общим эмиттером*. Такое название схемы связано с тем, что эмиттер включён как в цепь базы, так и в цепь коллектора (рис. 150).



### ◀ 150

Усилитель на транзисторе (схема с общим эмиттером)

По сравнению со схемой включения транзистора, изображённой на рисунке 148, б, в схеме с общим эмиттером есть лишь одно изменение: в цепь база—эмиттер включён источник слабого переменного гармонического сигнала:

$$u_c = U_{c0} \sin \omega t.$$

Разность потенциалов между базой и эмиттером

$$u_{БЭ} = U_B + u_c = U_B + U_{c0} \sin \omega t$$

всегда положительна, так как  $U_{c0} < U_B$ . Это означает, что к  $p-n$ -переходу база—эмиттер напряжение  $U_{БЭ}$  в любой момент времени прикладывается в прямом направлении, поэтому через переход всё время протекает ток. Как отмечалось выше, небольшое изменение входного напряжения цепи база—эмиттер  $\Delta U_{вх} = \Delta U_{БЭ}$  вызывает значительное изменение напряжения на сопротивление нагрузки, или выходного напряжения ( $\Delta U_{вых} = \Delta U_H$ ).

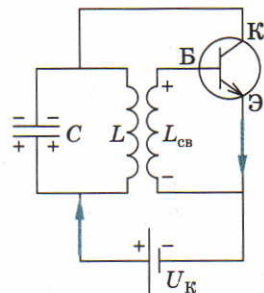
**Коэффициент усиления — отношение изменения выходного напряжения к изменению входного:**

$$k = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}.$$

Для подобной схемы коэффициент усиления может быть порядка 1000.

**Генератор на транзисторе.** Частота 50 Гц электрического тока, вырабатываемого генераторами электростанций, определяется числом оборотов вокруг своей оси ротора генератора. Однако механическое вращение с частотой 1—1000 мГц, необходимой для радио- и телекоммуникации, невозможно. Поэтому электрические колебания высокой частоты получают с помощью *генератора на транзисторе*. Основными элементами генератора на транзисторе являются транзистор, колебательный контур и источник постоянного тока, включённые в цепь эмиттер—коллектор, катушка индуктивности  $L_{св}$  в цепи база—эмиттер, индуктивно связанная с катушкой индуктивности  $L$  контура (рис. 151).

Генератор должен вырабатывать незатухающие колебания. Собственные электромагнитные колебания в контуре являются затухающими,



### ▲ 151

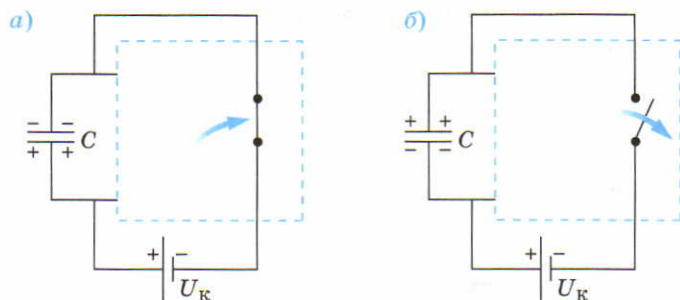
Генератор на транзисторе



## 152

Транзистор как электронный ключ:

- а) цепь замкнута;  
б) цепь разомкнута



так как энергия колебаний теряется на активном сопротивлении провода, из которого изготовлена катушка индуктивности. Если эти потери энергии компенсируются поступлением энергии в контур от источника внутри системы, возможна генерация незатухающих колебаний, или *автоколебаний*. В схеме генератора на транзисторе, приведённой на рисунке 151, поступление энергии в контур (подзарядка конденсатора) происходит в тот момент, когда на его нижней пластине скапливается максимальный положительный заряд. Для этого через эмиттер должен протекать ток к контуру. Ток через эмиттер протекает лишь в том случае, когда между базой и эмиттером приложено напряжение в прямом направлении: плюс — к базе, минус — к эмиттеру. Такая полярность напряжения  $U_{\text{БЭ}}$  возможна при согласованной индуктивной связи катушки индуктивности  $L$  контура с катушкой индуктивности  $L_{\text{св}}$  в цепи база—эмиттер. Подобная связь называется *обратной связью*. Обратная связь позволяет корректировать сигнал на выходе системы изменением сигнала на входе.

Через полупериод колебаний, когда конденсатор перезаряжается, заряд на нижней пластине становится отрицательным. Это приводит к изменению знака напряжения между базой и эмиттером. Обратное напряжение между базой и эмиттером прерывает ток через транзистор: поступление энергии в контур прекращается. В этом смысле транзистор подобен ключу, присоединяющему источник тока к колебательному контуру в требуемый момент времени, для зарядки конденсатора (рис. 152, а). При изменении полярности зарядов на конденсаторе ключ размыкается (рис. 152, б). Пунктиром на рисунке обведена часть схемы, изображённая на рисунке 151, действие которой аналогично электронному ключу.

### ВОПРОСЫ

1. Какой полупроводниковый прибор называют транзистором? Объясните назначение эмиттера, базы и коллектора в  $n-p-n$ -транзисторе.

2. Объясните распределение электрических зарядов и направления токов в  $n-p-n$ -транзисторе (в отсутствие внешнего напряжения и при его наличии).
3. Объясните распределение электрических зарядов и направления токов в  $p-n-p$ -транзисторе (в отсутствие внешнего напряжения и при его наличии).
4. Нарисуйте электрическую схему и объясните принцип работы усилителя на транзисторе. Как определяется коэффициент усиления?
5. Нарисуйте электрическую схему и объясните принцип работы генератора на транзисторе. Объясните назначение обратной связи в генераторе.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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

■ **Фаза колебаний** — аргумент функции, описывающей гармонические колебания.

Напряжение и сила тока в резисторе совпадают по фазе в любой момент времени.

■ **Действующее значение силы переменного тока** равно силе постоянного тока, выделяющего в проводнике такое же количество теплоты, что и переменный ток за один и тот же промежуток времени. Если переменный ток изменяется по гармоническому закону, в качестве промежутка времени выбирается период изменения тока. Действующее (эффективное) значение силы переменного тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитуды:

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

■ **Активное сопротивление** — сопротивление элемента электрической цепи, в котором электричес-

кая энергия необратимо преобразуется во внутреннюю (тепловую). Изменяющееся со временем электрическое поле является источником магнитного поля.

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

Колебания силы тока в цепи конденсатора опережают по фазе колебания напряжения на его обкладках на  $\pi/2$ .

■ **Реактивное сопротивление** — элемент цепи, для которого средняя мощность переменного тока равна нулю.

■ **Ёмкостное сопротивление** — реактивное сопротивление конденсатора.

■ **Индуктивное сопротивление** — реактивное сопротивление конденсатора.

Колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на  $\pi/2$  от колебаний напряжения на ней.

■ Формула Томсона:

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



- **Полное сопротивление колебательного контура переменному току** зависит от частоты тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

- **Резонанс в колебательном контуре** — физическое явление резкого возрастания амплитуды колебаний силы тока в контуре при совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний в контуре.
- **Резонансная кривая** — график зависимости амплитуды вынужденных колебаний силы тока от частоты приложенного к контуру напряжения. В полупроводниках существует два механизма собственной проводимости: *электронная* и *дырочная*.
- **Электронная проводимость** — результат направленного перемещения в межатомном пространстве свободных электронов, покинувших валентную оболочку атома в результате нагревания полупроводника или под действием внешних полей.
- **Дырочная проводимость** — результат направленного перемещения валентных электронов между электронными оболочками соседних атомов на вакантные места — дырки.
- **Примеси в полупроводнике** — атомы посторонних химических элементов, содержащихся в основном полупроводнике. Различа-

ют донорные и акцепторные примеси. Атомы донорной примеси имеют валентность, большую валентности основного полупроводника. Атомы акцепторной примеси имеют валентность, меньшую валентности основного полупроводника.

- **Полупроводник *n*-типа** — полупроводник с донорной примесью.
- **Полупроводник *p*-типа** — полупроводник с акцепторной примесью.
- ***p*–*n*-Переход** — контактный слой двух примесных полупроводников *p*- и *n*-типа.
- **Запирающий слой** — двойной слой разноимённых электрических зарядов, создающий электрическое поле на *p*–*n*-переходе, препятствующее свободному разделению зарядов.
- **Полупроводниковый диод** — элемент электрической схемы, содержащий *p*–*n*-переход и два вывода для включения в электрическую цепь.
- **Транзистор** — полупроводниковый прибор с двумя *p*–*n*-переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь. Транзистор используется для усиления и генерации электрических сигналов.
- **Коэффициент усиления** — отношение изменения выходного напряжения к изменению входного.





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

### § 46. Электромагнитные волны

**Опыт Герца.** Ранее мы описывали электростатическое поле (созданное неподвижными электрическими зарядами) и магнитное поле (возникающее при протекании постоянного тока, т. е. при движении электрических зарядов с постоянной скоростью) независимо. В то же время между изменяющимися во времени электрическим и магнитным полем существует взаимосвязь. Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое (*электромагнитная индукция*), а переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное (*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 — возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в пространстве.**

Английский учёный *Джеймс 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.*

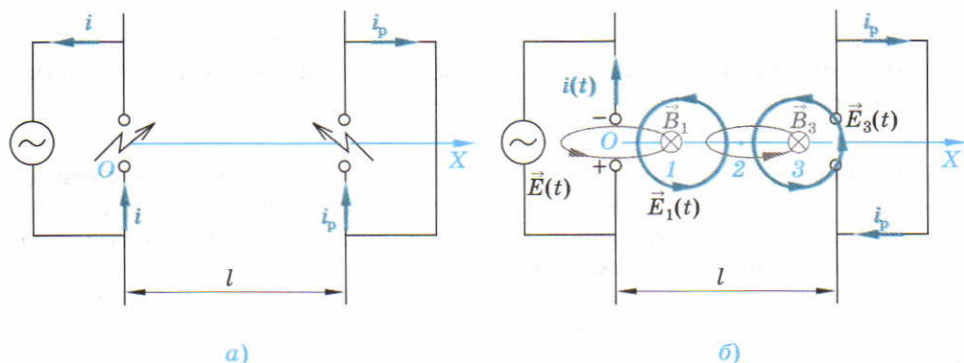
Экспериментально электромагнитные волны были обнаружены в 1887 г. в Берлинском университете *Генрихом Герцем*. Источником электромагнитного поля в опыте Герца являлись электромагнитные колебания, возникающие в *вибраторе*.

Вибратор Герца представляет собой прямолинейный проводник с воздушным промежутком посередине — колебательный контур. Электро-

ёмкость 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). В принципе любой проводящий стержень может рассматриваться как открытый колебательный контур. Высокое напряжение, подаваемое к воздушному промежутку, вызывало разряд в нём вследствие электрического пробоя воздуха (рис. 153, а). Спустя мгновение разряд возникал в воздушном промежутке аналогичного вибратора (*резонатора*), замкнутого накоротко проволокой и расположенного на расстоянии  $l$  (порядка нескольких метров) от вибратора.

Разряд в резонаторе возникает через промежуток времени  $\tau = l/c$  после разряда в вибраторе. Наиболее интенсивная искра возникает в резонаторе, расположенном параллельно вибратору.

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. 153, б). Такое направление тока (от плюса к минусу) означает, что аналогичное направление имеет напряжённость 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



### ▲ 153

Электромагнитные волны:

а) опыт Герца; б) механизм распространения



электрическим полем, в области точки 1 должна быть направлена против  $\vec{B}_1(t)$  — к нам. Вихревое электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_1(t)$  вызывает в точке 2 ток смещения, направленный вверх. Этот ток создаёт в точке 3 магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_3(t)$ . 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:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_k}{m} = \frac{q\vec{E}}{m}, \quad (134)$$

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

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

$$E \sim a. \quad (135)$$

Объёмная плотность энергии электромагнитного поля в электромагнитной волне складывается из объёмной плотности энергии электрического и магнитного полей, в среднем по времени равных друг другу:

$$w_{\text{эм}} = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = 2w_{\text{э}}. \quad (136)$$



Используя формулу  $w = \epsilon\epsilon_0 E^2/2$  (см. Ф-10, § 90), получаем плотность энергии электромагнитного поля в вакууме ( $\epsilon = 1$ ):

$$w_{\text{эм}} = \epsilon_0 E^2. \quad (137)$$

С учётом зависимости (135)

$$w_{\text{эм}} \sim a^2. \quad (138)$$

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?

## § 47. Распространение электромагнитных волн

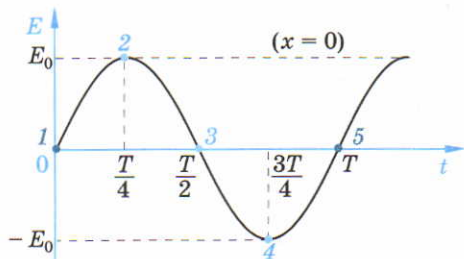
**Бегущая гармоническая электромагнитная волна.** Для выяснения механизма распространения электромагнитной волны мы рассмотрели её возникновение при кратковременном импульсе напряжённости электрического поля в вибраторе. Реально при пробое воздуха в вибраторе возникают колебания с собственной частотой  $\omega$  (периодом  $T$ ). Напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля в вибраторе изменяются по гармоническому закону (рис. 154, а):

$$E = E_0 \sin \omega t, \quad (139)$$

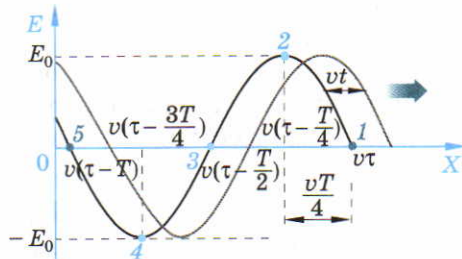
$$B = B_0 \sin \omega t. \quad (140)$$

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

Начальное возмущение 1 ( $t = 0$ ;  $E = 0$ ) через время  $t$  распространяется со скоростью  $v$  на расстояние  $vt$ . Возмущение 2 ( $t = T/4$ ,  $E = E_0$ ) оказывается ближе к вибратору на расстояние  $vT/4$  (рис. 154, б).



а)



б)

## ▲ 154

Распространение в пространстве гармонического возмущения электромагнитного поля:

а) напряжённость в вибраторе как функция времени;

б) пространственное распределение напряжённости электрического поля в моменты времени  $\tau$  и  $\tau + t$

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 — кратчайшее расстояние между двумя возмущениями, колеблющимися в одинаковой фазе.**

На это расстояние распространяется волна за период колебаний её источника.

При постоянной скорости распространения волны за период она проходит расстояние

$$\lambda = vT, \quad (141)$$

или

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (142)$$

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 (134), справедливом в точке  $x = 0$ , следует заменить  $t$  на  $(t - x/v)$ .

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

$$E = E_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right). \quad (143)$$

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

Согласно формуле (140) *индукция магнитного поля для бегущей гармонической волны, распространяющегося в положительном направлении оси  $X$  со скоростью  $v$* , будет изменяться по закону:

$$B = B_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right). \quad (144)$$

Излучение электромагнитных волн гармонического вибратора током в момент времени  $7T/4$  представлено на рисунке 155, *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.

**Поляризация волны. Фронт волны.** Как показано на рисунке 155, *б*, колебания вектора  $\vec{E}$  упорядочены: они происходят в плоскости  $XY$ .

*В поляризованной электромагнитной волне колебания вектора напряжённости электрического поля упорядочены.*

В рассматриваемом случае плоскостью поляризации является плоскость  $XY$ .

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 фаза  $\varphi$  синуса в выражениях (143) и (144) постоянна, т. е.

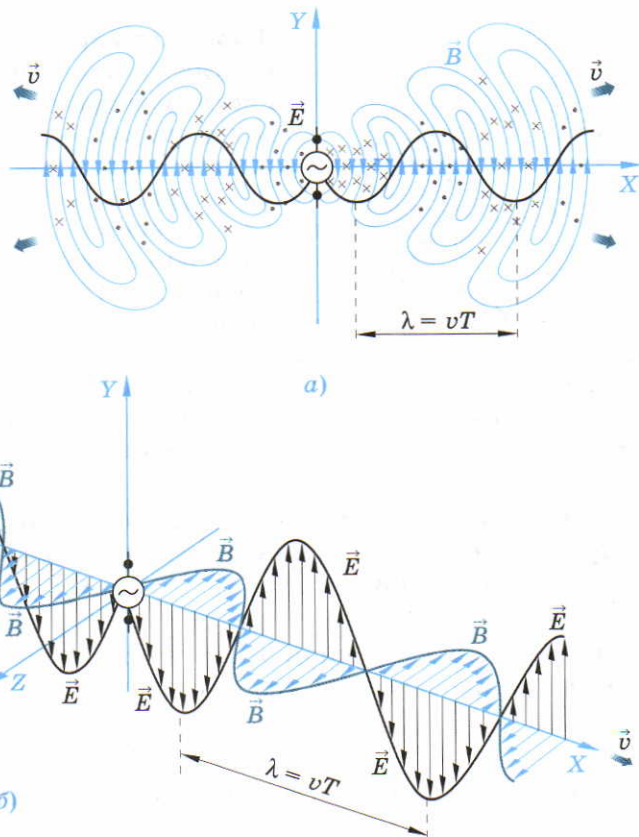
$$\varphi = \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = \text{const}. \quad (145)$$

Например, если  $\varphi = \pi/6$ , то  $E = E_0/2$ ,  $B = B_0/2$  в момент времени  $t$  в точках с координатой  $x = v(t - \pi/6\omega)$ , как следует из формулы (145).



## 155

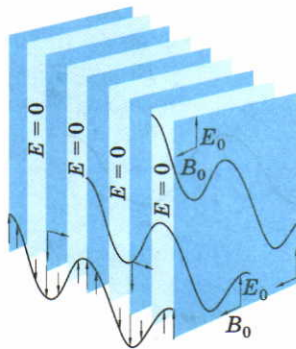
Напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля излучающего гармонического вибратора:  
 а) в плоскости вибратора;  
 б) в пространстве (вблизи оси  $X$ )



**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.

Геометрическим местом точек, имеющих определённую координату  $x$ , является плоскость, проходящая через эту точку параллельно плоскости  $YZ$  (рис. 156). В этой плоскости, называемой *фронтом волны*, напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля принимают определённое значение, т. е. имеют одинаковую фазу.



### ▲ 156

Плоская электромагнитная волна

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

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

Электромагнитная волна является поперечной.

На рисунке 156 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 фазы  $\varphi = \pm\pi/2$ .

Направление распространения фронта волны характеризует *луч*.

**Луч — линия, вектор касательной к которой в каждый момент времени направлен перпендикулярно фронту волны, в сторону её распространения.**

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

### ВОПРОСЫ

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 напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля. Объясните содержание рисунка 155.
4. Какое физическое явление называют поляризацией? Что такое плоскость поляризации и плоскополяризованная волна?
5. Какую поверхность называют фронтом волны? Что такое луч, что он характеризует?

### ЗАДАЧИ

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. [3 м]
2. Колебательный контур радиоприёмника настроен на длину волны  $\lambda = 300$  м. Катушка индуктивности в контуре обладает индуктивностью  $L = 100$  мкГн. Найдите ёмкость конденсатора в контуре. [250 мкФ]



3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивности  $L = 1$  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? [188 — 377 м]
4. Напишите в СИ уравнение бегущей гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $X$  в вакууме. Напряжённость электрического поля  $E_0 = 1$  кВ/см, частота  $\nu = 600$  ТГц (зелёный свет).  
[ $E = 10^5 \sin(3,77 \cdot 10^{15} t - 1,26 \cdot 10^7 x)$  В/м]
5. Уравнение напряжённости электрического поля бегущей гармонической волны имеет вид  $E = 100 \sin \pi(6 \cdot 10^{14} t + 2 \cdot 10^6 x)$ . Найдите: 1) амплитуду; 2) частоту; 3) период; 4) длину волны; 5) скорость и направление распространения волны.  
[1) 100 В/м; 2)  $3 \cdot 10^{14}$  Гц; 3)  $3,3 \cdot 10^{-15}$  с; 4) 1 мкм; 5)  $3 \cdot 10^8$  м/с — противоположно направлению оси  $X$ ]

## § 48. 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** — энергия электромагнитного излучения, проходящего в единицу времени (мощность  $P_{\text{эм}}$ ) сквозь поверхность площадью  $S$ :

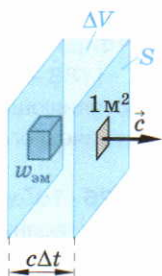
$$\Phi_W = P_{\text{эм}} = \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

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

$$\frac{\Phi_W}{S} = \frac{P_{\text{эм}}}{S} = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (146)$$

Выразим плотность потока энергии через плотность электромагнитной энергии и скорость её распространения  $c$ . За промежуток времени  $\Delta t$  сквозь плоскую поверхность площадью  $S$  пройдёт электромагнитное излучение, находящееся в параллелепипеде с основанием  $S$  и высотой  $c\Delta t$  (рис. 157).





Объём параллелепипеда  $\Delta V = Sc\Delta t$ . Энергия электромагнитного поля внутри параллелепипеда равна произведению плотности энергии на объём:

$$\Delta W = w_{\text{эм}} \cdot c\Delta t S.$$

Тогда плотность потока излучения

$$\frac{P_{\text{эм}}}{S} = w_{\text{эм}} \cdot c. \quad (147)$$

Используя выражение (137) для  $w_{\text{эм}}$ , получаем

$$\frac{P_{\text{эм}}}{S} = \epsilon_0 E^2 c. \quad (148)$$

Учитывая, что напряжённость электрического поля в электромагнитной волне зависит от времени (например, по гармоническому закону (145)), перенос мощности характеризует величина, усреднённая по времени, — *интенсивность волны*.

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

$$I = \frac{\overline{P}_{\text{эм}}}{S} = \overline{w}_{\text{эм}} c = c\epsilon_0 \overline{E}^2. \quad (149)$$

Единица интенсивности волны — *ватт на квадратный метр* (1 Вт/м<sup>2</sup>). Для гармонических электромагнитных колебаний с амплитудой  $E_0$ , так же как и для действующего значения переменного тока,  $\overline{E}^2 = E_0^2/2$ :

$$I = 0,5c\epsilon_0 E_0^2. \quad (150)$$

Следовательно, *интенсивность гармонической электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля*:

$$I \sim E_0^2. \quad (151)$$

**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 мы предположим, что такой источник излучает электромагнитные волны по всем направле-

ниям с одинаковой интенсивностью. В вакууме мощность электромагнитной волны, излучаемая точечным источником, не поглощается. С течением времени волна проходит через всё большие концентрические сферические поверхности (рис. 158). Поэтому средняя энергия, переносимая в перпендикулярном направлении сквозь единицу площади в единицу времени, т. е. интенсивность электромагнитной волны, уменьшается по мере удаления от источника. Средняя мощность электромагнитного излучения со сферической поверхности источника радиусом  $r_{\text{и}}$  равна:

$$P_{\text{и}} = I_{\text{и}} 4\pi r_{\text{и}}^2,$$

где  $I_{\text{и}}$  — интенсивность излучения с поверхности источника площадью  $S_0 = 4\pi r_{\text{и}}^2$ .

В результате распространения излучения источника в пространстве сквозь сферическую поверхность радиусом  $r$  проходит та же средняя мощность электромагнитной волны:

$$P_{\text{эм}} = I 4\pi r^2,$$

где  $I$  — интенсивность излучения источника на расстоянии  $r$  от источника.

Приравнивая эти мощности, получаем:

$$I = I_{\text{и}} \frac{r_{\text{и}}^2}{r^2},$$

или

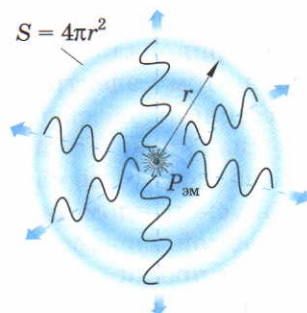
$$I \sim \frac{1}{r^2}. \quad (152)$$

*Интенсивность излучения точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.*

Согласно формуле (151), интенсивность гармонической электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля:  $I \sim E_0^2$ . С учётом зависимости (152) это означает, что

$$E_0 \sim \frac{1}{r}. \quad (153)$$

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



### ▲ 158

*Уменьшение интенсивности излучения с расстоянием от точечного источника (радиус источника  $r_{\text{и}}$ )*

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:

$$I \sim \overline{a^2}. \quad (154)$$

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. (154)),

$$I \sim \nu^4. \quad (155)$$

*Интенсивность гармонической электромагнитной волны с постоянной амплитудой  $A$  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



ты с  $\nu_1$  на  $\nu_2$  можно уменьшить в  $10^{12}$  раз. При этом мощность, принимаемая потребителем, останется прежней. Поэтому излучение электромагнитных волн больших частот требует меньшей мощности передатчика.

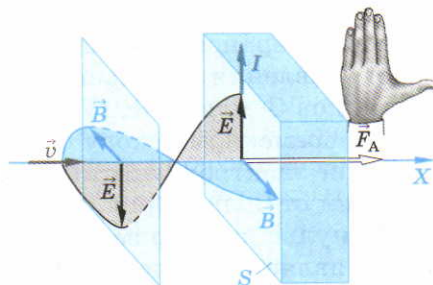
### В О П Р О С Ы

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.

## § 49. 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 совпадает с напряжённостью поля  $\vec{E}$  (рис. 159). Магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  волны 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:

$$p_{\text{эм}} = \frac{F_A}{S}. \quad (156)$$



### ▲ 159

*Давление электромагнитной волны на вещество*

При расчёте давления идеального газа мы показали (Ф-10, формула (163)), 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 движется 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 давление идеального газа. При этом нужно учесть, что волна распространяется в одном направлении, и потому необходимость введения множителя  $1/3$  отсутствует при определении давления  $p_{\text{эм}}$  электромагнитной волны:

$$p_{\text{эм}} = 2\bar{w}_{\text{эм}}. \quad (157)$$

С помощью формулы (149) можно найти связь давления электромагнитной волны с её интенсивностью:

$$p_{\text{эм}} = 2\frac{I}{c}. \quad (158)$$

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. 288) 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. 288).

**Импульс электромагнитной волны.** Давление электромагнитной волны является следствием наличия у неё импульса. При абсолютно упругом отражении электромагнитной волны модуль изменения её импульса за промежуток времени  $\Delta t$ :

$$|\Delta \vec{p}| = 2p,$$

где  $p$  — импульс падающей волны.



Согласно второму закону Ньютона,

$$F_A = \frac{|\Delta \vec{p}|}{\Delta t} = \frac{2p}{\Delta t}. \quad (159)$$

Подставляя выражения (158) и (159) в формулу (156), получаем:

$$p = \frac{IS\Delta t}{c}, \quad (160)$$

где  $IS\Delta t$  — энергия электромагнитного поля, распространяющегося сквозь поверхность площадью  $S$  за промежуток времени  $\Delta t$ . *Взаимосвязь импульса электромагнитной волны с переносимой ею энергией*

$$p = \frac{W}{c}. \quad (161)$$

### ВОПРОСЫ

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?

## § 50. 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. 289). Отличие частот (длин волн), излучаемых в различных диапазонах, связано с различием микроскопических источников излучения. Частота излучения электромагнитной волны определяется частотой колебаний заряженной час-



тицы, которую можно представить как пружинный маятник. Частота колебаний пружинного маятника зависит от массы  $m$  частицы и жёсткости  $k$  пружины (см. Ф-10, формула (117)):

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

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, электромагнитное излучение волн 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 частот 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 ( $\lambda = 0,3$ — $1,5 \cdot 10^4$  м).

Радиоволны впервые были открыты Герцем в 1886 г. (см. § 47).

*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). *Источник СВЧ-излучения — валентные электроны атома, изменяющие направления спина или изменяющие скорости своего вращения молекулы вещества.* Учитывая прозрачность атмосферы в этом диапазоне, СВЧ-излучение используют для космической связи. Кроме того, это излучение используют в бытовых микроволновых СВЧ-печах.

• **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 ИК электромагнитные волны излучают нагретые тела, молекулы которых движутся особенно 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, фотокамерах искусственных спутников, прогнозирующих урожай, а также в медицине при обнаружении инородных образований. Дистанционное управление телевизором и видеомагнитофоном 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 приближённо 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 5.

Запоминание последовательности основных цветов спектра облегчает фраза, каждое слово которой начинается с первой буквы названия основного цвета: «Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит 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 новорожденных. 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,

Таблица 5

**Диапазон длин волн, соответствующий определённому основному цвету**

	Красный	Оранже- вый	Жёлтый	Зелёный	Голубой	Синий	Фиолето- вый
$\lambda$ , 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



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 излечимые). 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. Поэтому 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). *Источники рентгеновского излучения — изменяющие свои состояния электроны внутренних оболочек атомов или молекул, 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 толстую книгу, 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

$$t = \frac{m_{\odot}}{m_1} = 2 \cdot 10^{21} \text{ с} \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ лет.}$$



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 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 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-излучения 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.

## **§ 51. Радио- и СВЧ-волны в средствах связи**

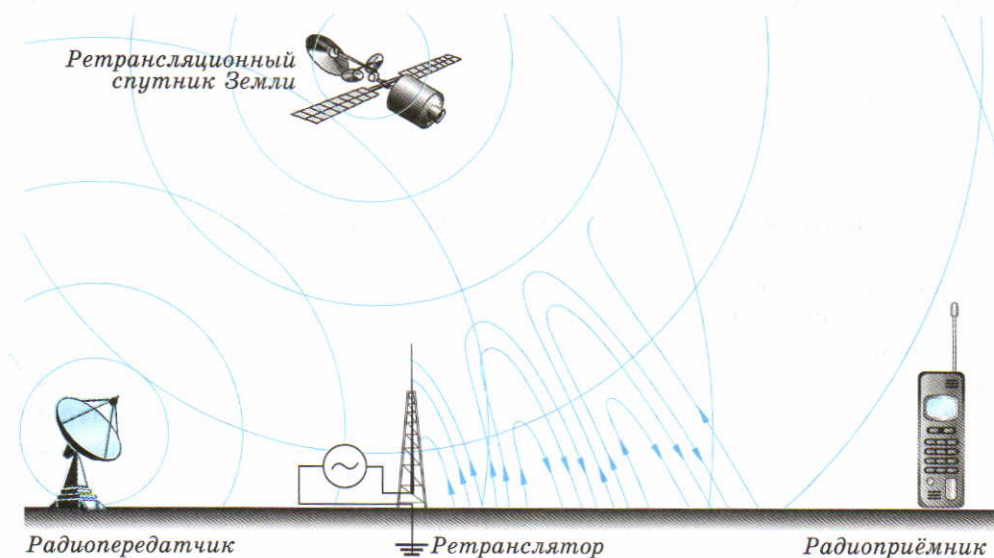
**Принципы радиосвязи.** Передача информации на расстояние с помощью электромагнитных сигналов часто осуществляется по проводам (радиотрансляционная, телеграфная, телефонная связь). Это оказывается энергетически выгодным, кроме того, такой способ связи обеспечивает высокое качество передачи информации. 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 существования радиоизлучателя). Поэтому передаваемая информация кодируется в радиосигнале. Для радиосвязи требуется *радиопередатчик*, излучающий радиоволны, переносящие необходимую закодированную информацию, и *радиоприёмник*, улавливающий и декодирующий (расшифровывающий) излучаемый передатчиком сигнал (рис. 160). 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. 6).



## ▲ 160

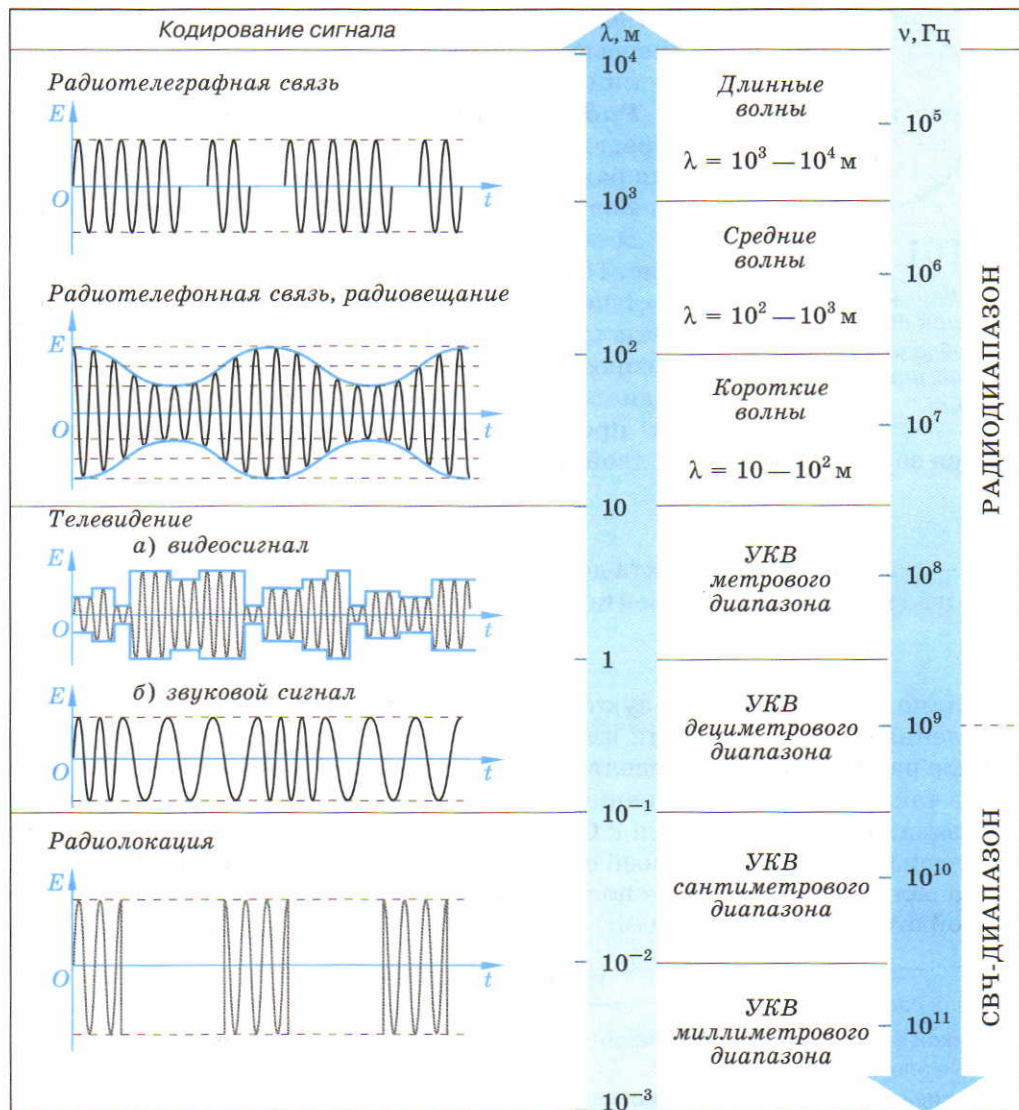
*Основные элементы радиосвязи*

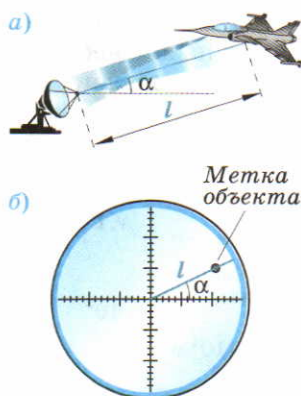


Средняя частота передаваемого радиосигнала называется *несущей частотой*. В таблице 6 приведён ориентировочный диапазон несущих частот и соответственно длин волн для различных видов радиосвязи.

Таблица 6

## Виды радиосвязи





### ▲ 161

**Радиолокация:**

*а) поиск объекта;*

*б) изображение объекта на электронно-лучевой трубке*

**Радиотелеграфная связь** осуществляется путём передачи сочетания точек и тире, кодирующего буквы алфавита в азбуке Морзе. 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.

Излученный радиолокатором и отражённый от объекта импульсы улавливаются антенной (рис. 161, а) и фиксируются на экране электронно-лучевой трубки (рис. 161, 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, локаций 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».

### ВОПРОСЫ

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?

## § 52. 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.

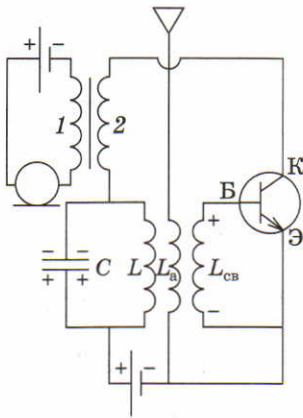
Колебания давления воздуха в звуковой волне сначала превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Однако, как отмечалось ранее, колебания звуковой частоты излучаться практически не будут. Поэтому для передачи звука используется излучение высокочастотных колебаний, один из параметров 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.**

Для амплитудной модуляции высокочастотного сигнала в цепь эмиттера генератора на транзисторе (см. рис. 151) последовательно с колебательным контуром включается вторичная обмотка 2 трансформатора модулирующего устройства. Кроме того, дополнительным элементом в передатчике (по сравнению с генератором на транзисторе) является антенна, индуктивно связанная с катушкой индуктивности  $L$  колебательного контура (рис. 162).



### ▲ 162

Принципиальная схема передатчика амплитудно-модулированных колебаний

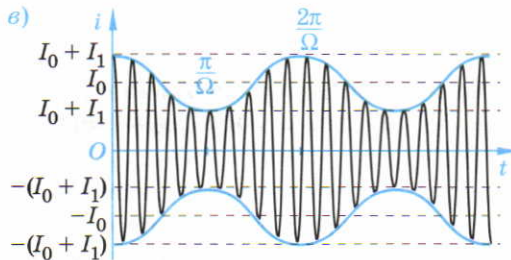
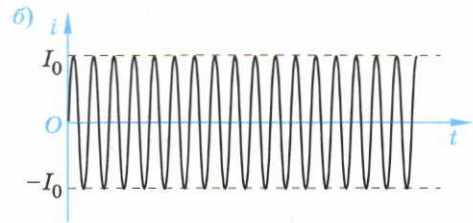
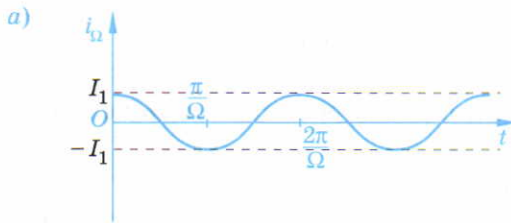
Если звуковой сигнал микрофона отсутствует, сила тока в колебательном контуре изменяется по гармоническому закону с несущей частотой  $\omega_0$ :

$$i = I_0 \cos \omega_0 t.$$

При появлении в цепи микрофона звукового сигнала частотой  $\Omega$  ( $\Omega \ll \omega_0$ ) на вторичной обмотке трансформатора возникает напряжение звуковой частоты  $\Omega$ . Это напряжение приводит к изменению амплитуды силы тока по закону  $i_\Omega = I_1 \cos \Omega t$  (рис. 163, а). В результате амплитуда высокочастотных колебаний (рис. 163, б) начинает изменяться по гармоническому закону с частотой  $\Omega$ :

$$i = (I_0 + I_1 \cos \Omega t) \cos \omega_0 t.$$

Такой сигнал можно рассматривать как гармонические колебания с медленно изменяющейся амплитудой, так как  $\Omega \ll \omega_0$  (рис. 163, в).



### ▲ 163

Амплитудно-модулированный сигнал:

а) звуковой сигнал передатчика; б) высокочастотный сигнал передатчика; в) модулированный сигнал; г) спектрограмма



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 амплитудно-модулированный сигнал 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 откладываются частота, а по вертикальной оси — амплитуда колебаний (рис. 163, з). 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.*

Максимальная частота звукового сигнала 20 кГц определяет ширину канала связи 40 кГц. Тогда в диапазоне средних волн  $3 \cdot 10^5$ — $3 \cdot 10^6$  Гц может находиться  $N_1$  независимых и не мешающих друг другу радиостанций:

$$N_1 = \frac{3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^5}{4 \cdot 10^4} = 67,5.$$

В то же время в УКВ-диапазоне  $3 \cdot 10^7$ — $3 \cdot 10^8$  Гц таких станций может быть

$$N_2 = \frac{3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^7}{4 \cdot 10^4} = 6750.$$

*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 (см. рис. 140). 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, содержащие передаваемую информацию. Высокочастотные колебания несущей частоты, как отмечалось выше, лишь переносят требуемую информацию, но не содержат её.

---

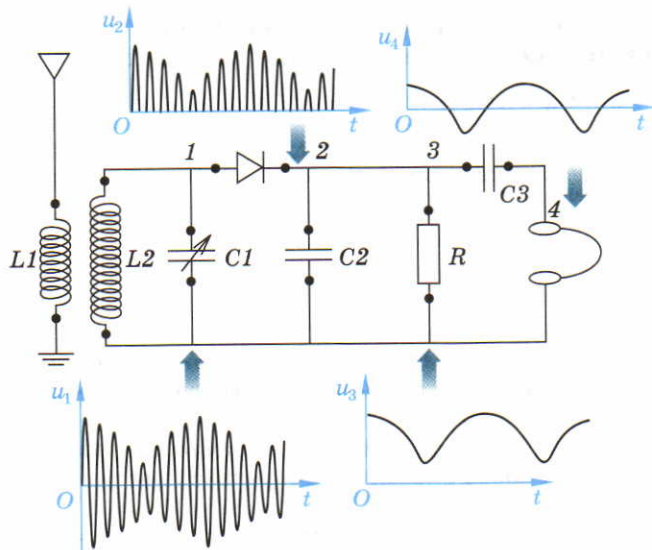
**Детектирование (или демодуляция) — процесс выделения низкочастотных (звуковых) колебаний из модулированных колебаний высокой частоты.**

---

В простейшем приёмнике демодуляция осуществляется в два этапа: сначала высокочастотные колебания выпрямляются, а затем выделяется низкочастотная огибающая высокочастотных импульсов. Схема простейшего приёмника представлена на рисунке 164. Выпрямление амплитудно-модулированного сигнала несущей частоты, выделенного колебательным контуром во входной цепи, осуществляется полупроводниковым диодом.

Высокочастотные импульсы напряжения подаются на параллельно соединённые конденсатор  $C2$  и резистор  $R$ . В период действия отдельного импульса, когда диод открыт, конденсатор заряжается. При закрытом диоде импульсный сигнал не подаётся на конденсатор, который в этот период разряжается через сопротивление  $R$ . Напряжение на конденсаторе при действии импульса и последующей паузе изменяется со временем так, как показано на рисунке 129, б. При прохождении через  $RC2$ -фильтр высокочастотных импульсов, модулированных звуковой частотой, напряжение на сопротивлении  $R$  изменяется со временем практически подобно низкочастотному сигналу на передающей радиостанции. Для полного совпадения этих сигналов положительный сигнал звуковой частоты, выделяемый на сопротивлении, на-



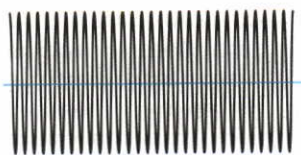


до сделать знакопеременным. Это совпадение сигналов осуществляется с помощью конденсатора  $C3$ , не пропускающего постоянную составляющую положительного тока. В результате демодуляции в приёмнике электрический сигнал звуковой частоты, идентичный сигналу, передаваемому радиостанцией, преобразуется мембраной телефона в звуковые колебания. В реальных схемах детекторных приёмников роль  $R$  играет телефон (наушники), а конденсатор  $C3$  не используется, так как постоянная составляющая сигнала не влияет на работу телефона.

**Частотная модуляция.** Постоянство несущей частоты сигнала, излучаемого радиостанцией, приводит к его низкой защищённости от помех. Даже слабые сигналы от калькулятора на данной частоте вызывают шумы, мешающие восприятию основного принимаемого радиосигнала. Для увеличения помехозащищённости передаваемого радиосигнала его несущая частота изменяется пропорционально амплитуде звукового информационного сигнала. Чем сильнее звуковой сигнал, тем больше несущая частота.

## 164

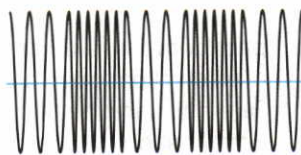
Схема простейшего радиоприёмника



а)



б)



в)

## 165

Частотная модуляция:  
 а) немодулированный высокочастотный несущий сигнал;  
 б) передаваемый звуковой сигнал;  
 в) радиосигнал

**Частотная модуляция — изменение частоты высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала:**

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t.$$

Частотная модуляция используется при передаче звуковых сигналов телевидения и УКВ-радиостанций (рис. 165).

### ВОПРОСЫ

1. В чём отличие радиовещания от радиотелефонной связи?
2. Какое изменение передаваемого сигнала называют амплитудной модуляцией? В чём отличие электрической схемы передатчика амплитудно-модулированных колебаний от схемы генератора на транзисторе?
3. Объясните последовательность формирования амплитудно-модулированного сигнала. Почему переход к вещанию на более высоких частотах позволяет увеличить число каналов передачи информации?
4. На примере схемы простейшего радиоприёмника объясните последовательность радиоприёма и детектирования высокочастотного модулированного радиосигнала.
5. Какое изменение передаваемого сигнала называют частотной модуляцией? В чём преимущество частотной модуляции перед амплитудной?

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**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 напряженности электрического поля:

$$w_{\text{эм}} = \varepsilon_0 E^2,$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

**Уравнение бегущей гармонической волны** для напряжённости электрического поля, распространяющегося в положительном направлении оси  $X$  со скоростью  $v$ :

$$E = E_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right).$$

**Длина волны** — кратчайшее расстояние между двумя возмущениями, колеблющимися в одинаковой фазе:

$$\lambda = vT.$$



- **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. 7):

- волны звуковых частот;
- радиоволны;
- СВЧ (микроволновое) излучение;
- инфракрасное (ИК) излучение;
- видимый свет;
- ультрафиолетовое (УФ) излучение;
- рентгеновское излучение;
- $\gamma$ -излучение.

Таблица 7

**Источники электромагнитного излучения различных диапазонов частот**

Диапазон частот	Источник излучения
Электромагнитные волны звуковых частот, радиоволны	Переменный ток
СВЧ (микроволновое) излучение	Изменение направления спина валентного электрона атома или скорости вращения молекул вещества
ИК-излучение	Колебания 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

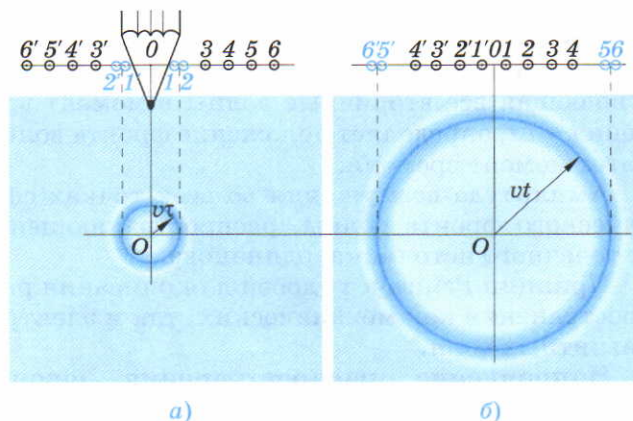
- **Радиосвязь** — передача и приём информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов. Различают **четыре вида радиосвязи**, отличающиеся типом кодирования передаваемого сигнала (см. табл. 6):
  - радиотелеграфная связь;
  - радиотелефонная связь и радиовещание;
  - телевидение;
  - 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.
- **Частотная модуляция** — изменение частоты высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.



### § 53. Принцип Гюйгенса

**Волна на поверхности воды от точечного источника.** Для изучения распространения электромагнитных волн в пространстве рассмотрим в качестве аналогии возникновение волны на воде, вызванной точечным источником. Если в воду в точке  $O$  быстро опускать (за промежуток времени  $t$ ) и сразу поднимать карандаш, то поверхность воды выводится из состояния равновесия. При этом силы поверхностного натяжения и силы тяжести восстанавливают равновесие. Возникает волна (рис. 166). 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  $t$  *передний фронт волны сжатия*, распространяющейся в воде со скоростью  $v$ , будет находиться от точки  $O$  на расстоянии  $vt$ .

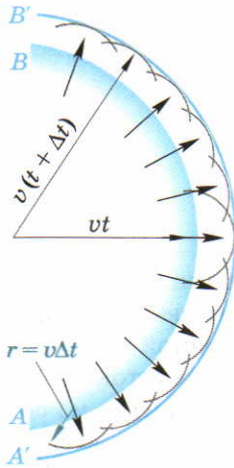
В каждой точке фронта волны возникает сжатие. Это эквивалентно тому, что в каждой точке фронта волны опускается и вынимается карандаш. В любой точке фронта есть как бы вторичный точечный источник.



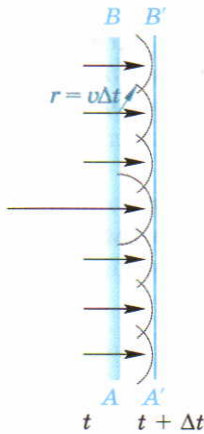
◀ 166

Волна на поверхности жидкости от точечного источника:

а) в момент времени  $t$ ;  
б) в момент времени  $t > \tau$



а)



б)

## ▲ 167

Фронт волны как огибающая вторичных волн:

- а) сферическая волна;  
б) плоская волна

**Передний фронт волны** — совокупность наиболее отдалённых от источника точек, до которых одновременно дошёл процесс распространения волны.

**Фронт механической волны** — совокупность точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

В 1678 г. голландский учёный *Христиан Гюйгенс* сформулировал этот результат следующим образом.

### Принцип Гюйгенса

Каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде.

*Огибающая вторичных волн определяет положение фронта волны в последующий момент времени.*

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. 167, а). 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.

Амплитуда возмущения во всех точках сферического фронта волны, распространяющейся от точечного источника, одинакова.

Принцип Гюйгенса удобен для описания распространения как механических, так и электромагнитных волн.

**Направление распространения фронта волны.** Вторичные механические волны — ре-



*зультат передачи возмущения соседним частицам среды. Вторичные электромагнитные волны — результат электромагнитной и магнитозлектрической индукции.*

Стрелки на рисунке 167, а показывают направление распространения фронта волны в каждой точке. Их направления (лучи) перпендикулярны фронту.

**Луч — вектор, перпендикулярный фронту волны, показывающий направление переноса энергии волны в данной точке.**

Положение фронта сферической волны в определённый момент времени однозначно определяется двумя лучами, выходящими из точечного источника.

На значительном расстоянии от точечного источника сферический фронт можно считать плоским.

*Амплитуда возмущения во всех точках плоского фронта волны одинакова. Положение фронта плоской волны в определённый момент времени определяется одним лучом, перпендикулярным плоскости фронта (рис. 167, б).*

В однородной среде направление распространения волны не изменяется.

В однородной среде волна распространяется во всех направлениях прямолинейно.

Для описания распространения электромагнитных волн в неограниченных средах *геометрическая* (лучевая) *оптика* рассматривает ход независимых световых лучей, подчиняющихся законам отражения и преломления.

## ВОПРОСЫ

1. Объясните механизм распространения передового фронта волны на воде.
2. Дайте определение фронта механической волны.
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса. Какие волны называют вторичными?
4. Поясните механизм образования сферического и плоского фронта волны. Что можно сказать об амплитуде возмущения на фронте этих волн?
5. Как можно определить положение фронта плоской и сферической волны?

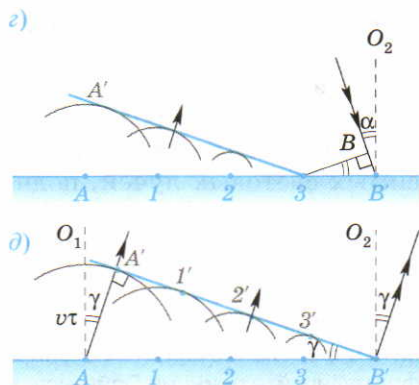
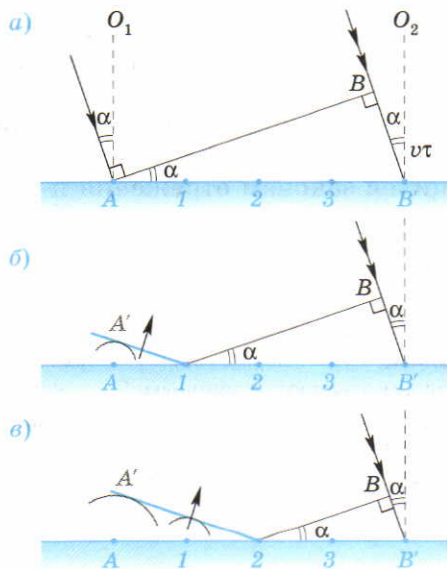
## § 54. Отражение волн

**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. 168,  $a$ ), и плоскость волны образует с поверхностью раздела угол  $\alpha$ . Угол между лучом и перпендикуляром  $O_2B'$  к границе раздела также 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. 168,  $b-d$ ), все они становятся источником вторичных волн. Фронт отражённой волны является плоской поверхностью, касательной к сферическим фронтам вторичных волн.



## 168

Возникновение отражённой волны:

- а) в точке  $A$ ;
- б) в точке  $1$ ;
- в) в точке  $2$ ;
- г) в точке  $3$ ;
- д) в точке  $B'$



Когда в момент времени  $\tau$  (рис. 168,  $\partial$ ) фронт волны достигает точки  $B'$ , вторичное излучение от точки  $A$  распространяется на расстояние  $AA' = vt$ . Положение фронта отражённой волны в этот момент времени определяется плоскостью, проходящей через точки  $A'$  и  $B'$ .

Из равенства прямоугольных треугольников  $AA'B'$  (рис. 168,  $\partial$ ) и  $AB'B'$  (рис. 168,  $a$ ) (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, полученный с помощью принципа Гюйгенса.

### Закон отражения волн

**Угол отражения равен углу падения.**

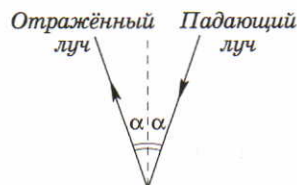
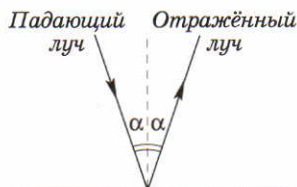
**Падающий луч, отражённый луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к отражающей поверхности, лежат в одной плоскости.**

Важным свойством лучей, в частности лучей света, является их *обратимость*. Если пустить падающий луч в направлении отражённого, то он отразится в направлении падающего (рис. 169).

Закон *зеркального отражения* справедлив для идеальной плоской поверхности. 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 (рис. 170). При этом в каждой точке поверхности выполняется закон отражения волн.

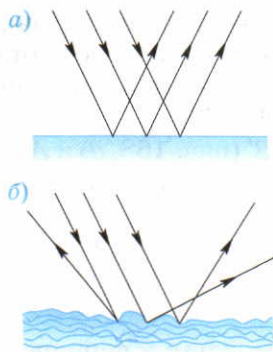
### Изображение предмета в плоском зеркале.

Построение изображения в плоском зеркале основано на использовании закона отражения волн. Рассмотрим точечный источник видимого



### ▲ 169

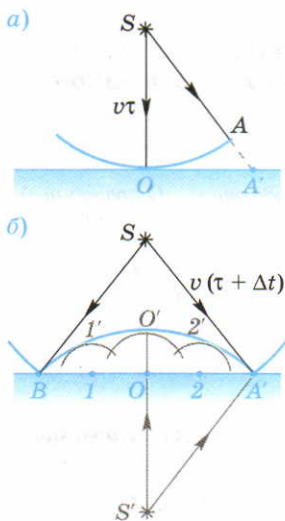
*Обратимость световых лучей*



### ▲ 170

Отражение света:

- а) зеркальное;  
б) диффузное



### ▲ 171

Отражение сферического волнового фронта от плоской поверхности:

- а) в точке  $O$ ;  
б) в точках  $B$  и  $A'$

света  $S$ , освещающий плоское зеркало. Волновым фронтом точечного источника является сфера (рис. 171).

Положение волнового фронта в произвольный момент времени характеризуют два луча  $SO$  и  $SA$ . В момент времени  $t = \tau$  волновой фронт достигает точки  $O$  (рис. 171, а). Ещё через время  $\Delta t$  фронт волны (рис. 171, б) касается точки  $A'$  ( $AA' = v\Delta t$ ). За этот промежуток времени отражения волна из точки  $O$  достигает точки  $O'$  ( $OO' = v\Delta t$ ).

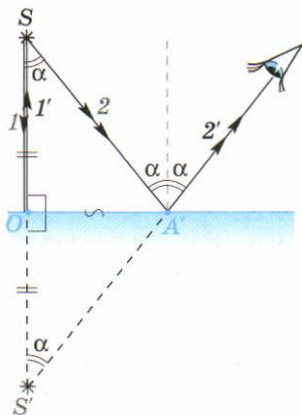
Огибающей поверхностью сферических вторичных волн является сфера. Фронт отражённой от плоского зеркала волны является сферическим, так же как и фронт падающей волны.

Центр отражённой сферической волны лежит за зеркалом, образуя пучок расходящихся лучей. Человеческому глазу, находящемуся в пространстве над зеркалом, кажется, что лучи  $S'O$  и  $S'A'$  выходят из одной точки, расположенной за зеркалом. Эта точка  $S'$  воспринимается глазом как мнимое изображение источника  $S$ .

**Мнимое изображение — изображение предмета, возникающее при пересечении продолжений расходящегося пучка лучей.**

Для построения изображения точечного источника, создающего сферический фронт волны, достаточно использовать два луча (рис. 172). Угол падения луча  $1$ , направленного перпендикулярно зеркалу, равен нулю, поэтому равен нулю и угол отражения. Луч  $2$ , падающий в точке  $A'$  под углом  $\alpha$ , отражается под тем же углом. Продолжения расходящихся лучей  $1'$  и  $2'$  пересекаются в точке  $S'$ , являющейся мнимым изображением точки  $S$ . Найдём расстояние  $S'O$ . Как видно из построения,  $\angle OSA' = \alpha$  как накрест лежащие углы при параллельных прямых, а  $\angle OS'A' = \alpha$  как соответственные. Следовательно,  $\triangle OS'A' = \triangle OSA'$  (по катету  $OA'$  и острому углу). Это означает, что  $OS' = OS$ .

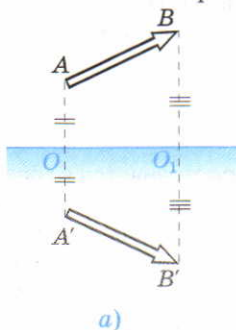




▲ 172

Построение изображения в плоском зеркале

$$AO = OA' \quad BO_1 = O_1B'$$

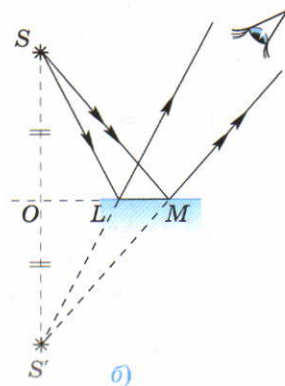


а)

▲ 173

Изображение предмета:

а) конечных размеров; б) в небольшом зеркале



б)

**Мнимое изображение точечного источника в плоском зеркале находится в зеркально симметричной точке.**

Изображение источника конечных размеров строится как совокупность изображений всех его точек. Однако для построения изображения прямой светящейся стрелки  $AB$  достаточно построить изображения крайних точек, которые затем соединяются отрезком прямой  $A'B'$  (рис. 173, а).

Изображение источника находится в симметричной точке даже в том случае, если зеркало имеет конечные размеры и не находится между предметом и его изображением (рис. 173, б). В этом случае изображение предмета можно наблюдать лишь из ограниченной области. Для определения границ этой области вначале находят мнимое изображение предмета  $S$  в симметричной точке  $S'$ , а затем из этой точки проводят лучи через крайние точки зеркала  $L$  и  $M$ . Из области между этими, отражёнными от зеркала, лучами и можно наблюдать мнимое изображение  $S'$  предмета  $S$ . Если точечный источник  $S$  — Солнце, то в этой области видны солнечные зайчики.

ВОПРОСЫ

1. Дайте определение угла падения волны и угла её отражения.
2. Сформулируйте закон отражения света и докажите его с помощью принципа Гюйгенса.
3. В чём состоит принцип обратимости лучей?

- Объясните с помощью принципа Гюйгенса отражение сферического волнового фронта от плоской поверхности.
- Какое изображение называют мнимым? Объясните, как строится изображение точечного источника и предмета конечных размеров в зеркале, а также точечного источника в небольшом зеркале.

### ЗАДАЧИ

- Пучок параллельных лучей распространяется в горизонтальном направлении (вправо) в плоскости чертежа. Как необходимо расположить плоское зеркало, чтобы после отражения от него пучок шёл вертикально вверх? [45°]
- Луч света падает под углом  $\alpha$  на зеркало, плоскость которого расположена перпендикулярно плоскости чертежа. На какой угол повернётся отражённый луч при повороте зеркала относительно горизонтальной оси на угол  $\beta$ ? [2 $\beta$ ]
- Какой наименьшей высоты должно быть зеркало и каким образом оно должно быть расположено на вертикальной стене, чтобы человек ростом  $H$  видел себя в зеркале во весь рост? [0,5  $H$ ]
- Человек ростом  $H = 1,8$  м, стоя на берегу озера, видит в воде отражение Луны, находящейся под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонту. На каком расстоянии от берега человек видит в воде отражение Луны? [3,1 м]
- Точечный источник света расположен между двумя плоскими зеркалами, расположенными под углом  $45^\circ$  друг к другу. Постройте все изображения источника в зеркалах. Сколько их будет? [7]

## § 55. Преломление волн

**Закон преломления.** В дальнейшем, говоря о распространении волн в пространстве, мы будем рассматривать для определённости световые волны видимого диапазона.

На границе раздела двух сред свет, падающий из первой среды, отражается в неё обратно. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу раздела сред. При этом, как правило, он меняет направление распространения, или испытывает *преломление*.

**Преломление — изменение направления распространения волны при прохождении из одной среды в другую.**

Выведем закон преломления с помощью принципа Гюйгенса. Обозначим скорость волны в первой среде через  $v_1$ , а во второй через  $v_2$ .

Рассмотрим процесс возникновения преломленной волны (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. 174, *a*).

Фронт падающей волны образует с поверхностью раздела угол  $\alpha$ . Таков же угол падения волны. В момент времени  $\tau$  точка  $B$  фронта волны попадает в точку  $B'$  ( $BB' = v_1\tau$ ). Вторичная волна от точки  $A$  за это же время распространяется на расстояние  $AA' = v_2\tau$ . На рисунке 174, *a* показаны фронты вторичных волн, распространяющихся из точек  $A$ , 1, 2, 3. Огибающей этих волн является плоский фронт  $A'B'$  преломлённой волны.

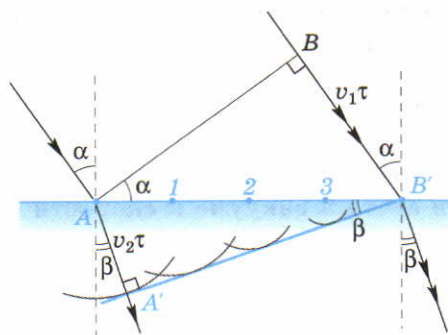
Проведём преломлённые лучи в точках  $A$  и  $B'$  перпендикулярно фронту  $A'B'$ , составляющие с перпендикулярами к границе раздела угол  $\beta$ .

**Угол преломления — угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к границе раздела, восстановленным в точке падения.**

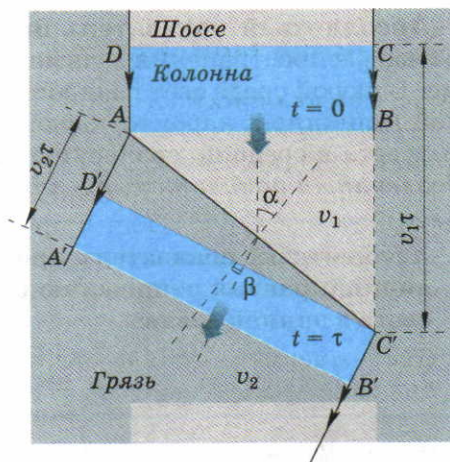
Рассмотрим прямоугольные треугольники  $AA'B'$  и  $ABB'$ .

Углы  $\angle AB'A'$  и  $\beta$  равны как углы с соответственно перпендикулярными сторонами. Приравнивая выражения для гипотенузы  $AB'$ , общей для  $\triangle AA'B'$  и  $\triangle ABB'$ , получаем:

$$\frac{v_1\tau}{\sin \alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin \beta}.$$



*a)*



*б)*

▲ 174

Преломление плоской волны:

*a)* возникновение преломлённой волны; *б)* изменение направления пути колонны

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:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (162)$$

Падающий луч, преломлённый луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.

*Преломление волн при переходе из одной среды в другую вызвано тем, что скорости распространения волн в этих средах различны.*

Можно наблюдать изменение направления распространения фронта колонны  $ABCD$ , идущей по асфальтовому шоссе, если, начиная с границы  $AC'$ , она попадёт в грязь (рис. 174, б). Это происходит потому, что скорость  $v_2$  каждого участника движения по грязи заметно меньше скорости  $v_1$  его движения по асфальту. На рисунке 174, б показаны расположения колонны в моменты времени:  $t = 0$ , когда первый участник  $A$  колонны попадает в грязь, и  $t = \tau$ , когда в неё попадает последний участник  $C$  ( $BC' = v_1 \tau$ ;  $AA' = v_2 \tau$ ).

**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:**

$$n = \frac{c}{v}. \quad (163)$$

*Абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость распространения света в данной среде меньше, чем скорость света в вакууме:*

$$v = \frac{c}{n}. \quad (164)$$



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 (164) для двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , можно представить закон преломления в следующем виде.

### Закон преломления

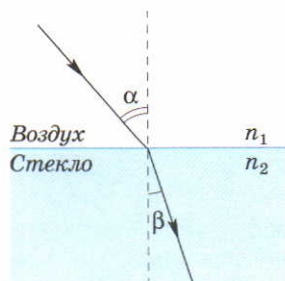
**Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению абсолютных показателей преломления второй среды к первой:**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (165)$$

Если луч света переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную ( $n_1 < n_2$ ), то угол преломления оказывается меньше угла падения ( $\beta < \alpha$ ).

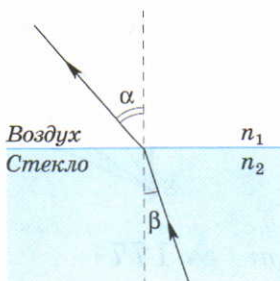
Преломлённый луч ближе прижимается к перпендикуляру к границе раздела, чем падающий (рис. 175, а).

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. 175, б).



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

а)



$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2}$$

б)

### ◀ 175

*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 среду*

Таблица 8

**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

При переходе луча света из вакуума ( $n_1 = 1$ ) в среду с показателем преломления  $n_2 = n$  закон преломления можно записать следующим образом:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (166)$$

Измеряя угол падения  $\alpha$  и угол преломления  $\beta$ , с помощью формулы (166) можно найти абсолютный показатель преломления среды.

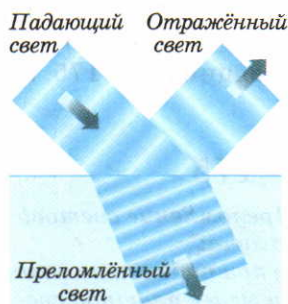
Значения абсолютного показателя преломления некоторых сред приведены в таблице 8.

**Полное внутреннее отражение.** 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. 176).

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. 177). С ростом угла падения  $\alpha$  возрастает угол преломления  $\beta$  ( $\beta > \alpha$ ), а также интенсивность отражённого луча.

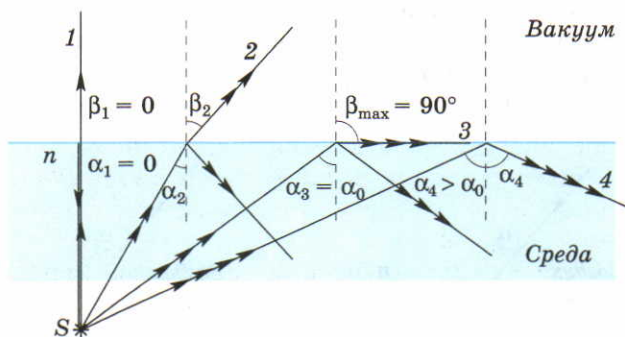
При некотором угле падения  $\alpha_0$  угол преломления достигает своего максимального значения  $\beta_{\max} = 90^\circ$  (луч 3).

При некотором угле падения  $\alpha_0$  угол преломления достигает своего максимального значения  $\beta_{\max} = 90^\circ$  (луч 3).



### ▲ 176

Одновременное отражение и преломление света



### ▲ 177

Полное внутреннее отражение



В соответствии с законом преломления света (165):

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \alpha_0 = \arcsin \left( \frac{1}{n} \right).$$

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:

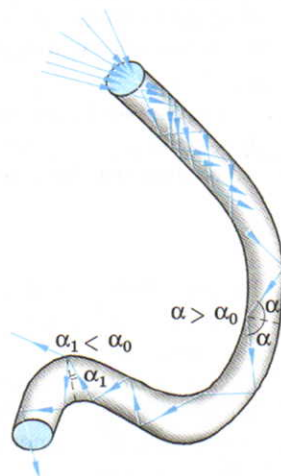
$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{1,52} = 42^\circ.$$

Испытывая полное внутреннее отражение, световой сигнал может распространяться внутри гибкого стекловолокна (световода). Свет может покинуть волокно лишь при больших начальных углах падения и при значительном изгибе волокна (рис. 178). 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.



▲ 178

*Распространение света в световоде*

Мы отмечали ранее (см. § 51), что 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, а также в светоотражателях (катафотах), обеспечивающих безопасную стоянку и движение автомобилей.

### ВОПРОСЫ

1. Какое физическое явление называют преломлением света? Какой угол называют углом преломления?
2. Сформулируйте закон преломления света и докажите его с помощью принципа Гюйгенса.
3. Какую физическую величину называют абсолютным показателем преломления? Что она характеризует?
4. 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?
5. Какое физическое явление называют полным внутренним отражением? Как вычислить угол полного внутреннего отражения? Как используется полное внутреннее отражение в волоконной оптике?

### ЗАДАЧИ

1. Найдите скорость распространения света в алмазе. [1,24 · 10<sup>8</sup> м/с]
2. Длина волны зелёного света в воздухе  $\lambda = 540$  нм. Какой будет длина волны этого излучения в воде? [405 нм]
3. Луч света падает из воздуха в воду под углом 60°. Найдите угол между отражённым и преломлённым лучами. [79°]
4. При каком угле падения  $\alpha$  луча из воды в стекло отражённый луч перпендикулярен преломлённому? [48,4°]
5. На дне пруда глубиной 40 см сидит лягушка, прячущаяся под круглым листом, который плавает на поверхности воды. Каким должен быть минимальный радиус листа, чтобы лягушку не увидели преследователи, находящиеся над поверхностью воды? [45 см]



## § 56. Дисперсия света

**Призма Ньютона.** 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.

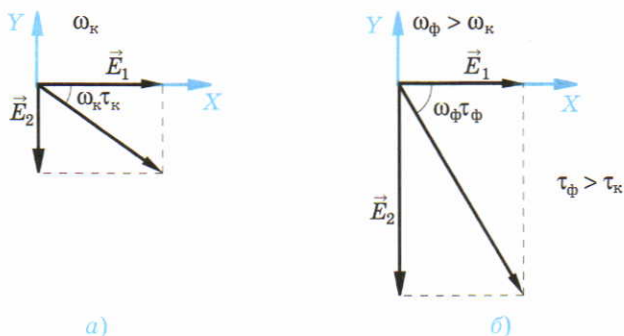
Монохроматические волны разных частот распространяются в одной среде с различными скоростями.

**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. 288). 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, видимый и 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 света 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. 288) приведена зависимость абсолютного показателя преломления стекла (флинтгласа) от длины волны света.

**Объяснение явления дисперсии.** Выясним, почему скорость распространения света в веществе и, следовательно, абсолютный показатель преломления зависит от частоты света. Рассмотрим распространение све-



### ▲ 179

*Зависимость времени запаздывания световой волны от амплитуды вторичной волны  $E_2$ :*

*а) малая амплитуда  $E_2$ ; б) большая амплитуда  $E_2$*

та в прозрачной среде. Под действием напряжённости  $\vec{E}_1$  электрического поля световой волны валентные электроны атомов среды начинают совершать вынужденные гармонические колебания с частотой, равной частоте колебаний вектора  $\vec{E}_1$ . Колеблющиеся электроны начинают с определённым временем запаздывания излучать вторичные волны той же частоты и напряжённости  $\vec{E}_2$  (рис. 179). Результирующая волна (сумма первичной  $\vec{E}_1$  и вторичной  $\vec{E}_2$  волн) также запаздывает по сравнению с первичной волной. Чем больше амплитуда вторичной волны, тем больше время запаздывания, тем меньше скорость распространения и больше абсолютный показатель преломления среды.

Амплитуда вторичной волны является амплитудой вынужденных колебаний валентного электрона атома и, согласно формуле (131) (см. Ф-10), зависит от частоты  $\omega$  следующим образом:

$$E_2 \sim \frac{1}{|\omega_0^2 - \omega^2|},$$

где  $\omega_0$  — частота собственных колебаний, или (по порядку величины) угловая скорость вращения электрона вокруг ядра.

С ростом частоты ( $\omega < \omega_0$ ) знаменатель дроби уменьшается, а амплитуда вторичной волны возрастает. При этом увеличивается время запаздывания, уменьшается скорость распространения волны и возрастает абсолютный показатель преломления среды. Такую дисперсию называют *нормальной*.

*При нормальной дисперсии абсолютный показатель преломления среды возрастает с ростом частоты света (и соответственно убывает с ростом длины волны).*



## ВОПРОСЫ

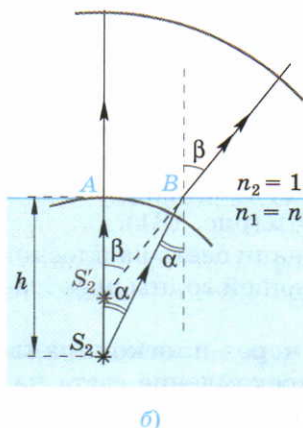
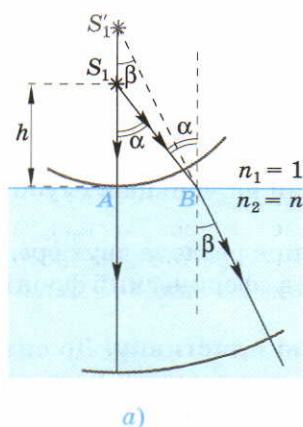
1. Какую волну называют монохроматической?
2. Какое физическое явление называют дисперсией?
3. Какая зависимость абсолютного показателя преломления стекла от частоты следует из опыта Ньютона?
4. Как время запаздывания световой волны зависит от амплитуды вторичной волны? Как амплитуда вторичной волны зависит от частоты света?
5. Какая дисперсия называется нормальной?

## § 57. Построение изображений и хода лучей при преломлении света

**Изображение точечного источника.** Построение изображений при преломлении света основано на использовании закона преломления волн.

Рассмотрим сначала точечный источник света  $S_1$  (рис. 180, а), находящийся в воздухе ( $n_1 = 1$ ) на расстоянии  $S_1A = h$  от границы оптически более плотной среды  $n_2 = n$ . Сферический фронт волны, распространяющейся из точки  $S_1$ , определяется лучами  $S_1A$  и  $S_1B$ . Углы падения этих лучей равны  $0$  и  $\alpha$ , а углы преломления  $0$  и  $\beta$  соответственно. Продолжения лучей (определяющих положение сферического фронта преломленной волны) расходящегося пучка пересекаются в точке  $S'_1$ , являющейся мнимым изображением точки  $S_1$ . Найдём расстояние  $S'_1A$  от мнимого изображения до границы раздела:

$$S'_1A = \frac{AB}{\operatorname{tg} \beta}.$$



### 180

*Изображение точечного источника:*  
 а) находящегося в оптически менее плотной среде;  
 б) находящегося в оптически более плотной среде

Так как  $AB = h \operatorname{tg} \alpha$ , то  $S_1'A = h \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}$ .

При малых углах  $\alpha$  и  $\beta$  можно считать, что  $\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$  и  $\operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta$ . Тогда

$$S_1'A = h \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = nh.$$

При наблюдении точечного источника из более плотной среды наблюдателю будет казаться, что источник расположен от границы раздела в  $n$  раз дальше, чем он находится на самом деле.

Рассмотрим теперь точечный источник света  $S_2$ , находящийся в жидкости с показателем преломления  $n_1 = n$  на глубине  $h$  (рис. 180, б). Найдём изображение источника при наблюдении его из менее плотной среды (например, из воздуха ( $n_2 = 1$ )).

Сферический фронт волны, распространяющейся из точки  $S_2$ , определяется лучами  $S_2A$  и  $S_2B$ . Углы падения этих лучей равны  $0$  и  $\alpha$ , а углы преломления  $0$  и  $\beta$  соответственно. Продолжения лучей (определяющих положение сферического фронта преломлённой волны) расходящегося пучка пересекаются в точке  $S_2'$ , являющейся мнимым изображением точки  $S_2$ . Расстояние, на котором находится мнимое изображение от поверхности жидкости,  $S_2'A = \frac{AB}{\operatorname{tg} \beta}$ .

Учитывая, что  $AB = h \operatorname{tg} \alpha$ , получаем  $S_2'A = h \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}$ .

Согласно закону преломления  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n}$ .

Тогда при малых  $\alpha$  и  $\beta$   $\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$ , а  $\operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta$ .

Следовательно,  $S_2'A = \frac{h}{n}$ .

При наблюдении точечного источника из менее плотной среды наблюдателю будет казаться, что источник расположен в  $n$  раз ближе к границе раздела, чем он находится на самом деле. Вследствие этого эффекта предметы, находящиеся в воде, кажутся расположенными на меньшей глубине, чем в действительности (рис. 181).

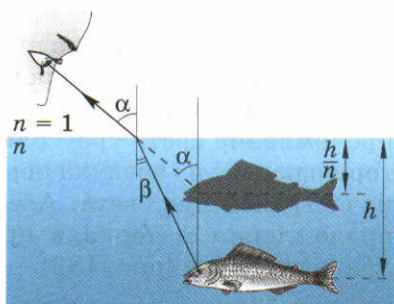
В целом при преломлении света на плоской границе раздела двух сред сферический фронт падающей волны преобразуется в сферический фронт преломлённой волны.

**Прохождение света через плоскопараллельную пластинку.** До сих пор мы рассматривали преломление света на одной поверхности раздела неограниченных сред. Изучим теперь особенности последовательного пре-





а)



б)

◀ 181

*Преломление света в жидкости:  
а) кажущаяся форма предмета;  
б) мнимое изображение рыбы*

ломления света на нескольких границах раздела прозрачных ограниченных сред.

Предположим, что луч света падает из воздуха ( $n_1 = 1$ ) под углом  $\alpha$  на прозрачную плоскопараллельную пластинку ( $n_2 = n$ ) толщиной  $d$  (рис. 182). Найдём, под каким углом  $\varphi$  луч выйдет в воздух после преломления в пластинке. Воспользуемся законом преломления (см. формулу (166)) на верхней границе пластинки:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Угол падения луча в точке  $O_2$  на нижней границе пластинки равен углу преломления  $\beta$  на её верхней границе как накрест лежащие углы при параллельных прямых (перпендикулярах к границам раздела в точках  $O_1$  и  $O_2$ ). Поэтому закон преломления на нижней границе имеет вид:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \varphi} = \frac{1}{n}.$$

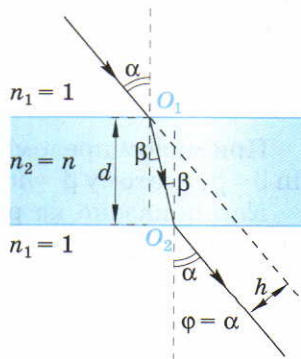
Перемножая левые и правые части законов преломления на обеих границах, получаем

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} = 1, \text{ т. е. } \varphi = \alpha.$$

*Луч, прошедший плоскопараллельную пластину, выходит из неё параллельно направлению падения.*

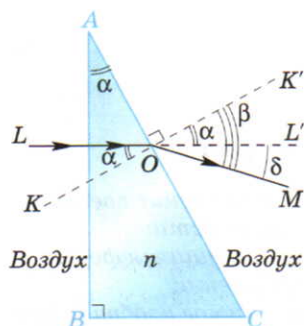
Боковое смещение луча  $h$  пропорционально толщине пластинки  $d$ .

То, что угол выхода луча равен углу падения на пластину, можно было доказать и по принципу обратимости лучей. Если луч падает из пер-



▲ 182

*Прохождение света через плоскопараллельную пластинку*



### ▲ 183

Преломление света  
призмой с малым  
преломляющим углом  
( $\alpha < \alpha_0$ )

вой среды под углом  $\alpha$  и преломляется во второй под углом  $\beta$ , то, падая из второй среды под углом  $\beta$ , луч будет преломляться в первой под углом  $\alpha$ .

**Преломление света призмой.** Рассмотрим преломление света треугольной призмой, на которую падает из воздуха перпендикулярно одной из её граней луч света. Абсолютный показатель преломления материала призмы  $n$ , её преломляющий угол  $\alpha$  (рис. 183).

**Преломляющий угол призмы — угол между гранями призмы, на которых происходит преломление света.**

Предположим сначала, что преломляющий угол призмы меньше угла полного внутреннего отражения:

$$\alpha < \alpha_0.$$

Найдём угол отклонения  $\delta$  луча от первоначального направления падения после преломления луча призмой.

При нормальном падении на грань  $AB$  призмы луч не преломляется, падая на вторую преломляющую грань  $AC$  под углом  $\alpha$  ( $\angle LOK = \angle BAC = \alpha$  как углы с соответственно перпендикулярными сторонами). Угол преломления  $\beta = \angle KOM$  на грани  $AC$  найдём из закона преломления:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n}.$$

При малом преломляющем угле призмы  $\alpha$  можно считать, что  $\sin \alpha \approx \alpha$ ,  $\sin \beta \approx \beta$ , поэтому  $\beta \approx n\alpha$ .

Как показано на рисунке 183, *треугольная призма отклоняет луч, падающий на неё из воздуха к основанию*. Угол отклонения луча  $\delta = \beta - \alpha$ .

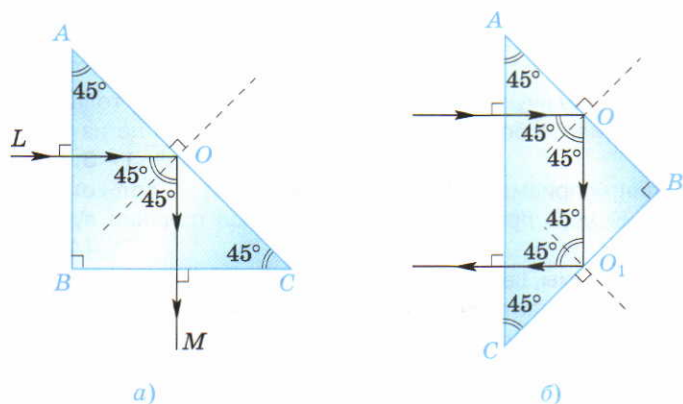
Тогда

$$\delta = \alpha(n - 1). \quad (167)$$

Чем больше преломляющий угол призмы и абсолютный показатель преломления вещества, из которого она сделана, тем больше она отклоняет луч от первоначального направления.

Рассмотрим теперь преломление света треугольной призмой с преломляющим углом, большим угла полного внутреннего отражения  $\alpha > \alpha_0$ .




**184**

Призма полного внутреннего отражения:  
 а) поворот луча на  $90^\circ$ ;  
 б) отражение луча  
 (поворот на  $180^\circ$ )

Пусть для определённости призма стеклянная ( $\alpha_0 = 42^\circ$ ), а  $\alpha = 45^\circ$  (рис. 184, а). Луч, нормально падающий на грань  $AB$ , не преломляется на ней. Его угол падения на грань  $AC$  равен  $45^\circ > \alpha_0$ , поэтому в точке  $O$  он испытывает полное внутреннее отражение. На грань  $BC$  отражённый луч падает перпендикулярно и не преломляется, выходя из призмы под углом  $90^\circ$  к направлению падения. Такую призму называют *поворотной*, так как она поворачивает луч на угол  $90^\circ$ .

При падении луча на грань поворотной призмы, проектирующуюся в сечении в гипотенузу  $AC$ , падающий луч в результате двух отражений от граней  $AB$  и  $BC$  изменяет направление на противоположное (рис. 184, б). Возникает обращение светового луча.

### ВОПРОСЫ

1. Где находится изображение точечного источника, наблюдаемого из оптически более плотной среды?
2. Где находится изображение точечного источника, наблюдаемого из оптически менее плотной среды?
3. В чём особенность преломления света плоскопараллельной пластинкой?
4. Какой угол призмы называют преломляющим? Как угол отклонения луча, падающего на призму, зависит от её преломляющего угла и коэффициента преломления?
5. Как используется призма полного внутреннего отражения для поворота и обращения луча?

### ЗАДАЧИ

1. Толщина стекла зеркала ( $n = 1,5$ )  $d = 1$  см. Задняя часть зеркала посеребрена. На каком расстоянии от наружной части зеркала будет находиться изображение предмета, удалённого от неё на 50 см. **[51,3 см]**

2. В сосуд вначале наливают воду ( $n_1 = 1,33$ ) до высоты  $h_1 = 4$  см, а поверх неё доверху — бензин ( $n_2 = 1,5$ ) с высотой столба  $h_2 = 6$  см. Чему равна кажущаяся глубина сосуда? [7 см]
3. Луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ) толщиной  $d = 10$  см под углом  $\alpha = 60^\circ$ . Найдите боковое смещение луча на выходе из пластинки.  $[d \sin \alpha (1 - \cos \alpha / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}) = 5,1 \text{ см}]$
4. Луч света выходит из стеклянной призмы ( $n = 1,5$ ) под тем же углом, под которым падает на неё. Преломляющий угол призмы  $60^\circ$ . Найдите угол падения луча на призму. [48,6°]
5. На одну из граней стеклянной призмы, сечением которой является правильный треугольник, параллельно основанию падает луч света определённой частоты. На какой угол относительно первоначального направления падения он отклоняется после преломления призмой? [47°]

## § 58. Линзы

**Геометрические характеристики.** Преломление света на плоских границах пространственно ограниченных прозрачных сред (плоскопараллельная пластинка, призма) приводит к смещению изображений относительно самих предметов. При этом размер изображения остаётся равным размеру предмета. Отличие размера изображения  $H$  от размера предмета  $h$  наблюдается лишь при преломлении света на криволинейных прозрачных поверхностях и характеризуется линейным увеличением оптической системы.

**Линейное увеличение оптической системы — отношение линейного размера изображения к соответствующему линейному размеру предмета:**

$$\Gamma_0 = \frac{H}{h}. \quad (168)$$

Для увеличенного изображения ( $H > h$ )  $\Gamma_0 > 1$ , при уменьшенном изображении ( $H < h$ )  $\Gamma_0 < 1$ . В случае совпадения размера изображения с размером предмета ( $H = h$ )  $\Gamma_0 = 1$ .

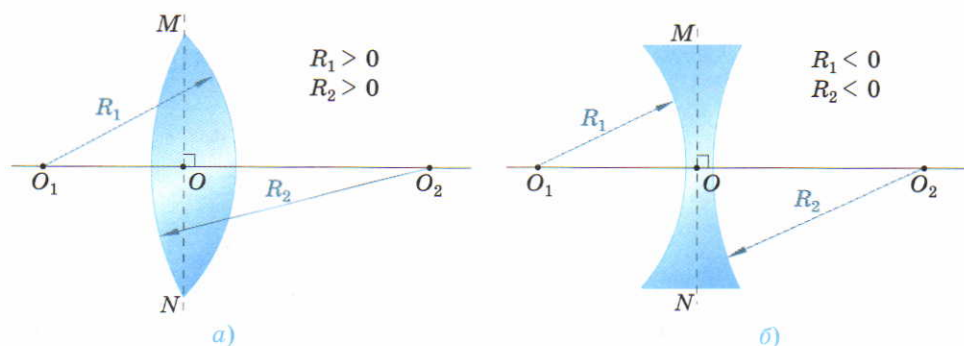
Важнейшим элементом многочисленных оптических приборов и систем, начиная от очков и кончая гигантскими телескопами, является *линза*.

Дадим определение геометрических характеристик линзы.

*Главная оптическая ось — прямая, на которой лежат центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу (рис. 185).*

Главная оптическая ось  $O_1O_2$  является осью симметрии линзы.





## ▲ 185

Геометрические характеристики линзы:

а) двояковыпуклая линза; б) двояковогнутая линза

**Линза — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.**

Главная плоскость линзы — плоскость, проходящая через оптический центр линзы (точку  $O$ ) перпендикулярно главной оптической оси.

**Типы линз.** На рисунке 185, а главная плоскость  $MN$  проходит через линию пересечения сферических поверхностей с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , называемыми *радиусами кривизны*. Будем считать, что для сферической поверхности, выпуклой относительно главной плоскости, радиус кривизны положителен.

Для сферической поверхности, вогнутой относительно главной плоскости, радиус кривизны отрицателен (рис. 185, б).

Одна из ограничивающих поверхностей линзы может быть плоской. Плоскую поверхность можно рассматривать как частный случай сферической, радиус кривизны которой стремится к бесконечности.

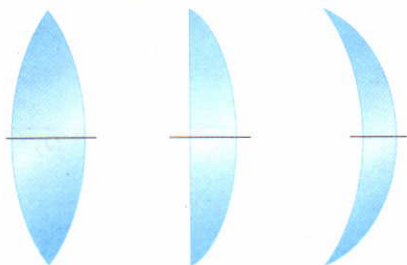
По форме ограничивающих поверхностей различают шесть типов линз (рис. 186):

- двояковыпуклая;
- плоско-выпуклая;
- вогнуто-выпуклая;
- двояковогнутая;
- плоско-вогнутая;
- выпукло-вогнутая.

Выпуклые линзы являются *собирающими* (мы покажем это далее).

**Собирающие линзы — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся.**

## Собирающие линзы



$$R_1 > 0$$

$$R_2 > 0$$

1

$$R_1 > 0$$

$$R_2 \rightarrow \infty$$

2

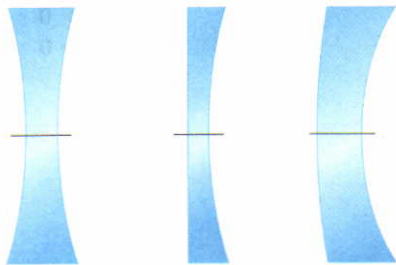
$$R_1 < 0$$

$$R_2 > 0$$

$$|R_1| > R_2$$

3

## Рассеивающие линзы



$$R_1 < 0$$

$$R_2 < 0$$

4

$$R_1 \rightarrow \infty$$

$$R_2 < 0$$

5

$$R_1 > 0$$

$$R_2 < 0$$

$$R_1 > |R_2|$$

6

## ▲ 186

Типы линз: 1 — двояковыпуклая; 2 — плоско-выпуклая; 3 — вогнуто-выпуклая; 4 — двояковогнутая; 5 — плоско-вогнутая; 6 — выпукло-вогнутая

Вогнутые линзы являются рассеивающими.

**Рассеивающие линзы** — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в расходящийся.

В дальнейшем для простоты мы будем рассматривать преломление световых лучей тонкими линзами.

**Тонкая линза** — линза, толщина которой пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны её поверхности ( $l \ll R_1, R_2$ ).

## В О П Р О С Ы

1. Дайте определение линейного увеличения оптической системы. Что оно характеризует?
2. Дайте определение главной оптической оси и главной плоскости линзы.
3. Охарактеризуйте шесть типов линз, отличающихся формой ограничивающих поверхностей. Как определяется знак радиуса кривизны этих поверхностей?
4. В чём отличие собирающих и рассеивающих линз?
5. Какая линза называется тонкой?



## § 59. Собирающие линзы

**Фокусное расстояние, оптическая сила.** Рассмотрим, как преломляется пучок лучей, параллельных главной оптической оси (рис. 187, а), при падении на плоско-выпуклую тонкую линзу (с показателем преломления  $n$  и радиусом кривизны  $R$ ). Условно линзу можно представить как совокупность призм с различными углами преломления, поэтому будет различным и преломление луча, попадающего на каждую из призм. Луч 1, направленный вдоль главной оси, не преломляется, так как падает практически на плоскопараллельную пластинку.

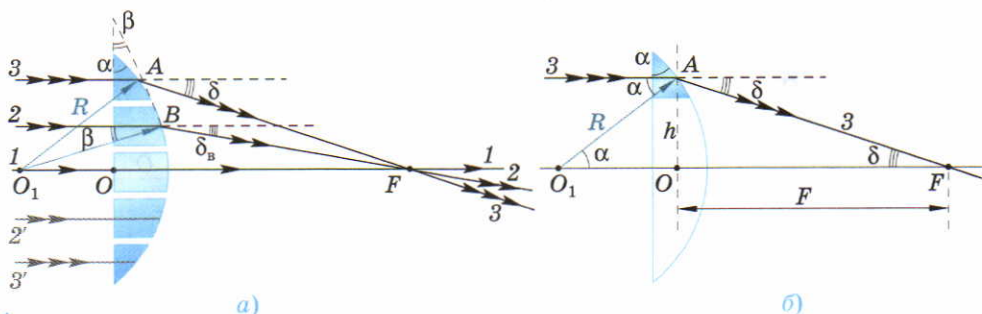
Преломляющий угол призмы 2 равен  $\beta$ , поэтому после прохождения призмы луч 2 отклоняется от первоначального направления на угол  $\delta_B = \beta(n - 1)$  (см. формулу (169)). Преломлённый луч 2 пересекает главную оптическую ось в точке  $F$ .

Луч 3 падает на призму 3, имеющую преломляющий угол  $\alpha$ . После её прохождения преломлённый луч 3 отклоняется от горизонтали на угол  $\delta = \alpha(n - 1)$ .

При этом  $\delta > \delta_B$ . Можно показать, что и луч 3 пересекает главную оптическую ось в точке  $F$ , называемой *главным фокусом линзы*.

**Главный фокус собирающей линзы — точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно главной оптической оси, после преломления их в линзе.**

*Фокусное расстояние* (обозначаемое как и главный фокус  $F$ ) — расстояние от главного фокуса до центра линзы.



### ▲ 187

Преломление собирающей линзой лучей, параллельных главной оптической оси:

а) главный фокус линзы;

б) связь фокусного расстояния с радиусом кривизны линзы

Покажем, что фокусное расстояние линзы связано с её радиусом кривизны (рис. 187, б). Для этого рассмотрим преломление луча  $Z$  на части линзы — призме с преломляющим углом  $\alpha$ . Луч падает в точке  $A$  под углом  $\alpha$  и отклоняется от горизонтали (первоначального направления его падения) на угол  $\delta$ , равный  $\angle AFO$ , как накрест лежащие углы при параллельных прямых. Радиус кривизны линзы  $O_1A = R$  в точке  $A$  совпадает по направлению с перпендикуляром к преломляющей грани призмы и составляет с оптической осью  $O_1O$  угол  $\alpha$ .

Угол  $\delta$  можно найти из  $\triangle AOF$ :  $\operatorname{tg} \delta = h/F$ , а угол  $\alpha$  из  $\triangle AO_1O$ :  $\sin \alpha = h/R$ .

Для тонкой линзы углы преломления  $\alpha$  (и соответственно  $\delta$ ) столь малы, что можно считать  $\sin \alpha \approx \alpha = h/R$ , а  $\operatorname{tg} \delta \approx \delta = h/F$ .

Тогда, учитывая связь  $\delta$  и  $\alpha$ , находим

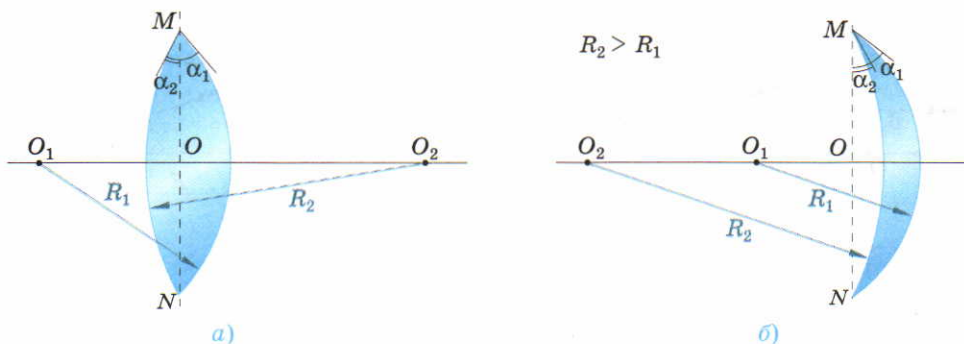
$$\frac{h}{F} = (n - 1) \frac{h}{R}.$$

Сокращая на  $h$ , получаем

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \frac{1}{R}. \quad (169)$$

*Фокусное расстояние плоско-выпуклой линзы в вакууме определяется радиусом кривизны её поверхности и абсолютным показателем преломления материала линзы.*

Любую выпуклую линзу можно рассматривать как совокупность двух плоско-выпуклых линз. Для двояковыпуклой линзы полный преломляющий угол  $\alpha$  складывается из преломляющих углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  двух плоско-выпуклых линз (рис. 188, а). Для вогнуто-выпуклой линзы прелом-



### ▲ 188

*Собирающие линзы как совокупность двух плоско-выпуклых линз: а) двояковыпуклая линза; б) вогнуто-выпуклая линза*



ляющий угол определяется разностью преломляющих углов  $\alpha_1 - \alpha_2$  двух плоско-выпуклых линз (рис. 188, б).

Для двояковыпуклой тонкой линзы луч, параллельный главной оптической оси, вблизи точки  $M$  отклоняется от оси на угол

$$\delta = (n - 1)(\alpha_1 + \alpha_2), \quad (170)$$

а для вогнуто-выпуклой тонкой линзы

$$\delta = (n - 1)(\alpha_1 - \alpha_2). \quad (171)$$

Считая так же, как и для одной плоско-выпуклой линзы,  $\delta = h/F$ ,  $\alpha_1 = h/R_1$ ,  $\alpha_2 = h/R_2$ , находим:

для двояковыпуклой тонкой линзы

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (172)$$

для выгнуто-выпуклой тонкой линзы

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (173)$$

Наличие в формулах (169), (172), (173) величины  $1/F$  привело к введению *оптической силы линзы*.

**Оптическая сила — величина, обратная фокусному расстоянию линзы:**

$$D = \frac{1}{F}. \quad (174)$$

Чем сильнее линза преломляет параллельные лучи, т. е. чем меньше её фокусное расстояние, тем больше оптическая сила линзы.

Единица оптической силы — *диоптрия* (дптр).

Диоптрия — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Оптическая сила для любой собирающей линзы может быть представлена формулой:

$$D = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (175)$$

Формула (175) является обобщением выражений (169), (172), (173). Действительно, для плоско-выпуклой линзы  $R_2 \rightarrow \infty$  ( $1/R_2 = 0$ ), а для вогнуто-выпуклой линзы можно считать, что радиус кривизны вогнутой поверхности отрицателен, т. е.  $R_2 < 0$  ( $|R_2| > R_1$ , поэтому  $\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} > 0$ ).

Для собирающих линз оптическая сила положительна:  $D > 0$ .

**Основные лучи для собирающей линзы.** Рассмотрение преломления световых лучей собирающей тонкой линзой позволяет выделить важнейшие *характерные лучи*, достаточные для построения хода любого луча, падающего на линзу, а также для получения изображения предмета в линзе.

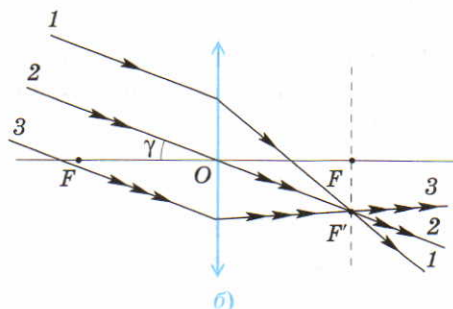
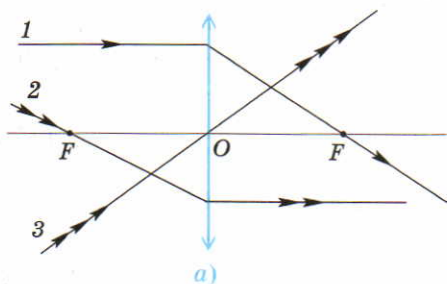
- *Луч, параллельный главной оптической оси*, преломляясь в линзе, проходит через её главный фокус.
- *Луч, проходящий через главный фокус* (по принципу обратимости лучей), после преломления в линзе идёт параллельно главной оптической оси.
- *Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы*, проходит через нее, не преломляясь. Это объясняется тем, что такой луч падает практически на плоскопараллельную пластинку. Ввиду того что линза тонкая, незначительным параллельным отклонением преломлённого луча можно пренебречь.

На рисунке 189, *а* приведён ход характерных лучей для собирающей линзы и использовано её условное обозначение.

Как мы установили ранее, лучи, параллельные главной оптической оси, падающие на линзу, преломляясь, пересекаются в главном фокусе.

Если пучок параллельных лучей падает на собирающую линзу под небольшим углом  $\gamma$  к главной оптической оси, то преломлённые лучи пересекаются в одной точке  $F'$  фокальной плоскости линзы, называемой *побочным фокусом* (рис. 189, *б*). (Доказательство этого утверждения, подобное выводу формулы (169), мы для краткости не приводим.)

**Фокальная плоскость линзы — плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси.**

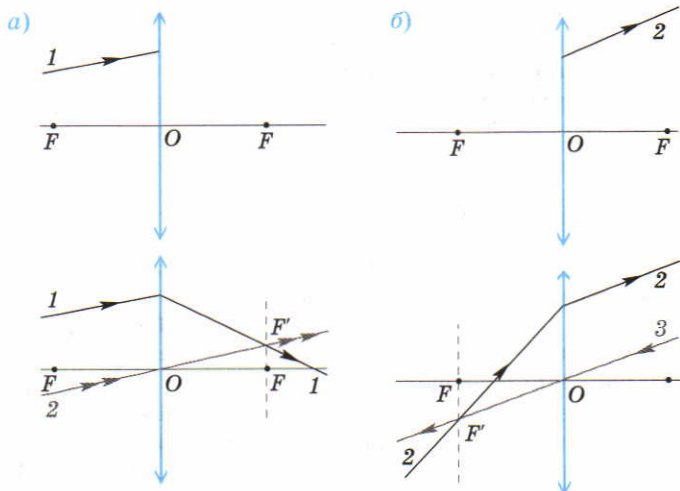


### ▲ 189

Основные лучи для собирающей линзы:

*а) характерные лучи; б) параллельные лучи*




**190**

*Построение хода лучей в собирающей линзе:  
а) построение преломлённого луча;  
б) построение падающего луча*

Положение побочного фокуса определяется пересечением луча 2, проходящего через оптический центр  $O$  линзы с фокальной плоскостью, находящейся за линзой.

Известные свойства характерных и параллельных лучей позволяют построить ход произвольного луча 1, падающего на собирающую линзу с фокусным расстоянием  $F$  (рис. 190, а). Для определения направления преломлённого луча воспользуемся лучом 2, проходящим через оптический центр  $O$  параллельно падающему лучу 1. Луч 2 проходит линзу, не преломляясь, пересекая фокальную плоскость в побочном фокусе  $F'$ .

Согласно свойству параллельных лучей после преломления луч 1 также пройдёт через этот побочный фокус.

Найдем теперь направление падающего луча, если известен ход преломлённого луча 2 (рис. 190, б). По принципу обратимости лучей данную задачу можно свести к предыдущей, считая, что известно направление падающего на линзу луча. Тогда, повторяя предыдущее построение с помощью луча 3, проходящего через оптический центр  $O$  линзы параллельно лучу 2, получим побочный фокус  $F'$ , через который проходит искомый падающий луч 2.

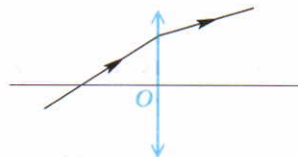
### В О П Р О С Ы

1. Объясните, как преломляются лучи, параллельные главной оптической оси, плоско-выпуклой линзой. Дайте определение главного фокуса и фокусного расстояния линзы.
2. Как связано фокусное расстояние плоско-выпуклой линзы с радиусом кривизны её поверхности и абсолютным коэффициентом преломления материала линзы?

- Какая величина называется оптической силой? В каких единицах она измеряется?
- Как зависит оптическая сила линзы от её абсолютного коэффициента преломления и радиусов кривизны ограничивающих её поверхностей?
- Перечислите и нарисуйте основные характерные лучи в собирающей линзе. Сформулируйте свойство параллельных лучей, падающих на собирающую линзу под углом к главной оптической оси.

### ЗАДАЧИ

- Плоско-выпуклая линза из пластика ( $n = 1,58$ ) имеет радиус кривизны поверхности 11,6 см. Найдите фокусное расстояние линзы и её оптическую силу. [20 см; 5 дптр]
- Найдите оптическую силу стеклянной ( $n = 1,5$ ) плоско-выпуклой линзы диаметром  $d = 4$  см, имеющей в центральной части толщину  $H = 2$  мм. [4,95 дптр]
- Плоско-выпуклая линза имеет ограничивающую сферическую поверхность радиусом 12 см. Фокусное расстояние линзы 24 см. Найдите абсолютный показатель преломления материала, из которого сделана линза. [1,5]



- Двояковыпуклая линза сделана из стекла ( $n_1 = 1,5$ ) с радиусами кривизны  $R_1 = R_2 = 0,1$  м. Найдите её оптическую силу в воздухе и в воде ( $n_2 = 1,33$ ). [10 дптр; 2,56 дптр]

- Известен ход падающего и преломлённого собирающей линзой лучей (рис. 191). Найдите построением главный фокус линзы слева и справа от неё.

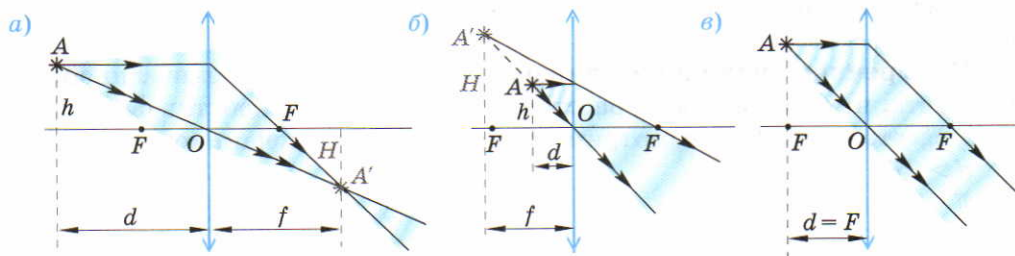
▲ 191

## § 60. Изображение предмета в собирающей линзе

**Типы изображений.** Изображение протяжённого предмета складывается из изображений отдельных точек этого предмета. Поэтому рассмотрим сначала изображение светящейся точки  $A$ , находящейся на расстоянии  $h$  от главной оптической оси и на расстоянии  $d$  ( $d > F$ ) от линзы (рис. 192, а). Точка  $A$  излучает расходящуюся сферическую световую волну. Положение сферического фронта световой волны, излучаемой точкой  $A$ , определяется двумя лучами, выходящими из этой точки. Удобно выбрать характерные лучи: луч 1, падающий параллельно главной оптической оси, и луч 2, проходящий через оптический центр линзы. Пересечение этих лучей, преломлённых линзой, происходит в точке  $A'$ , являющейся *действительным* изображением точки  $A$ , находящейся на расстоянии  $f$  от линзы.

**Действительное изображение точки  $A$  — точка  $A'$ , в которой сходится после преломления в линзе пучок лучей, испускаемых точкой  $A$ .**





## ▲ 192

Формирование изображений в собирающей линзе:

- а) действительное изображение ( $d > F$ ); б) мнимое изображение ( $d < F$ );  
 в) преобразование пучка лучей ( $d = F$ )

На экране, помещённом в точке  $A'$ , видна светящаяся точка.

Собирающая линза преобразует расходящийся сферический волновой фронт от точечного источника в сходящийся в точке за линзой волновой фронт, если источник света находится за фокусным расстоянием.

Найдём изображение светящейся точки  $A$ , расположенной между главным фокусом и линзой  $d < F$  (рис. 192, б). Для этого используем те же характерные лучи, что и в предыдущем случае. Преломляясь, они образуют расходящийся пучок лучей, выходящий из точки  $A'$ , являющейся *мнимым* изображением точки  $A$ .

**Мнимое изображение точки  $A$  — точка  $A'$ , в которой пересекаются после преломления в линзе продолжения расходящегося пучка лучей, как бы (мнимо) испускаемых точкой  $A$ .**

На экране, помещённом в точке  $A'$ , реальной светящейся точки нет.

В результате преломления света собирающая линза преобразует расходящийся сферический волновой фронт от точечного источника  $A$  в расходящийся сферический фронт, распространяющийся как бы от мнимого изображения  $A'$ , если источник света находится между линзой и главным фокусом.

Если светящаяся точка  $A$  находится в фокальной плоскости ( $d = F$ ), то характерные лучи после преломления в линзе идут параллельно друг другу. Это означает, что преломлённые лучи не пересекаются или, как говорят, пересекаются на бесконечности (рис. 192, в).

Если источник света находится в фокальной плоскости, собирающая линза в результате преломления преобразует расходящуюся сфе-

рическую волну, излучаемую источником, в плоскую преломлённую волну.

**Поперечное увеличение линзы.** Построим изображение линейного предмета, находящегося на расстоянии  $d$  от собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F$ . Рассмотрим последовательно случаи, когда:

- $d > 2F$ ;
- $F < d < 2F$ ;
- $d < F$ .

Изображение линейного предмета  $AB$  в линзе находится путём построения изображений его крайних точек. Вначале строится изображение точки  $A$ , не находящейся на главной оптической оси.

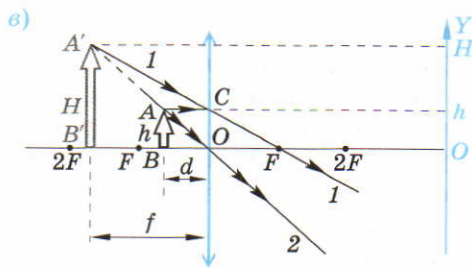
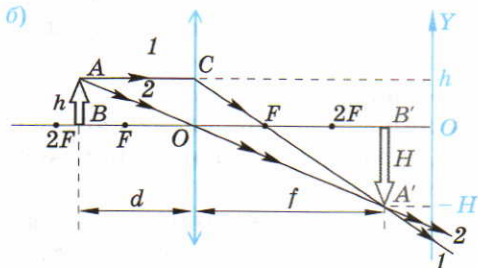
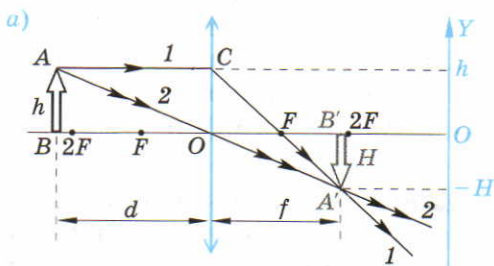
Для построения изображения точки  $A$  предмета воспользуемся, как и ранее, двумя характерными лучами: лучом 1, параллельным главной оптической оси, и лучом 2, проходящим через оптический центр  $O$  линзы (рис. 193).

Построив изображение  $A'$ , опускаем перпендикуляр на главную оптическую ось и находим точку  $B'$ , являющуюся изображением точки  $B$ .

## 193

Изображения линейного предмета в собирающей линзе ( $AB$  — предмет,  $A'B'$  — изображение):

- а)  $d > 2F$  — действительное, уменьшенное, перевёрнутое;  
 б)  $F < d < 2F$  — действительное, увеличенное, перевёрнутое;  
 в)  $d < F$  — мнимое, увеличенное, прямое





На рисунке 193 приведены возможные типы изображения  $A'B'$  предмета  $AB$  в собирающей линзе.

Для характеристики размера и ориентации изображения относительно предмета используют *поперечное увеличение линзы*.

**Поперечное увеличение линзы** — отношение координаты изображения к координатам предмета, отсчитываемым перпендикулярно главной оптической оси (в поперечном направлении):

$$\Gamma = \frac{y_f}{y_d}. \quad (176)$$

Если предмет находится за двойным фокусом линзы (рис. 193, а), то  $y_d = h$ ,  $y_f = H$ ,  $H < h$ . При этом *действительное изображение предмета оказывается перевернутым* ( $\Gamma < 0$ ) и *уменьшенным* ( $|\Gamma| < 1$ ).

Если предмет находится между главным фокусом и двойным фокусом линзы (рис. 193, б), то  $y_d = h$ ,  $y_f = H$ ,  $H > h$ . При  $F < d < 2F$  *действительное изображение предмета является перевернутым* ( $\Gamma < 0$ ) и *увеличенным* ( $|\Gamma| > 1$ ).

Если предмет находится между главным фокусом и линзой (рис. 193, в), то  $y_d = h$ ,  $y_f = H$ ,  $H > h$ . При  $d < F$  *мнимое изображение предмета является прямым* ( $\Gamma > 0$ ) и *увеличенным* ( $|\Gamma| > 1$ ).

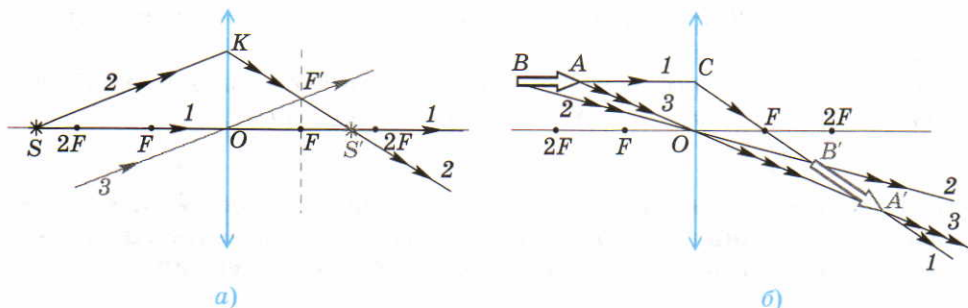
Таким образом, знак и модуль поперечного увеличения определяет взаимную ориентацию и относительный размер предмета и его изображения в линзе.

*При прямом изображении предмета в линзе поперечное увеличение положительно* ( $\Gamma > 0$ ), *а при перевернутом — отрицательно* ( $\Gamma < 0$ ).

*При увеличенном изображении предмета в линзе модуль поперечного увеличения больше единицы* ( $|\Gamma| > 1$ ), *а при уменьшенном — меньше единицы* ( $|\Gamma| < 1$ ).

**Построение изображений в собирающей линзе.** Рассмотрим наиболее характерные примеры построения изображений предметов в линзе, а также графического определения фокусного расстояния и расположения линзы.

*Точечный источник света, находящийся на главной оптической оси* (например, при  $d > 2F$ ) (рис. 194, а). Для построения изображения точечного источника  $S$  необходимо найти ход двух лучей, идущих от источника после преломления их линзой. Точка их пересечения  $S'$  определяет положение изображения предмета. В качестве одного из этих лучей можно



### ▲ 194

*Построение изображений: а) точечного источника; б) линейного предмета*

взять луч 1 ( $SO$ ), падающий на линзу вдоль главной оптической оси и не испытывающий преломления. Это означает, что изображение  $S'$  точки  $S$  лежит на главной оптической оси. В качестве второго луча возьмём произвольный луч 2 ( $SK$ ). Для построения преломлённого луча  $KS'$  воспользуемся свойством параллельных лучей (см. рис. 189, а). Луч 3, параллельный лучу  $SK$ , проходящий через центр  $O$  линзы, не преломляясь, пересекает её фокальную плоскость в точке  $F'$ . Через эту же точку должен пройти луч 2, пересекающийся с лучом 1 в точке  $S'$ , являющейся изображением точки  $S$ .

*Линейный предмет, расположенный параллельно главной оптической оси.* При построении изображения линейного предмета можно отдельно построить изображения его крайних точек, соединив их затем прямой линией. Однако более рациональным является другой способ построения (рис. 194, б). В качестве падающего луча, общего для точек  $A$  и  $B$ , удобно выбрать луч 1, проходящий через стрелку  $AB$ . Луч 1 после преломления в линзе проходит через фокус. Именно на этом преломлённом луче находится изображение точек  $A$  и  $B$ , и соответственно изображение  $A'B'$  всего предмета. Для построения крайних точек  $A'$  и  $B'$  изображения воспользуемся лучами 2 и 3, выходящими из точек  $A$  и  $B$  и проходящими через центр  $O$  линзы без преломления. Пересечения этих лучей с преломлённым лучом 1 определяют размер изображения  $A'B'$  предмета.

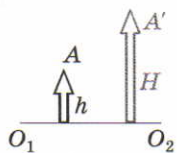
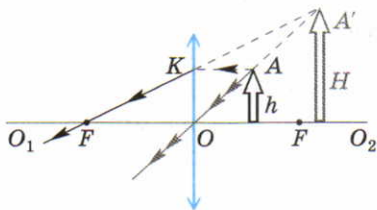
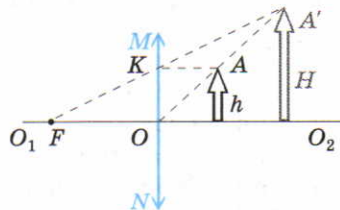
*Графическое определение положения оптического центра и главного фокуса линзы.* Если известны положение и размер предмета и изображения, можно найти построением расположение линзы и её фокусное расстояние. Предположим, что предмет  $h$  и его изображение  $H$  в собирающей линзе располагаются относительно главной оптической оси линзы



так, как это показано на рисунке 195, *а*. В этом случае изображение предмета является увеличенным и прямым. Такое изображение возникает в собирающей линзе, если предмет располагается между линзой и её главным фокусом (см. рис. 193, *в*). Сравнение рисунков 195, *а* и 193, *в* показывает, что линза должна находиться слева от предмета. Для удобства построим изображение такого предмета в линзе с известным фокусным расстоянием  $F$  (рис. 195, *б*) с помощью характерных лучей 1 и 2. По аналогии с рисунком 195, *б* выполним построение хода лучей (рис. 195, *в*). Пересечение продолжения прямой  $A'A$  с главной оптической осью даёт положение оптического центра  $O$  и главной плоскости линзы  $MN$ . Проведём из точки  $A$  линию  $AK$ , параллельную  $O_1O_2$ , до пересечения с плоскостью  $MN$ . Пересечение продолжения прямой  $A'K$  с главной оптической осью будет главным фокусом линзы. Подобным образом можно находить положение и фокусное расстояние линзы при любых типах изображения предмета.

### ВОПРОСЫ

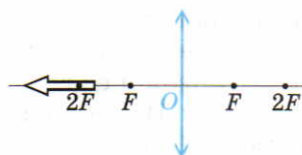
1. Какие типы изображений возможны в собирающей линзе? Какие преобразования фронта волн, идущего от точечного источника, возможны в такой линзе?
2. Дайте определение поперечного увеличения линзы. Как величина поперечного увеличения собирающей линзы зависит от расстояния предмета до линзы?
3. Где находится изображение точечного источника, помещённого на главной оптической оси собирающей линзы?
4. Где находится изображение предмета, расположенного параллельно главной оптической оси собирающей линзы между фокусом и линзой?
5. Зная предмет и его действительное изображение в собирающей линзе (рис. 195, *а*), найдите построением оптический центр и главный фокус линзы.

*а)**б)**в)*

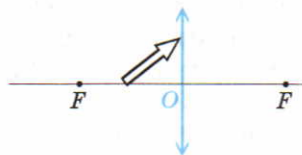
### ▲ 195

*Графическое определение фокусного расстояния:*

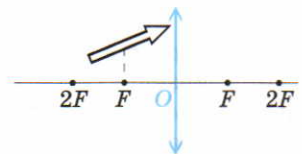
- а) предмет  $h$  и его изображение  $H$ ; б) построение изображения предмета; в) определение фокусного расстояния*



▲ 196

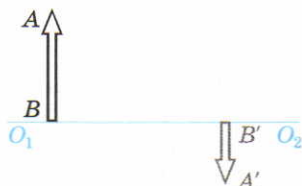


▲ 197

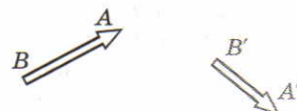


▲ 198

- ВОПРОСЫ
1. Постройте изображение предмета, находящегося на главной оптической оси линзы (рис. 196).
  2. Постройте изображение предмета, находящегося между фокусом и оптическим центром линзы (рис. 197).
  3. Постройте изображение предмета, расположенного над главной оптической осью над фокусом (рис. 198).
  4. Найдите графически оптический центр и главный фокус собирающей линзы, если известно, что  $AB$  — предмет,  $A'B'$  — его изображение,  $O_1O_2$  — главная оптическая ось собирающей линзы (рис. 199).
  5.  $AB$  — предмет,  $A'B'$  — его изображение в собирающей линзе (рис. 200). Найдите построением оптический центр линзы, положение её главной оптической оси и главный фокус линзы.



▲ 199



▲ 200

## § 61. Формула тонкой собирающей линзы

**Предмет за фокусом линзы ( $d > F$ ).** Введя основные характеристики изображения предмета в линзе, рассчитаем теперь, где оно находится. Расстояние  $f$  от изображения до линзы, как мы видели из рисунка 193, зависит от расстояния  $d$  предмета до линзы и её фокусного расстояния  $F$ . Найдём взаимосвязь между  $d$ ,  $F$  и  $f$ , называемую *формулой тонкой линзы*. Для этого запишем дважды модуль поперечного увеличения линзы из подобия треугольников на рисунке 193, а.

$\triangle AOB \sim \triangle A'OB'$ , поэтому

$$|\Gamma| = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \quad (177)$$

а  $\triangle CFO \sim \triangle A'FB'$ , тогда

$$|\Gamma| = \frac{H}{h} = \frac{f - F}{F}. \quad (178)$$



Приравнивая правые части равенств (177) и (178), получаем

$$\frac{f}{d} = \frac{f - F}{F}.$$

Разделив на  $f$  обе части последнего равенства, получаем

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f}.$$

Формула тонкой линзы имеет вид:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (179)$$

Формула тонкой линзы получена нами для случая  $d > 2F$ . Однако она может быть выведена аналогично и при  $F < d < 2F$  (рис. 193, б).

**Предмет между линзой и фокусом ( $d < F$ ).** Рассмотрим теперь случай  $d < F$  (см. рис. 193, в)  $\triangle AOB \sim \triangle OA'B'$ , поэтому

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{d},$$

а  $\triangle CFO \sim \triangle FB'A'$ , тогда

$$\frac{H}{h} = \frac{f + F}{F}.$$

Приравнивая выражения для отношения  $\frac{H}{h}$ , получаем формулу тонкой линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}. \quad (180)$$

Сравнение выражений (179) и (180) показывает, что для расчётов удобно использовать лишь одну формулу тонкой линзы (179) для любых расстояний от предмета до линзы. Однако, если изображение оказывается мнимым ( $d < F$ ), считают, что  $f$  отрицательно ( $f < 0$ ). Как видно из рисунка 193, действительное изображение находится с другой стороны от линзы, чем предмет ( $f > 0$ ), а мнимое — с той же стороны ( $f < 0$ ).

**Характеристики изображений в собирающих линзах.** Выясним с помощью формулы линзы, на каком расстоянии  $f$  от линзы с фокусным расстоянием  $F$  находится изображение предмета, расположенного на произвольном расстоянии от линзы. Из формулы (179) находим

$$f = \frac{Fd}{d - F}. \quad (181)$$

Для построения графика  $f(d)$  преобразуем последнее выражение, добавив и вычтя  $F^2$  в числителе дроби. Тогда

$$f = \frac{Fd - F^2 + F^2}{d - F} = \frac{F(d - F) + F^2}{d - F}.$$

Окончательно,

$$f = F + \frac{F^2}{d - F}. \quad (182)$$

Графиком зависимости  $f(d)$  является гипербола, сдвинутая на  $F$  вверх по оси ординат и вправо по оси абсцисс (рис. 201, а). При  $d = 0$ ,  $f = 0$ , а при  $d = 2F$ ,  $f = 2F$ . Область  $d < 0$  не имеет физического смысла, так как  $d$  всегда положительно.

Определим теперь *поперечное увеличение линзы* при различных расстояниях  $d$  предмета от линзы, т. е. найдём зависимость  $\Gamma(d)$ . Сравнение формул (176) и (177) показывает, что

$$\Gamma = -\frac{f}{d}. \quad (183)$$

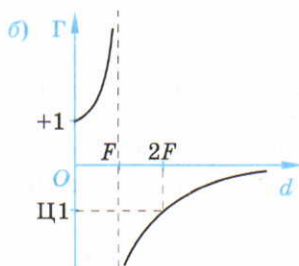
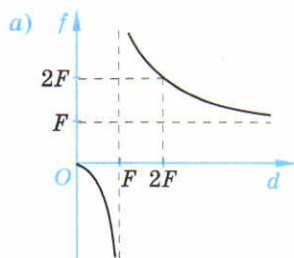
Подставляя в формулу (183) вместо  $f$  выражение (181), получаем

$$\Gamma(d) = -\frac{F}{d - F}. \quad (184)$$

Графиком зависимости  $\Gamma(d)$  является отрицательная гипербола, смещённая по оси абсцисс вправо на  $F$  (рис. 201, б). Результаты анализа графиков  $f(d)$  и  $\Gamma(d)$  приведены в таблице 9.

## ВОПРОСЫ

1. Выведите формулу линзы для случая, когда предмет находится за фокусом линзы ( $d > F$ ).
2. Выведите формулу линзы для случая, когда предмет находится между фокусом и линзой ( $d < F$ ).



## ▲ 201

*Характеристики изображений в собирающей линзе:*

- а) расстояние от изображения до линзы;  
б) поперечное увеличение



Таблица 9

**Характеристики изображений в собирающих линзах в зависимости от расстояния  $d$  от предмета до линзы**

Предмет		Изображение		
Расстояние от линзы $d$	Расстояние от линзы $f$	Тип	Ориентация	Относительный размер
$d > 2F$	$F < f < 2F$	Действительное	Перевернутое ( $\Gamma < 0$ )	Уменьшенное ( $ \Gamma  < 1$ )
$d = 2F$	$f = 2F$	Действительное	Перевернутое ( $\Gamma < 0$ )	Того же размера ( $ \Gamma  = 1$ )
$F < d < 2F$	$f > 2F$	Действительное	Перевернутое ( $\Gamma < 0$ )	Увеличенное ( $ \Gamma  > 1$ )
$d = F$	$f = \pm\infty$			
$d < F$	$f < 0;  f  < d$	Мнимое	Прямое ( $\Gamma > 0$ )	Увеличенное ( $ \Gamma  > 1$ )

3. При каком условии можно использовать формулу линзы, пригодную для любых расстояний от предмета до линзы?
4. Нарисуйте график зависимости  $f(d)$  для собирающей линзы и охарактеризуйте возможные типы изображений.
5. Нарисуйте график зависимости поперечного увеличения собирающей линзы и охарактеризуйте возможные типы изображений.

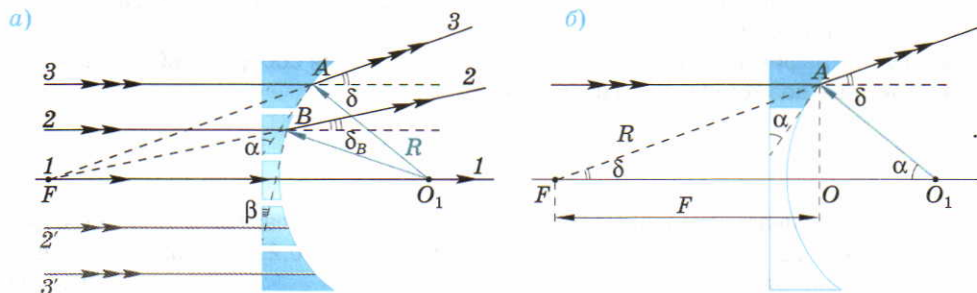
### ЗАДАЧИ

1. Собирающая линза, находящаяся на расстоянии  $d = 1$  м от лампы накаливания, даёт изображение её спирали на экране на расстоянии  $f = 0,25$  м от линзы. Найдите фокусное расстояние линзы. **[20 см]**
2. Свеча находится на расстоянии  $d = 15$  см от собирающей линзы с оптической силой  $D = 10$  дптр. На каком расстоянии от линзы следует расположить экран для получения четкого изображения свечи? **[30 см]**
3. Какой должна быть оптическая сила проектора слайдов для их 100-кратного увеличения на экране, находящегося на расстоянии 10 м от проектора? **[10,1 дптр]**

4. Найдите минимально возможное расстояние между предметом и изображением, если  $d > F$ . [4F]
5. Расстояние между двумя точечными источниками света  $l = 40$  см. На каком расстоянии от одного из источников следует разместить между ними собирающую линзу с фокусным расстоянием  $F = 10$  см, чтобы изображения источников в ней совпали? [20 см]

## § 62. Рассеивающие линзы

**Фокусное расстояние, оптическая сила.** Рассмотрим, как преломляется плоская световая волна, или пучок параллельных лучей, при нормальном падении на плоско-вогнутую линзу (с показателем преломления  $n$  и радиусом кривизны  $R$ ). Это означает, что лучи падают параллельно главной оптической оси (рис. 202). Условно линзу можно представить как совокупность призм с различными углами преломления, поэтому будет различным и преломление луча, попадающего на каждую из линз. Луч 1 не преломляется, так как падает практически на плоскопараллельную пластинку. Луч 2 падает на призму с меньшим преломляющим углом  $\beta$ , чем луч 3, падающий на призму с преломляющим углом  $\alpha > \beta$ . Поэтому луч 2 меньше отклоняется от горизонтали, чем луч 3 ( $\delta_B < \delta$ ). В отличие от собирающей линзы, приближающей параллельные лучи к главной оптической оси, рассеивающая линза отклоняет их в сторону от неё. Можно показать, что продолжения преломлённых лучей пересекаются на главной оптической оси в точке  $F$ , называемой *мнимым главным фокусом рассеивающей линзы*.



### ▲ 202

Преломление рассеивающей линзой лучей, параллельных главной оптической оси: а) главный фокус линзы; б) связь фокусного расстояния с радиусом кривизны

**Главный фокус рассеивающей линзы** — точка на главной оптической оси, через которую проходят продолжения расходящегося пучка лучей, возникшего после преломления в линзе лучей, параллельных главной оптической оси.

Этот фокус является мнимым: расходящийся пучок лучей выходит как бы из него. Главный фокус рассеивающей линзы лежит по другую сторону от линзы, чем фокус собирающей (сравните рис. 202 и 187), поэтому фокусное расстояние рассеивающей линзы считается отрицательным  $F < 0$ .

Сравнение рисунков 202, б и 187, б показывает, что фокусное расстояние рассеивающей линзы связано с её радиусом кривизны формулой (169) (см. § 58):

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( -\frac{1}{|R|} \right).$$

Любую вогнутую линзу можно рассматривать как совокупность плоско-вогнутых линз. Можно показать, что для рассеивающей линзы с показателем преломления  $n$  и радиусами кривизны сферических поверхностей  $R_1$  и  $R_2$  справедлива формула (172), записанная в виде:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (185)$$

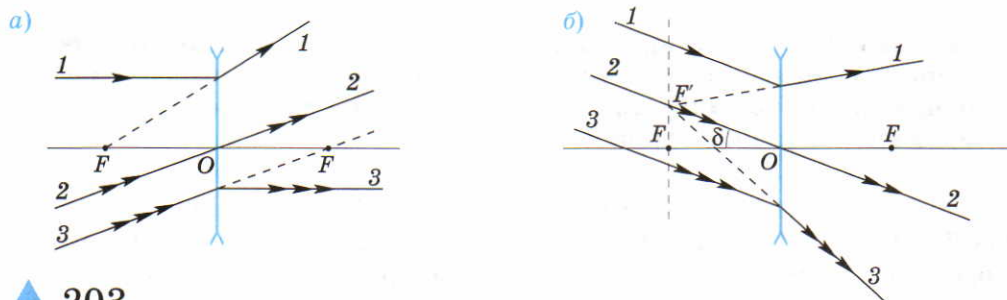
Для вогнутой поверхности радиус кривизны сферической поверхности считается отрицательным, для выпуклой — положительным. Соответственно отрицательным для рассеивающей линзы оказывается и фокусное расстояние, и оптическая сила.

*Для рассеивающих линз оптическая сила отрицательна:  $D < 0$ .*

**Основные лучи для рассеивающей линзы.** Рассмотрение преломления световых лучей рассеивающей линзой позволяет выделить важнейшие *характерные лучи*, достаточные для построения хода любого луча, падающего на линзу, а также для получения изображения предмета в линзе.

- *Луч, параллельный главной оптической оси*, преломляясь в линзе, выходит как бы из мнимого главного фокуса.
- *Луч, падающий в направлении мнимого главного фокуса*, находящегося за линзой (по принципу обратимости лучей), после преломления в линзе идёт параллельно главной оптической оси.
- *Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы*, проходит через неё без преломления.





### ▲ 203

Основные лучи для рассеивающей линзы:

а) характерные лучи; б) ход параллельных лучей

На рисунке 203, а показан ход характерных лучей для рассеивающей линзы и использовано её условное обозначение.

Так же, как и для собирающей линзы, существует особенность преломления пучка параллельных лучей рассеивающей линзой.

Если пучок параллельных лучей падает на тонкую рассеивающую линзу под небольшим углом  $\gamma$  к главной оптической оси, то продолжения преломлённых лучей пересекаются в одной точке  $F'$  фокальной плоскости линзы (иногда называемой побочным фокусом) (рис. 203, б).

В отличие от собирающей линзы побочный фокус  $F'$  располагается в фокальной плоскости, находящейся перед линзой. Положение побочного фокуса определяется пересечением луча 2, проходящего через оптический центр  $O$  линзы, с этой фокальной плоскостью.

Известные свойства характерных и параллельных лучей позволяют построить ход произвольного луча 1, падающего на рассеивающую линзу с фокусным расстоянием  $F$  (рис. 204, а). Для определения направления преломлённого луча воспользуемся лучом 2, проходящим через оптический центр  $O$  параллельно падающему лучу 1. Луч 2 проходит линзу, не преломляясь, пересекая фокальную плоскость в побочном фокусе  $F'$ .

Согласно свойству параллельных лучей после преломления луч 1 также пройдёт через этот побочный фокус.

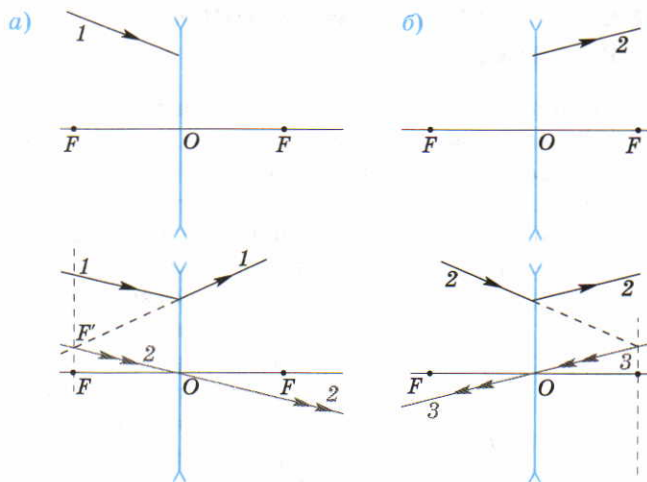
Найдём теперь направление падающего луча, если известен ход преломлённого луча (рис. 204, б). По принципу обратимости лучей будем считать, что дано направление луча, падающего на линзу. Повторяя предыдущее построение с помощью луча 3, проходящего через оптический центр  $O$  линзы параллельно лучу 2, получим побочный фокус  $F'$ , через который проходит продолжение падающего луча 2.

204

Построение хода лучей в рассеивающей линзе:

а) падающий луч — построение преломлённого луча;

б) преломлённый луч — построение падающего луча

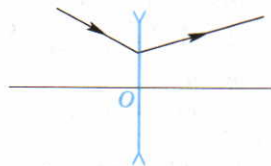


ВОПРОСЫ

1. Объясните, как преломляются лучи, параллельные главной оптической оси, плоско-вогнутой линзой. Какую точку называют главным фокусом рассеивающей линзы?
2. Как связано фокусное расстояние плоско-вогнутой линзы с радиусом кривизны её поверхности и коэффициентом преломления материала линзы?
3. Перечислите и нарисуйте основные характерные лучи в рассеивающей линзе.
4. В чём особенности преломления параллельных лучей в рассеивающей линзе?
5. Как построить ход преломлённого луча, если известно направление луча, падающего на рассеивающую линзу?

ЗАДАЧИ

1. Плоско-вогнутая стеклянная линза ( $n = 1,5$ ) имеет радиус кривизны  $R = 20$  см. Найдите фокусное расстояние линзы и её оптическую силу. **[-40 см; -2,5 дптр]**
2. Найдите оптическую силу стеклянной плоско-вогнутой линзы диаметром  $d = 4$  см, имеющей максимальную толщину  $H = 4$  мм и минимальную  $h = 2$  мм. **[-4,95 дптр]**
3. Плоско-вогнутая линза имеет сферическую ограничивающую поверхность радиусом 10 см. Фокусное расстояние линзы  $F = -20$  см. Найдите абсолютный показатель преломления материала, из которого сделана линза. **[1,5]**
4. Выпукло-вогнутая линза сделана из стекла ( $n_1 = 1,5$ ) с радиусом кривизны ограничивающих сферических поверхностей  $R_1 = 20$  см и  $R_2 = -10$  см. Найдите её оптическую силу в воздухе и в сероуглероде ( $n_2 = 1,62$ ). **[-2,5 дптр; +0,37 дптр]**
5. Известен ход падающего и преломлённого рассеивающей линзой лучей (рис. 205). Найдите построением главные фокусы линзы.

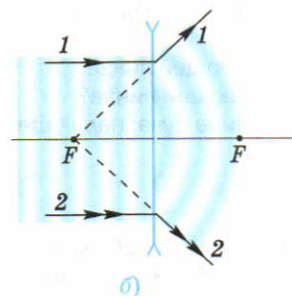
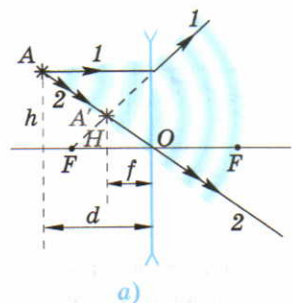


205



## § 63. Изображение предмета в рассеивающей линзе

**Изображение точечного источника.** Изображение протяжённого предмета складывается из изображений отдельных точек этого предмета. Поэтому построим сначала изображение светящейся точки  $A$ , находящейся на расстоянии  $h$  от главной оптической оси и на расстоянии  $d$  от линзы (рис. 206, а). Положение сферического фронта световой волны, излучаемой точкой  $A$ , определяется двумя лучами, выходящими из этой точки.



### ▲ 206

Формирование изображения в рассеивающей линзе:

а) преобразование сферической падающей волны в сферическую преломлённую;

б) преобразование плоской падающей волны в расходящуюся сферическую

В качестве таких лучей удобно выбрать характерные лучи: луч 1, падающий параллельно главной оптической оси, и луч 2, проходящий через оптический центр  $O$  линзы. Продолжения преломлённых лучей 1 и 2 пересекаются в точке  $A'$ , являющейся *мнимым изображением* точки  $A$ , находящимся на расстоянии  $f$  от линзы.

*Рассеивающая линза всегда создаёт только мнимое изображение (независимо от расстояния между предметом и линзой).*

*В результате преломления света рассеивающая линза преобразует друг в друга расходящиеся (сходящиеся) сферические волновые фронты.*

Рассеивающая линза может также преобразовывать плоскую волну в расходящуюся сферическую (а по принципу обратимости лучей и сходящуюся сферическую волну — в плоскую), как показано на рисунке 206, б.

**Поперечное увеличение линзы.** Построим изображение линейного предмета, находящегося на расстоянии  $d$  от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием  $F$ . Такое изображение находится путём построения изображений крайних точек предмета  $AB$  (рис. 207). Для построения изображения точки  $A$  предмета воспользуемся двумя характерными лучами: лучом 1, параллельным главной оптической оси, и лучом 2, проходящим через оптический центр  $O$  линзы.

Построив мнимое изображение  $A'$ , опускаем перпендикуляр на главную оптическую ось и на-





ется положительным  $F = |F|$ , мнимое — отрицательным  $F = -|F|$ , расстояние от линзы до действительного изображения определяется как положительное ( $f = |f|$ ), до мнимого как отрицательное ( $f = -|f|$ ). Выясним с помощью формулы линзы (186), на каком расстоянии  $|f|$  от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием  $F$  находится изображение предмета, расположенного на расстоянии  $d$  от линзы. Из формулы (186) находим

$$|f| = \frac{d|F|}{d + |F|}. \quad (187)$$

Для построения графика  $|f|(d)$ , преобразуем формулу (187), добавляя и вычитая  $|F|^2$  в числителе дроби. Тогда

$$|f| = |F| - \frac{|F|^2}{d + |F|}. \quad (188)$$

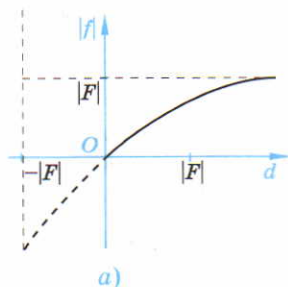
Графиком полученной зависимости является отрицательная гипербола, сдвинутая на  $|F|$  вверх по оси ординат и влево по оси абсцисс (рис. 208, а). При  $d = 0$ ,  $|f| = 0$ ; а при  $d \gg |F|$ ,  $|f| = |F|$  (т. е. чем дальше от линзы предмет, тем ближе к фокусу находится его изображение).

Определим теперь поперечное увеличение линзы при различных расстояниях  $d$  предмета от линзы, т. е. найдём зависимость  $\Gamma(d)$ . Для рассеивающей линзы из определения (183) следует, что

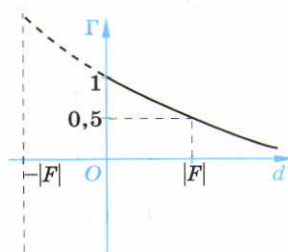
$$\Gamma(d) = \frac{|f|}{d} = \frac{|F|}{d + |F|}. \quad (189)$$

Графиком зависимости  $\Gamma(d)$  является гипербола, смещённая на  $|F|$  влево по оси абсцисс (рис. 208, б). При  $d = 0$   $\Gamma = 1$ ; при  $d = |F|$   $\Gamma = 0,5$ .

Анализ графиков  $|f|(d)$  и  $\Gamma(d)$  показывает, что изображение предмета в рассеивающей линзе всегда является мнимым, прямым ( $\Gamma > 0$ ), уменьшенным ( $|\Gamma| < 1$ ) и располагается между линзой и главным фокусом с той же стороны от линзы, что и предмет.



а)



б)

## 208

Характеристики изображения в рассеивающей линзе:

- расстояние от изображения до линзы;
- поперечное увеличение

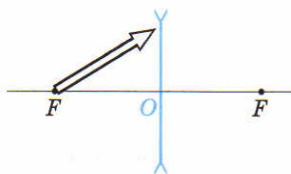
## ВОПРОСЫ

- Какое преобразование фронта падающей волны может происходить в результате её преломления рассеивающей линзой?
- Какое изображение предмета получается в рассеивающей линзе?

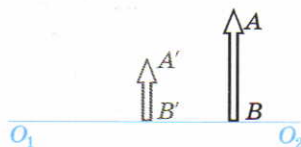
3. Выведите формулу тонкой рассеивающей линзы.
4. Начертите график зависимости  $f(d)$  для рассеивающей линзы и объясните его.
5. Начертите график зависимости поперечного увеличения рассеивающей линзы  $\Gamma(d)$ .

### ЗАДАЧИ

1. Постройте изображение предмета в рассеивающей линзе (рис. 209).
2. Найдите графически оптический центр и главный фокус рассеивающей линзы, если известно, что  $AB$  — предмет,  $A'B'$  — его изображение,  $O_1O_2$  — главная оптическая ось рассеивающей линзы (рис. 210).
3. Точечный источник света находится в главном фокусе рассеивающей линзы ( $F = 10$  см). На каком расстоянии от линзы будет находиться его изображение? [**5 см**]
4. На каком расстоянии от тонкой рассеивающей линзы с фокусным расстоянием  $F = 20$  см следует поместить предмет, чтобы получить изображение, уменьшенное в 3 раза? [**40 см**]
5. Сходящийся пучок лучей, проходя круглое отверстие в непрозрачном экране, сходится на главной оптической оси в точке  $A$ , находящейся на расстоянии  $a = 4$  см от отверстия. Если в отверстие вставить рассеивающую линзу, пучок сойдётся в точке  $B$  на расстоянии  $b = 6$  см от отверстия. Найдите фокусное расстояние линзы. [**12 см**]



▲ 209



▲ 210

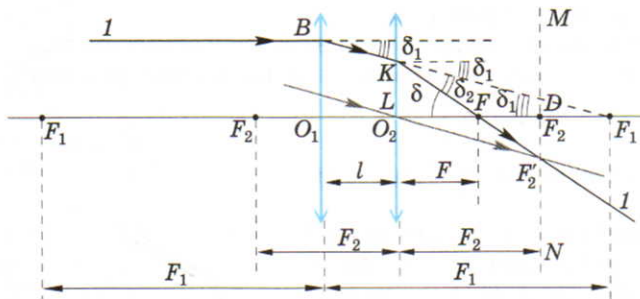
## § 64. Фокусное расстояние и оптическая сила системы из двух линз

**Собирающие линзы.** Найдём построением фокусное расстояние и оптическую силу системы из двух собирающих линз с фокусными расстояниями  $F_1$  и  $F_2$ , имеющих общую главную оптическую ось  $O_1O_2$ . Расстояние между линзами равно  $l$  (рис. 211).

Луч  $1$ , параллельный главной оптической оси  $O_1O_2$ , после преломления в точке  $B$  первой линзы направляется в фокус  $F_1$ , отклоняясь от главной оптической оси на угол  $\delta_1$ . Однако наличие второй линзы приводит к его повторному преломлению в точке  $K$ .

**Главный фокус оптической системы — точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно главной оптической оси, после преломления их в оптической системе.**





### 211

Определение фокусного расстояния системы из двух собирающих линз

Луч, проходящий через оптический центр  $O_2$  второй линзы параллельно лучу  $BK$ , пересекает фокальную плоскость  $MN$  второй линзы в точке  $F'_2$ . По свойству параллельных лучей через эту же точку проходит луч  $I$ , преломлённый в точке  $K$ . При этом он отклоняется от направления  $BK$  на угол  $\delta_2$ , пересекая главную оптическую ось в точке  $F$ , являющейся главным фокусом оптической системы. Результирующий угол отклонения  $\delta$  луча  $I$  оптической системой складывается из углов отклонения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  каждой линзой в отдельности:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2.$$

Из  $\triangle KO_2F$  найдём  $\operatorname{tg} \delta = O_2K/F = L/F$ , из  $\triangle KO_2F_1$  определим  $\operatorname{tg} \delta_1 = L/(F_1 - l)$ , а из  $\triangle KF_2D$  получим  $\operatorname{tg} \delta_2 = L/F_2$ . Для тонких линз углы отклонения  $\delta$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  малы, поэтому можно считать, что  $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$ ;  $\operatorname{tg} \delta_1 \approx \delta_1$ ;  $\operatorname{tg} \delta_2 \approx \delta_2$ . Тогда

$$\frac{L}{F} = \frac{L}{F_1 - l} + \frac{L}{F_2}.$$

После сокращения на  $L$  окончательно получаем

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1 - l} + \frac{1}{F_2}. \quad (190)$$

Изменение расстояния  $l$  между линзами позволяет изменять фокусное расстояние  $F$  оптической системы. Оптические системы с переменным фокусным расстоянием широко используются в фото- и видеосъёмочной аппаратуре. Они позволяют плавно приближать и удалять изображения предметов на плёнке и на экране.

Если линзы располагаются вплотную друг к другу ( $l = 0$ ),

$$\text{то } \frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}.$$

Оптическую силу  $D = 1/F$  системы из двух линз можно представить в виде

$$D = D_1 + D_2. \quad (191)$$

Оптическая сила системы близко расположенных линз равна сумме оптических сил линз этой системы. Такая оптическая система обладает меньшим фокусным расстоянием, чем каждая из линз в отдельности.

**Рассеивающая и собирающая линзы.** Фокусное расстояние и оптическую силу системы из рассеивающей и собирающей линз с фокусными расстояниями  $F_1$  ( $F_1 < 0$ ) и  $F_2$  ( $F_2 > 0$ ), которые имеют общую главную оптическую ось  $O_1O_2$ , можно найти построением хода лучей, как и в предыдущем случае. Мы воспользуемся другим способом — рассчитаем величину фокусного расстояния, используя формулу тонкой линзы. Для этого построим ход пучка лучей, параллельных главной оптической оси (рис. 212).

Мнимое изображение, создаваемое лучами 1 и 2 в рассеивающей линзе, находится в её главном мнимом фокусе  $F_1$ . Это изображение находится на расстоянии  $d_2 = |F_1| + l$  от собирающей линзы ( $l$  — расстояние между линзами) и является как бы предметом. Изображение этого предмета будет находиться в фокусе оптической системы:  $f_2 = F$ . Используем формулу (179) для тонкой собирающей линзы:

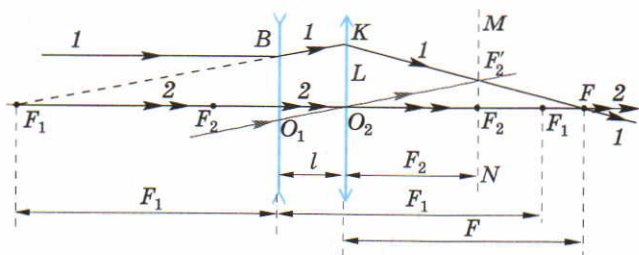
$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2},$$

или

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{|F_1| + l} + \frac{1}{F}.$$

Учитывая, что для рассеивающей линзы  $F_1 < 0$ , окончательно получаем формулу, совпадающую с выражением (190):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1 - l} + \frac{1}{F_2}.$$



## 212

*Расчёт фокусного расстояния системы из рассеивающей и собирающей линз*

Для близко расположенных линз ( $l = 0$ , или  $l \ll |F_1|$ ) оптическая сила равна сумме оптических сил линз системы:

$$D = -|D_1| + D_2. \quad (192)$$

Для рассеивающей линзы оптическая сила отрицательна, т. е.  $D_1 = -|D_1|$ . Оптическая сила такой системы меньше, чем оптическая сила собирающей линзы, а фокусное расстояние больше:  $F > F_2$ .

### ВОПРОСЫ

1. Какую точку называют главным фокусом оптической системы?
2. Найдите построением главный фокус оптической системы, состоящей из двух собирающих линз.
3. Как найти оптическую силу двух близко расположенных линз?
4. Найдите построением главный фокус оптической системы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз.
5. Докажите, что для близко расположенных собирающей и рассеивающей линз оптическая сила системы складывается из оптических сил этих линз.

### ЗАДАЧИ

1. На каком расстоянии друг от друга следует расположить две одинаковые собирающие линзы с фокусным расстоянием  $F$ , чтобы пучок параллельных лучей, пройдя через них, остался параллельным первоначальному направлению?
2. Найдите фокусное расстояние оптической системы из двух собирающих линз ( $F_1 = 20$  см;  $F_2 = 15$  см), расположенных на расстоянии  $l = 30$  см друг от друга. [−30 см]
3. Оптическая сила системы, состоящей из двух собирающих линз ( $D_1 = D_2 = 2$  дптр),  $D = 12$  дптр. Найдите расстояние между линзами. [40 см]
4. Две собирающие линзы с оптическими силами  $D_1 = 5$  дптр и  $D_2 = 6$  дптр расположены на расстоянии  $l = 60$  см друг от друга. Найдите, где находится изображение предмета, расположенного на расстоянии  $d = 40$  см от первой линзы, и поперечное увеличение системы. [1 м; 2,5]
5. Театральный бинокль содержит собирающую ( $F_1 = 3,6$  см) и рассеивающую ( $F_2 = -1,2$  см) линзы. При каком расстоянии между линзами зритель видит отдаленный объект на расстоянии  $f = 25$  см от глаза? [2,34 см]

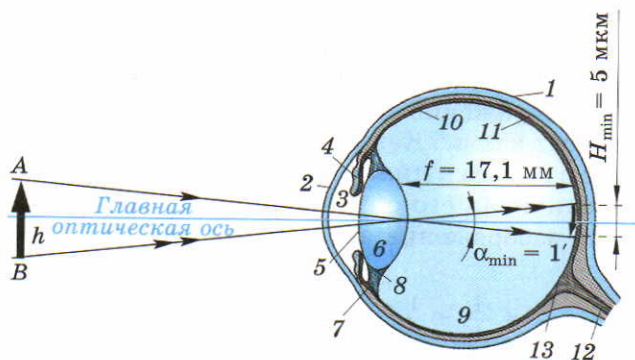
## § 65. Человеческий глаз как оптическая система

**Строение глаза.** Человеческий глаз представляет собой достаточно сложную оптическую систему, сформировавшуюся из органических материалов в процессе длительной биологической эволюции.



Глаз почти сферичен (24 мм вдоль главной оптической оси и 22 мм в поперечном направлении). Желеподобное содержание глаза окружено плотной гибкой оболочкой 1 (склерой) (рис. 213). За исключением её прозрачной наружной части 2 (роговица) склера белого цвета и непрозрачна. Роговица обладает наибольшей оптической силой среди других оптических элементов глаза. Коэффициент преломления роговицы  $n_1 \approx 1,376$ . Пройдя роговицу, свет попадает в полость, заполненную водянистой влагой 3 с коэффициентом преломления  $n_2 = 1,336$ . В водянистую влагу погружена радужная оболочка 4 с отверстием 5 (зрачком).

Радужная оболочка представляет собой подвижную мышечную кольцевую диафрагму. Сжимаясь и растягиваясь, радужная оболочка изменяет размер зрачка и тем самым световой поток, попадающий в глаз. Через зрачок свет попадает на хрусталик 6 — эластичную двояковыпуклую линзу диаметром около 9 мм и толщиной около 4 мм. Внутренняя структура хрусталика, состоящего из 22 000 тонких слоёв, напоминает структуру луковицы. Коэффициент преломления хрусталика меняется от наружной области к внутренней от 1,386 до 1,406. Цилиарная мышца 7, управляющая хрусталиком с помощью поддерживающей связки 8, может изменять его кривизну и соответственно оптическую силу глаза. В полости глаза за хрусталиком находится прозрачное стекловидное тело 9 ( $n_3 = 1,337$ ). Роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему, аналогичную собирающей линзе. Оптический центр  $O$  такой линзы находится на расстоянии  $f = 17,1$  мм от сетчатки 10 — тонкого прозрачного слоя светочувствительных клеток. Толщина сетчатки, покрывающей 65% внутренней поверхности глаза, изменяется от 0,1 до 0,5 мм. Светочувствительные клетки находятся на задней поверхности сетчатки, лежащей на сосудистой оболочке 11. Сетчатка преобразует падающее на неё видимое излучение в электрические импульсы, передаваемые по зрительному нерву 12 в головной мозг.



## 213

Строение человеческого глаза

В месте выхода из сетчатки зрительного нерва светочувствительные клетки отсутствуют, поэтому там возникает *слепое пятно 13*, не чувствительное к свету.

На сетчатке возникает перевёрнутое изображение всех предметов. Однако мозг, перерабатывая полученную зрительную информацию, воспринимает изображение как прямое.

Две точки изображения воспринимаются отдельно, если их изображения попадают на две различные светочувствительные клетки сетчатки. Расстояние между соседними светочувствительными клетками ( $H_{\min} = 5$  мкм) определяет *разрешающую способность* глаза или остроту зрения. Разрешающая способность глаза характеризуется *минимальным углом зрения*, под которым две точки  $A$  и  $B$  (см. рис. 213) видны отдельно. Так как  $H_{\min} \ll f$ , то  $\alpha_{\min} \approx H_{\min}/f = 1'$ .

С уменьшением освещённости острота зрения падает: ухудшается разрешающая способность глаза.

**Аккомодация.** Расстояние  $f$  от изображения предмета на сетчатке до оптического центра  $O$  оптической системы фиксировано. Поэтому единственный способ чётко видеть предметы, находящиеся от глаза на различных расстояниях  $d$ , — изменение оптической силы линзы (или её фокусного расстояния).

**Аккомодация — способность глаза к изменению его оптической силы.**

Механизм аккомодации сводится к следующему. Резкое изображение предмета, находящегося на расстоянии  $d_1$  от глаза, на сетчатке возникает при определённой оптической силе линзы:

$$D_1 = \frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f}. \quad (193)$$

При переводе взгляда на другой предмет, например расположенный на расстоянии  $d_2 < d_1$  от глаза, нарушается резкость изображения на сетчатке. При оптической силе  $D_1$  изображение не попадает на сетчатку, так как  $f_2 \neq f$ . Сигнал об этом поступает в мозг. Как результат, обратный корректирующий сигнал поступает из мозга к цилиарной мышце. Её сокращение сжимает хрусталик, увеличивая его оптическую силу ( $D_2 > D_1$ ), пока вновь не получится чёткое изображение предмета на сетчатке. Оно возникает при условии

$$D_2 = \frac{1}{F_2} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f}. \quad (194)$$



Если  $d_2 > d_1$ , то в результате расслабления цилиарной мышцы хрусталик растягивается, уменьшая оптическую силу глаза ( $D_2 < D_1$ ). Оптическая сила глаза минимальна при полностью расслабленной цилиарной мышце. При этом согласно формуле (193) чёткое наблюдение предмета возможно в *дальней точке*. *Дальняя точка* — наиболее удалённая от глаза точка расположения объекта, чётко видимая глазом. Для нормального глаза дальняя точка лежит бесконечно далеко, т. е.  $d_1 \rightarrow \infty$  (рис. 214, а). Это означает, что минимальная оптическая сила нормального глаза равна:

$$D_{\min} = \frac{1}{f} = \frac{1}{17,1 \cdot 10^{-3}} = 58,5 \text{ дптр.}$$

Оптическая сила глаза максимальна при максимальном напряжении цилиарной мышцы. При этом, согласно формуле (194), чёткое наблюдение предмета возможно в *ближней точке*. *Ближняя точка* — наименее удалённая от глаза точка расположения объекта, чётко видимая глазом. Положение ближней точки и соответственно максимальная оптическая сила для нормального глаза изменяются с возрастом (табл. 10). При известной ближней точке  $d_2$  максимальная оптическая сила  $D_{\max}$  находится по формуле (194) (рис. 214, б).

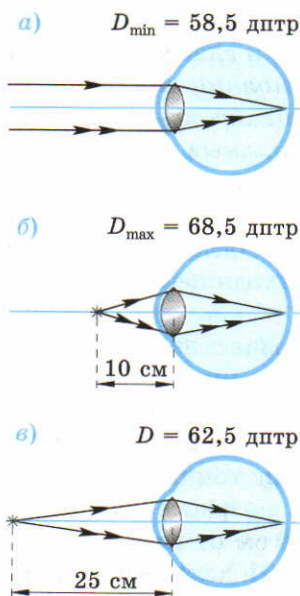
Таблица 10

**Изменение с возрастом положения ближней точки и максимальной оптической силы для нормального глаза**

Возраст, лет	10	20	30	40	50	60	70
Ближняя точка, см	7	10	14	22	40	200	400
$D_{\max}$	72,8	68,5	65,6	63	61	59	58,8

Удаление от глаза с возрастом ближней точки объясняется постепенным снижением сокращательной способности цилиарной мышцы и уменьшением эластичности хрусталика.

Если предмет находится около ближней точки, угол зрения (рис. 214, б) оказывается максимальным: предмет виден лучше всего. Однако при та-



▲ 214

Аккомодация нормального глаза:  
 а) дальняя точка на  $\infty$ ;  
 б) ближняя точка (возраст 20 лет);  
 в) расстояние наилучшего зрения



ком наблюдении значительно усиливается напряжение цилиарной мышцы и глаз устаёт. Поэтому обычно предметы располагают от глаза на *расстоянии наилучшего зрения*. *Расстояние наилучшего зрения* — расстояние от объекта до глаза, при котором угол зрения оказывается максимальным, а глаз не утомляется при длительном наблюдении.

Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения принимают равным  $d_{\text{н}} = 25$  см (рис. 214, в).

Согласно формуле (194), для получения чёткого изображения предмета, находящегося на этом расстоянии, требуется оптическая сила 62,5 дптр.

**Дефекты зрения и их коррекция.** Ослабление зрения с возрастом. Возрастная коррекция зрения оказывается необходимой, когда расстояние, на которое удалена от глаза ближняя точка, превысит расстояние наилучшего зрения. Для коррекции этого дефекта зрения применяют очки с собирающими (вогнуто-выпуклыми) линзами. С их помощью ближняя точка перемещается на расстояние наилучшего зрения (табл. 11). В возрасте 50 лет ближняя точка находится в среднем на расстоянии 40 см от глаза, что соответствует максимальной оптической силе  $D_{\text{max}} = 61$  дптр. Так как оптическая сила близко расположенных линз равна сумме оптических сил очков и глаза  $D = D_{\text{max}} + D_0$ , то оптическая сила линзы очков должна составлять  $D_0 = 1,5$  дптр.

*Дальнозоркость и близорукость* — дефекты зрения, связанные с отклонением от нормы либо длины глаза, либо радиуса кривизны роговицы.

*Астигматизм* — дефект зрения, связанный с несферичностью роговицы, т. е. её различной кривизной в разных плоскостях. В результате этого изображения предмета в горизонтальном и вертикальном направлениях возникают в различных плоскостях, так что человек не может одновременно чётко видеть вертикальные и горизонтальные переплётки окна. Астигматизм корректируется с помощью цилиндрических линз.

## ВОПРОСЫ

1. Опишите строение человеческого глаза и назначение отдельных его элементов.
2. Чем характеризуется разрешающая способность глаза?
3. Что называют аккомодацией? Каким образом она реализуется?
4. Дайте определение дальней и ближней точек. Какое расстояние называют расстоянием наилучшего зрения?
5. Перечислите основные дефекты зрения и укажите способы их коррекции.

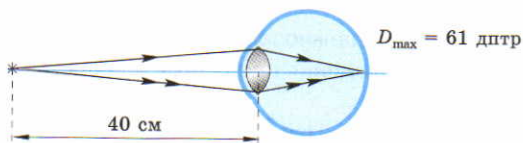
## ЗАДАЧИ

1. Оцените максимальный размер предмета, детали которого не сможет различать человек с нормальным зрением на расстоянии 100 м. **[2,92 см]**

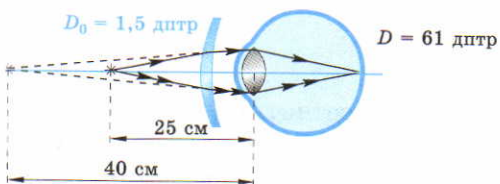
Таблица 11

Коррекция дефектов зрения

Возрастная коррекция зрения

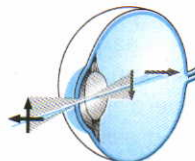


Ближняя точка  
(возраст 50 лет);

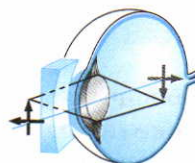


Смещение с помощью очков

Астигматизм и его коррекция

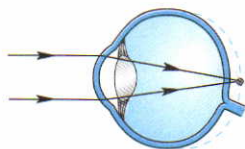


Изображение предмета  
в астигматическом глазе



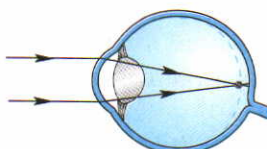
Коррекция астигматизма  
с помощью цилиндрической линзы

Коррекция дальнозоркости

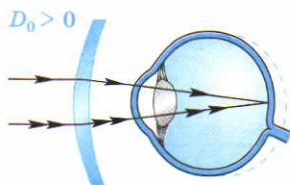


Дальнозоркий глаз

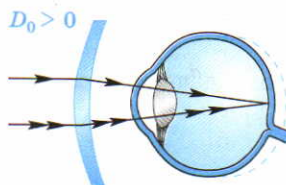
Коррекция близорукости



Близорукий глаз



Собирающая (вогнуто-выпуклая) линза  
очков для коррекции дальнозоркости



Рассеивающая (выпукло-вогнутая)  
линза очков для коррекции  
близорукости

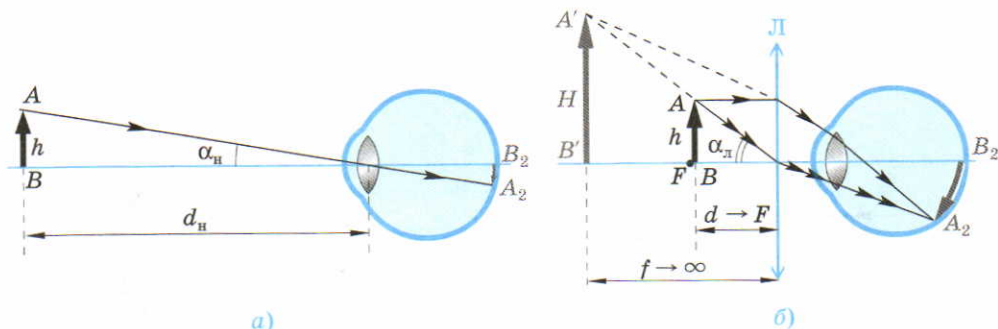
2. После чтения книги, находящейся на расстоянии 25 см от глаза, человек переводит взгляд на небо. Как изменится при этом оптическая сила глаза? **[-4 дптр]**
3. Школьник обычно читает книгу, держа её на расстоянии  $d = 20$  см от глаз. Очки какой оптической силы следует ему носить для чтения книги на расстоянии наилучшего зрения  $d_n$ ? **[-1 дптр]**
4. Ближняя точка находится на расстоянии 2 м от глаза дальновзорного человека. Очки какой оптической силы следует ему носить для наблюдения предметов на расстоянии наилучшего зрения? **[3,5 дптр]**
5. Человек носит очки с оптической силой  $D = -2,25$  дптр. Найдите для него расстояние наилучшего зрения. **[16 см]**

## § 66. Оптические приборы, увеличивающие угол зрения

**Лупа.** Чем больше светочувствительных клеток сетчатки участвует в создании изображения одного и того же предмета, т. е. чем крупнее изображение предмета на сетчатке, тем больше зрительная информация, получаемая глазом о предмете. Размер изображения предмета  $AB$  на сетчатке можно характеризовать углом зрения  $\alpha_n$  при наблюдении предмета на расстоянии наилучшего зрения  $d_n = 25$  см (рис. 215, а). Если размер предмета  $h$  много меньше  $d_n$ , то (так как  $\operatorname{tg} \alpha_n \approx \alpha_n$ )

$$\alpha_n \approx \frac{h}{d_n}.$$

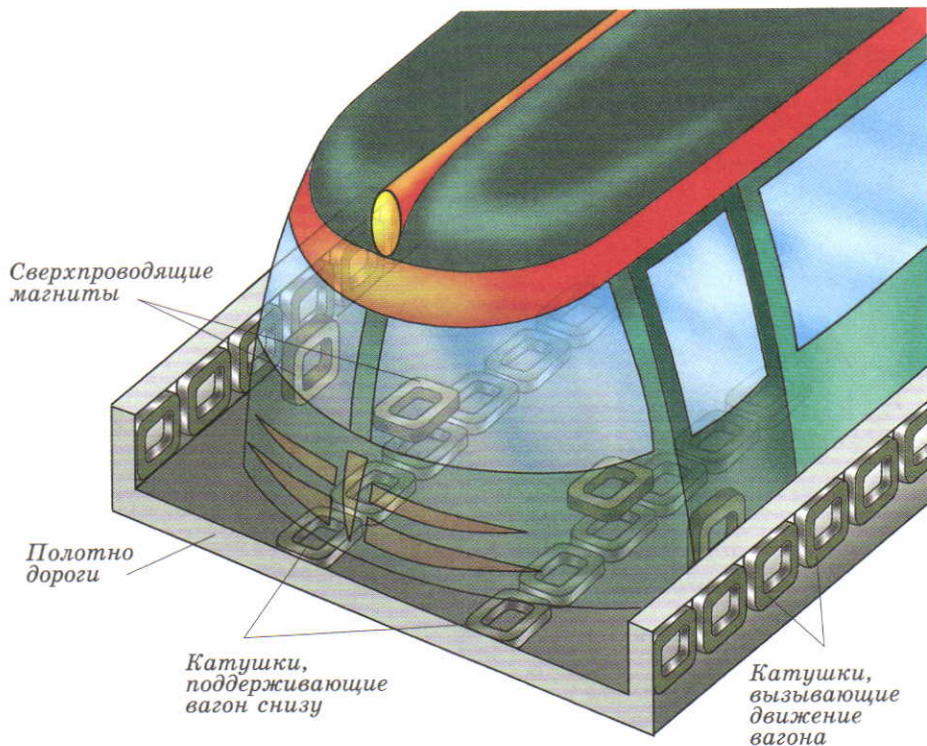
Для увеличения угла зрения используют лупу.



### ▲ 215

Угловое увеличение лупы: а) предмет на расстоянии наилучшего зрения; б) увеличение угла зрения с помощью лупы



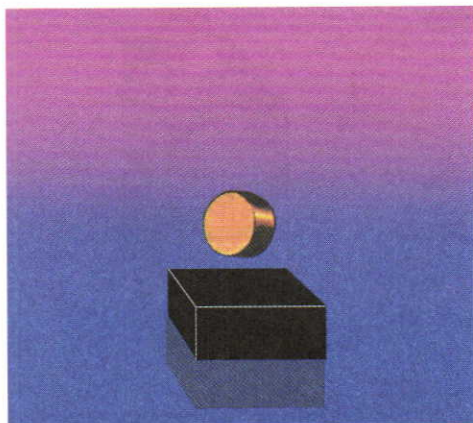


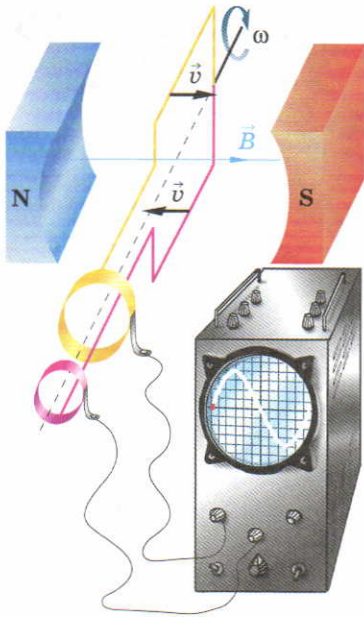
▲ I

*Поезд на магнитной подушке*

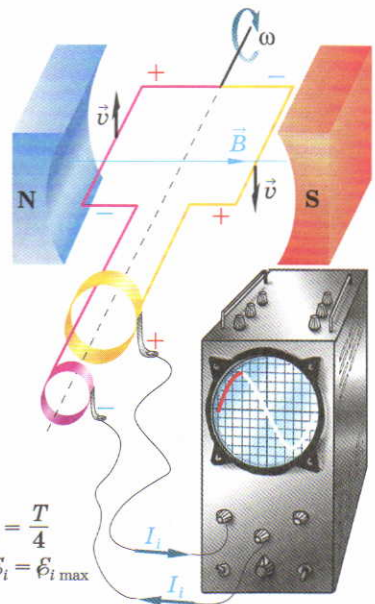
▶ II

*«Левитация» высокотемпературного сверхпроводника (над постоянным магнитом)*

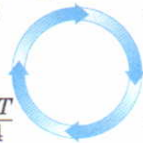




$$\begin{cases} t = 0 \\ t = T = \frac{2\pi}{\omega} \\ \mathcal{E}_i = 0 \end{cases}$$

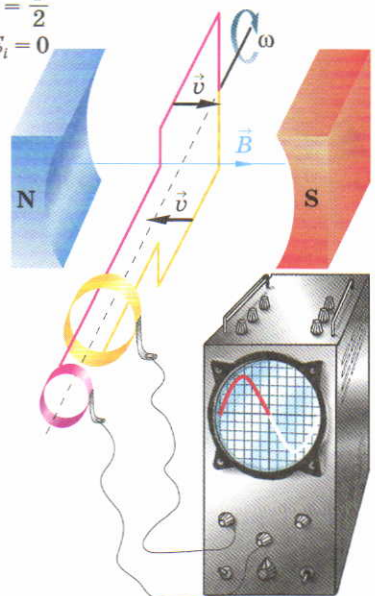
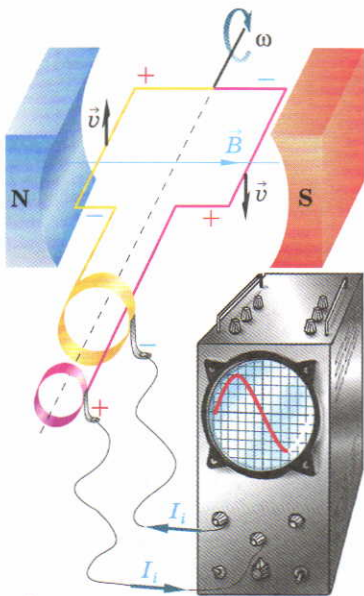


$$\begin{cases} t = \frac{T}{4} \\ \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i \max} \end{cases}$$



$$\begin{cases} t = \frac{3T}{4} \\ \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i \max} \end{cases}$$

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



### ▲ III

Принцип действия генератора переменного тока

### Лупа — короткофокусная собирающая линза.

Помещая лупу перед глазом, рассматриваемый предмет располагают между лупой и её фокусом  $F_{л}$  (в непосредственной близости от фокуса). При этом увеличенное, прямое, мнимое изображение предмета в лупе будет находиться на бесконечном удалении от глаза. Такое расположение изображения облегчает его наблюдение, так как в этом случае напряжение глаза — минимально. Угол зрения  $\alpha_{л}$  при использовании лупы (рис. 215, б) можно приближённо оценить как

$$\alpha_{л} \approx \frac{h}{d} = \frac{h}{F_{л}}.$$

Для того чтобы характеризовать изменение угла зрения, вводят понятие *углового увеличения*.

**Угловое увеличение** — отношение угла зрения, полученного с помощью оптического прибора, к углу зрения невооружённого глаза на расстоянии наилучшего зрения.

Для лупы с оптической силой  $D = 1/F_{л}$ :

$$\Gamma_{\alpha} = \frac{\alpha_{л}}{\alpha_{н}} = \frac{d_{н}}{F_{л}}, \quad (195)$$

или

$$\Gamma_{\alpha} = d_{н} D. \quad (196)$$

Чем меньше фокусное расстояние лупы  $F_{л}$ , тем большее угловое увеличение она даёт.

Угловое увеличение лупы пропорционально её оптической силе.

При уменьшении фокусного расстояния лупы возникает серьёзное искажение качества изображения, поэтому в качестве нижнего предела фокусного расстояния используют  $F_{л} = 2$  см. Это означает, что, согласно формуле (195), угловое увеличение лупы находится в пределах порядка  $\Gamma \leq 10$ . Больше угловое увеличение требует такой оптической силы (см. формулу (196)), которая не может быть достигнута с помощью одной короткофокусной линзы.

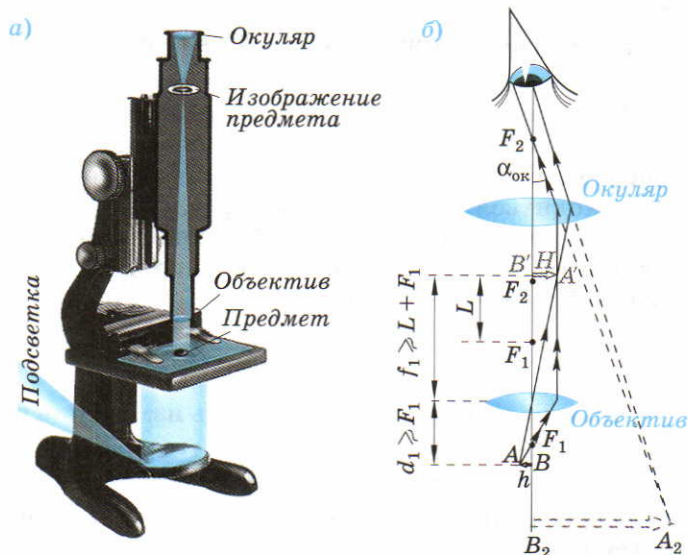
**Оптический микроскоп.** Для получения большего углового увеличения используют оптические системы, состоящие из нескольких линз. К таким системам относится *оптический микроскоп*, который состоит из двух короткофокусных линз — *объектива и окуляра* (рис. 216, а).



## 216

Оптический микроскоп:

- а) принципиальное устройство;  
б) ход лучей



**Объектив** — линза микроскопа, ближайшая к предмету.

**Окуляр** — линза микроскопа, ближайшая к глазу наблюдателя.

Угловое увеличение в микроскопе происходит дважды. Сначала объектив создаёт увеличенное изображение предмета перед окуляром, а затем окуляр дополнительно увеличивает это изображение. Для этого предмет располагают между фокусом объектива и его двойным фокусом:  $F_1 < d < 2F_1$ , но ближе к фокусу — для получения максимального поперечного увеличения  $\Gamma$ . Размер полученного действительного увеличенного изображения, согласно формуле (180), равен:

$$H = h \frac{f_1 - F_1}{F_1},$$

где  $f_1$  — расстояние от изображения до объектива.

Для получения максимального увеличения микроскопа объектив должен быть короткофокусным. Для того чтобы окуляр давал дополнительное увеличение, изображение предмета  $A'B'$  в объективе должно располагаться между окуляром и его фокусом  $F_2$  (как и в случае лупы вблизи фокуса) (рис. 216, б).

В окуляре получается мнимое, прямое, увеличенное изображение  $A_2B_2$ . Найдём угловое увеличение микроскопа.

Угол зрения глаза  $\alpha_{\text{ок}}$  с использованием окуляра можно найти так же, как и для лупы:

$$\alpha_{\text{ок}} = \frac{H}{F_2} = h \frac{f_1 - F_1}{F_1 F_2}.$$

Как видно из рисунка 216, б,

$$f_1 \approx L + F_1,$$

где  $L$  — минимальное расстояние между главными фокусами объектива и окуляра ( $L$  определяет размеры микроскопа).

Тогда

$$\alpha_{\text{ок}} = h \frac{L}{F_1 F_2}.$$

Так как угол зрения глаза на расстоянии наилучшего зрения  $\alpha_{\text{н}} = h/d_{\text{н}}$ , то *угловое увеличение микроскопа* определяется отношением  $\alpha_{\text{ок}}$  и  $\alpha_{\text{н}}$ :

$$\Gamma_{\alpha} = \frac{\alpha_{\text{ок}}}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{d_{\text{н}} L}{F_1 F_2}. \quad (197)$$

Наибольшее угловое увеличение достигается при использовании короткофокусных линз для объектива и окуляра.

Угловое увеличение микроскопа прямо пропорционально оптическим силам линз объектива  $D_1$  и окуляра  $D_2$ :

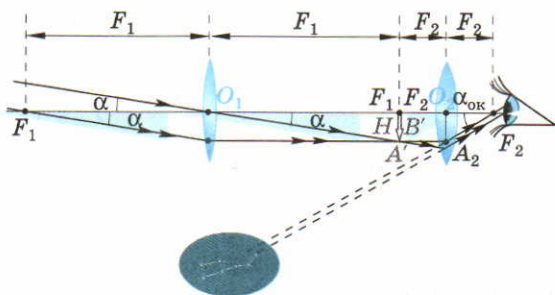
$$\Gamma_{\alpha} = D_1 D_2 d_{\text{н}} L. \quad (198)$$

Угловое увеличение оптических микроскопов, как можно оценить с помощью формулы (198), обычно изменяется в пределах от 15 до 1200.

**Оптический телескоп-рефрактор.** Наблюдение значительно удалённых от Земли астрономических объектов проводят с помощью *телескопов*.

**Оптический телескоп-рефрактор** — линзовая система, дающая существенное угловое увеличение удалённых объектов в видимом спектре.

Подобно микроскопу простейший рефрактор имеет объектив и окуляр (рис. 217, а). В отличие от микроскопа, где объект находится в непосредственной близости от объектива, астрономические объекты удалены от телескопа на значительные расстояния. Это приводит к тому, что, во-первых, угол расхождения  $\alpha$  пучка лучей от объекта, попадающих в объектив, очень мал, во-вторых, действительное, перевёрнутое, уменьшенное



### ▲ 217 а)

Простейший оптический телескоп-рефрактор:  
а) принципиальное устройство; б) ход лучей

б)

Изображение объекта  $A'B'$  находится в фокальной плоскости объектива. Как и в микроскопе, окуляр выполняет роль линзы, обеспечивая угловое увеличение изображения  $A'B'$  (рис. 217, б). Для получения максимального углового увеличения изображение  $A'B'$  должно находиться практически в фокусе  $F_2$  окуляра. Это означает, что фокусы объектива  $F_1$  и окуляра  $F_2$  практически совпадают. Тогда мнимое, прямое, увеличенное изображение в окуляре будет находиться на бесконечном расстоянии. Такое расположение изображения позволяет комфортно, без зрительного напряжения наблюдать его. Найдём угловое увеличение телескопа-рефрактора. Угол зрения невооружённым глазом определяется углом  $\alpha$ , т. е. углом расхождения пучка лучей от объекта (планеты, звезды). Как следует из  $\triangle B'O_1A'$ ,  $\alpha = H/F_1$ , где  $H$  — размер изображения  $A'B'$ .

Угол зрения  $\alpha_{\text{ок}}$  окуляра, считая, что глаз помещён в фокусе  $F_2$  окуляра, можно найти из  $\triangle F_2O_2A_2$ :  $\alpha_{\text{ок}} = H/F_2$ . Тогда угловое увеличение телескопа-рефрактора определяется отношением этих углов:

$$\Gamma_{\alpha} = \frac{\alpha_{\text{ок}}}{\alpha} = \frac{F_1}{F_2}. \quad (199)$$

Следовательно, для получения максимального углового увеличения ( $\Gamma_{\alpha} \gg 1$ ) должно выполняться неравенство  $F_1 \gg F_2$ .

Максимальное угловое увеличение телескопа-рефрактора достигается при соединении длиннофокусного объектива с короткофокусным окуляром.

Применение длиннофокусных объективов объясняет большую длину оптической трубы телескопа.



Даже при угловых увеличениях объектов в десятки раз угол зрения для очень отдалённых звёзд оказывается меньше  $1'$  (меньше минимального угла зрения глаза). Тем не менее глаз различает такую звезду из-за большой концентрации светового потока на зрачке. Чем больше диаметр объектива телескопа, тем большая энергия попадает на зрачок глаза. Освещённость зрачка глаза, наблюдающего звезду в телескоп, во столько раз больше его освещённости от прямого излучения звезды, во сколько раз площадь объектива телескопа больше площади самого зрачка. Самый крупный в мире телескоп-рефрактор (Йеркская обсерватория близ Чикаго) имеет диаметр объектива около 1 м. Дальнейшее увеличение диаметра объектива считается нецелесообразным из-за возможных механических деформаций тяжёлых линз и значительного поглощения света, что заметно влияет на качество изображения. Поэтому объективы диаметром более 0,5 м делаются зеркальными, а телескопы, использующие такие объективы, называют *телескопами-рефлекторами*. Например, диаметр объектива космического телескопа-рефлектора Хаббла составляет 3,4 м.

### ВОПРОСЫ

1. Какую линзу называют лупой? Дайте определение углового увеличения. Как угловое увеличение лупы зависит от её оптической силы?
2. Из каких оптических элементов состоит микроскоп? Объясните назначение объектива и окуляра.
3. Объясните ход лучей в микроскопе. Напишите выражение для углового увеличения микроскопа. В каких пределах оно может изменяться?
4. Из каких оптических элементов состоит телескоп-рефрактор? Объясните назначение объектива и окуляра.
5. Объясните ход лучей в телескопе-рефракторе. Напишите выражение для углового увеличения телескопа-рефлектора. Чем ограничено применение таких телескопов?

### ЗАДАЧИ

1. Найдите угловое увеличение лупы с фокусным расстоянием 5 см. [5]
2. Найдите оптическую силу лупы, дающей восьмикратное увеличение. [32 дптр]
3. Фокусное расстояние объектива микроскопа 1 см, а окуляра — 2 см. Расстояние между объективом и окуляром 19 см. Найдите угловое увеличение микроскопа. [200]
4. Предмет находится на расстоянии 27 мм от объектива оптического микроскопа. Оптические силы объектива и окуляра одинаковы  $D_1 = D_2 = 40$  дптр. Каким должно быть расстояние между объективом и окуляром? Каким при этом будет коэффициент увеличения микроскопа? [17,2 см; 49]
5. Под каким углом зрения можно наблюдать Луну в телескопе-рефракторе, если оптическая сила объектива  $D_1 = 0,5$  дптр, а окуляра —  $D_2 = 60$  дптр? Расстояние до Луны 385 000 км, её диаметр 3480 км. [62°]

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Фронт механической волны** — совокупность точек, колеблющихся в одинаковой фазе.
- **Принцип Гюйгенса:** каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся 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 возникает 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.
- **Преломляющий угол призмы** — угол между гранями призмы, на которых происходит преломление света. Угол отклонения луча призмой
 
$$\delta = \alpha(n - 1).$$
- **Линейное увеличение оптической системы** — отношение линейного размера изображения к соответствующему линейному размеру предмета:
 
$$\Gamma_0 = \frac{H}{h}.$$



- **Линза** — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.
- **Главная оптическая ось** — прямая, на которой лежат центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу.
- **Главная плоскость линзы** — плоскость, проходящая через центр линзы перпендикулярно главной оптической оси.
- **Собирающие линзы** — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся. Собирающими линзами являются выпуклые линзы.
- **Рассеивающие линзы** — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в расходящийся. Рассеивающими линзами являются вогнутые линзы.
- **Тонкая линза** — линза, толщина которой пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны её поверхностей.
- **Главный фокус собирающей линзы** — точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно главной оптической оси, после преломления их в линзе.
- **Фокусное расстояние линзы** — расстояние от главного фокуса до центра линзы. Фокусное расстояние линзы в вакууме определяется радиусом кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу, и абсолютным показателем преломления материала линзы:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Для выпуклой поверхности радиус кривизны больше нуля, для вогну-

той меньше нуля, для плоской стремится к бесконечности.

- **Фокальная плоскость линзы** — плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси.
- **Характерные лучи для собирающей линзы:** 1) луч, параллельный главной оптической оси; 2) луч, проходящий через главный фокус; 3) луч, идущий через оптический центр линзы. Пучок параллельных лучей, падающий на собирающую линзу, сходится после преломления в одной точке фокальной плоскости.
- **Действительное изображение точки A** — точка A', в которой сходится после преломления в линзе пучок лучей, испускаемых точкой A.
- **Поперечное увеличение линзы** — отношение координаты изображения к координате предмета, отсчитываемых перпендикулярно главной оптической оси (в поперечном направлении):

$$\Gamma = \frac{y_f}{y_d}.$$

- Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

где  $d$  — расстояние вдоль главной оптической оси от предмета до центра линзы,  $f$  — расстояние вдоль главной оптической оси от изображения до центра.

- **Оптическая сила** — величина, обратная фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Единица оптической силы — *диоптрия* (дптр).

Для собирающей линзы  $D > 0$ ; для рассеивающей  $D < 0$ .



При  $d > 2F$  изображение предмета в собирающей линзе действительное, перевёрнутое, уменьшенное, при  $F < d < 2F$  — действительное, перевёрнутое, увеличенное: при  $d < F$  — мнимое, прямое, увеличенное.

- **Главный фокус рассеивающей линзы** — точка на главной оптической оси, через которую проходят продолжения расходящегося пучка лучей, возникшего после преломления в линзе лучей, параллельных главной оптической оси.

- **Характерные лучи для рассеивающей линзы:** 1) луч, параллельный главной оптической оси; 2) луч, падающий в направлении мнимого главного фокуса, находящегося за линзой; 3) луч, идущий через оптический центр линзы.

Пучок параллельных лучей, падающий на тонкую рассеивающую линзу, преломляется так, что продолжения преломлённых лучей пересекаются в одной точке фокальной плоскости линзы.

Формулу тонкой линзы можно использовать и для рассеивающей линзы при условии, что  $F < 0$ ,  $f < 0$ . Изображение предмета в рассеивающей линзе всегда мнимое, прямое, уменьшенное и располагается между линзой и главным фокусом по ту же сторону от линзы, что и предмет.

Оптическая сила системы близко расположенных линз равна сумме оптических сил линз этой системы:

$$D = D_1 + D_2.$$

- **Аккомодация** — способность глаза к изменению его оптической силы.

- **Дальняя и ближняя точки** — наиболее и наименее удалённые от глаза точки расположения объекта, чётко видимые глазом.

- **Расстояние наилучшего зрения** — расстояние от объекта до глаза, при котором угол зрения оказывается максимальным, а глаз не утомляется при длительном наблюдении.

- **Угловое увеличение** — отношение угла зрения глаза, полученного с помощью оптического прибора, к углу зрения невооружённого глаза на расстоянии наилучшего зрения.

- **Лупа** — короткофокусная собирающая линза. Угловое увеличение лупы прямо пропорционально её оптической силе:

$$\Gamma_\alpha = d_n D,$$

где  $d_n = 25$  см — расстояние наилучшего зрения.

- Угловое увеличение микроскопа прямо пропорционально оптическим силам объектива  $D_1$  и окуляра  $D_2$ :

$$\Gamma_\alpha = D_1 D_2 d_n L,$$

где  $L$  — минимальное расстояние между главными фокусами объектива и окуляра.

- Угловое увеличение телескопа-рефрактора:

$$\Gamma_\alpha = \frac{F_1}{F_2},$$

где  $F_1$  и  $F_2$  — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Максимальное угловое увеличение телескопа-рефрактора получается при соединении длиннофокусного объектива с короткофокусным окуляром.

## § 67. Интерференция волн

**Сложение волн от независимых точечных источников.** При построении изображений предметов в геометрической оптике предполагалось, что каждая точка предмета является независимым источником света, излучающим расходящуюся сферическую электромагнитную волну. В линзе всякой точке объекта соответствует одна определённая точка изображения.

Амплитуда вектора напряжённости электрического поля на сферическом фронте электромагнитной волны вдали от излучающего точечного источника постоянна. Амплитуда остаётся постоянной и после преобразования фронта волны оптической системой, например на фронте сходящейся сферической волны, создающей действительное изображение точечного источника.

Одним из основных принципов геометрической оптики является *принцип независимости световых пучков*.

**Световые пучки, встречаясь, не воздействуют друг на друга.**

Попробуем определить область применимости этого принципа, а также выясним, как происходит взаимодействие световых волн, излучаемых различными источниками, за границами его применимости. В качестве аналогии рассмотрим взаимодействие двух волн на воде, вызванных одновременно двумя точечными источниками, находящимися на расстоянии  $l$  друг от друга. Например, такие волны могут возникнуть на поверхности воды при одновременном ( $t_1 = t_2$ ) опускании в воду двух карандашей, которые затем быстро вынимаются из воды. На рисунке 218, а 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  $MON$ . Рассмотрим теперь случаи, когда волна в точке 2 возникает позже, чем в точке 1, на время  $\tau_1$  (рис. 218, б). Первая встреча фронтов этих волн происходит в точке А че-

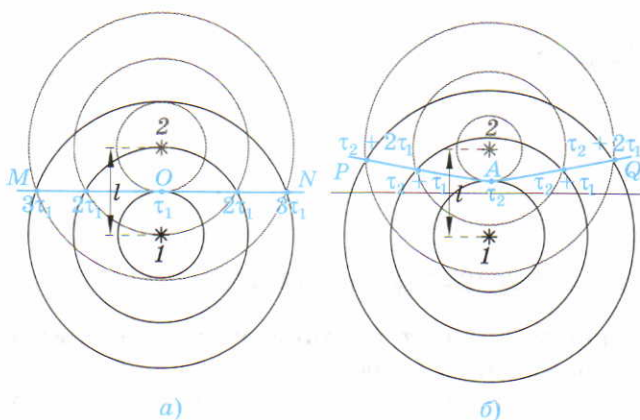


## 218

Взаимодействие волновых фронтов двух точечных источников:

а) одновременное возникновение волн ( $t_1 = t_2$ );

б) запаздывание возникновения второй волны относительно первой ( $t_2 - t_1 = \tau_1$ )



рез время  $\tau_2 = 3l/4v$  после начала распространения первой волны. Расстояние, которое проходит до встречи волна из точки 1,  $l_1 = v\tau_2$ , а из точки 2 —  $l_2 = v(\tau_2 - \tau_1)$ . Так как  $l_1 + l_2 = l$ , то  $\tau_2 = 3l/4v$ . На рисунке 218, б изображены также положения фронтов этих волн в моменты времени  $\tau_2 + \tau_1$  и  $\tau_2 + 2\tau_1$ . В этом случае максимальное увеличение амплитуды волны возникает в точках пересечения волновых фронтов на линии  $PAQ$ . Приведённый пример показывает, что следствием взаимодействия волн является зависимость результирующей амплитуды фронта волны от положения точки на фронте. Кроме того, эта зависимость определяется временем запаздывания одной волны относительно другой, или, что то же самое, разностью фаз этих волн.

**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 первом 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.

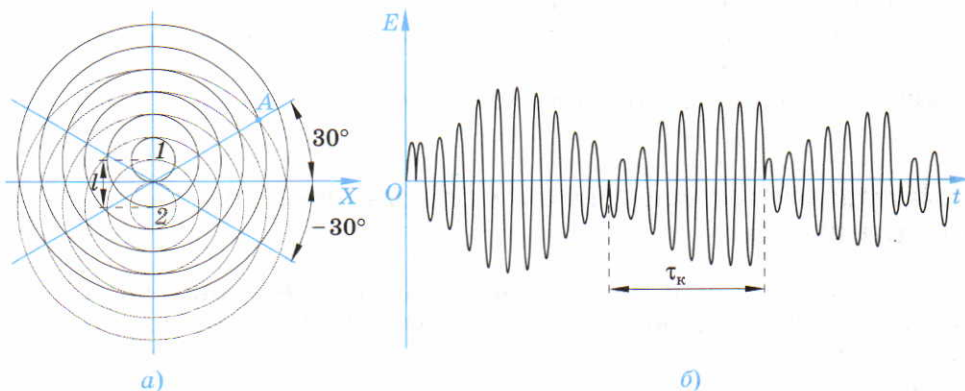


Устойчивая во времени интерференционная картина может наблюдаться только при сложении коррелированных (взаимосвязанных) колебаний, называемых *когерентными* волнами (от лат. *cohaerens* — находящийся в связи).

### Когерентные волны — волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

На рисунке 219, *a* показан результат интерференции волн, излучаемых двумя радиодиагностическими антеннами одной радиостанции, настроенной на длину волны  $\lambda$ . Расстояние между антеннами  $l = 2\lambda$ , излучение происходит синхронно: относительное время запаздывания излучателей равно нулю. Мгновенное положение фронтов волн показано через каждый период  $T$  излучения. Наложение волн происходит во всех точках, до которых дошли волновые возмущения. Например, в точке *A* в произвольный момент времени складываются волны, излученные 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

$$\alpha = 0, \pm 30^\circ; \pm 90^\circ; \pm 150^\circ; 180^\circ.$$



### ▲ 219

Интерференция волн двух когерентных источников:

а)  $l = 2\lambda$ ;

б) амплитуда световой волны, излучаемой отдельным атомом вещества

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. 219, б), 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.

## ВОПРОСЫ

1. В чём состоит принцип независимости световых пучков в геометрической оптике?
2. Что является следствием взаимодействия волн?
3. Какое явление называют интерференцией? Что такое интерференционная картина?
4. Какие волны называют когерентными?
5. Дайте определение длины и времени когерентности.

## § 68. 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 колеблются с одинаковой частотой  $\omega$  (а следовательно, 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. 220,  $a$ ). 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 (150),

$$I_{\max} = 0,5c\epsilon_0 E_{\max}^2 = 0,5c\epsilon_0 (E_1 + E_2)^2.$$

Раскрывая скобки, получаем максимальное значение интенсивности при интерференции волн с интенсивностями  $I_1$  и  $I_2$  ( $I_1 = 0,5c\epsilon_0 E_1^2$ ,  $I_2 = 0,5c\epsilon_0 E_2^2$ ):

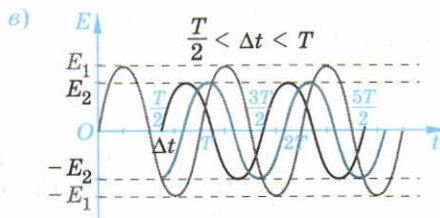
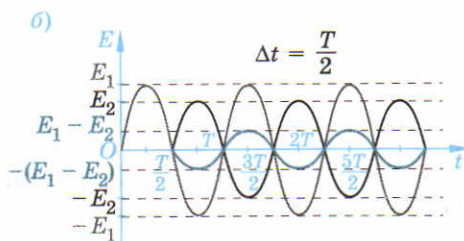
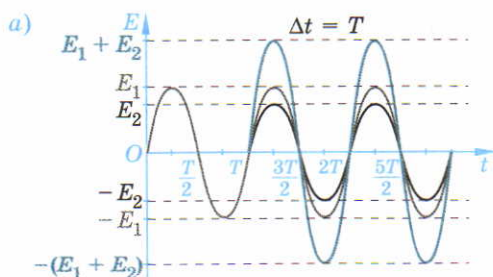
$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (200)$$

**Максимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное периоду этих колебаний:**

$$\Delta t_{\max} = mT, \quad (201)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ .

Рассмотрим теперь случай, когда второе колебание с амплитудой  $E_2$  запаздывает по времени в точке  $A$  относительно первого на время  $\Delta t = T/2$



## 220

**Интерференция когерентных волн при разном времени запаздывания друг относительно друга:**

a)  $\Delta t = T$ ; б)  $\Delta t = T/2$ ; в)  $T/2 < \Delta t < T$



(рис. 220, б). Суммарное колебание будет иметь минимально возможную амплитуду  $E_{\min} = E_1 - E_2$ .

Минимальная интенсивность  $I_{\min}$  электромагнитной волны получается аналогично выражению (200):

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (202)$$

**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:**

$$\Delta t_{\min} = (2m + 1)T/2, \quad (203)$$

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. 220, 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:

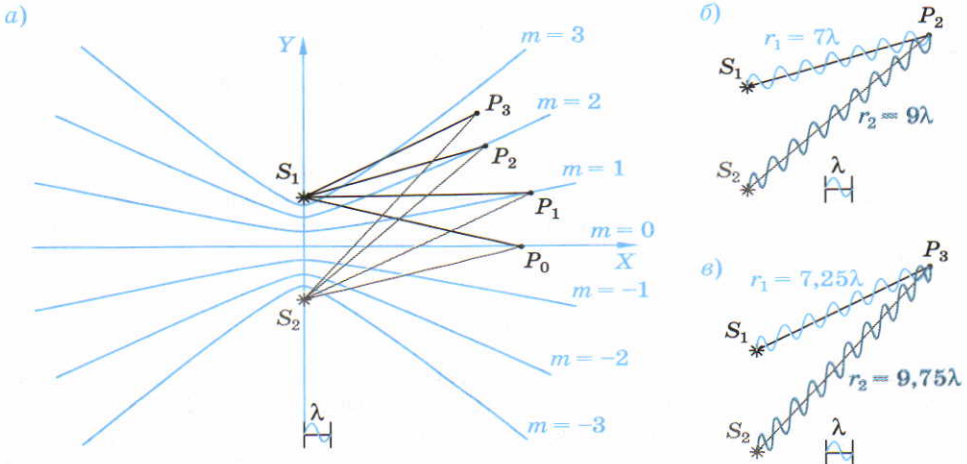
$$\Delta = m\lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (204)$$

При одинаковом законе колебаний двух источников максимумы интенсивности наблюдаются в точках пространства, для которых геометрическая разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн.

На рисунке 221, 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. 221, б).

Условия интерференционного минимума также можно выразить с помощью формулы (203) через геометрическую разность хода:

$$\Delta = (2m + 1)\lambda/2, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (205)$$



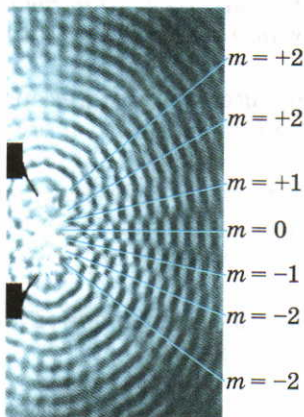
▲ 221

- 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  $P_3$



При одинаковом законе колебаний двух источников минимумы интенсивности наблюдаются в тех точках пространства, для которых геометрическая разность хода интерферирующих волн равна нечётному числу полуволн.

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. 221, в).



Подобную интерференционную картину можно наблюдать в результате синхронных вертикальных колебаний точечных вибраторов на поверхности воды (рис. 222). Сплошными линиями показаны положения соответствующих интерференционных максимумов.

### ВОПРОСЫ

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.

### ▲ 222

*Интерференционная картина на поверхности воды при синхронных вертикальных колебаниях двух шариковых вибраторов, находящихся на расстоянии  $4\lambda$ .*

### ЗАДАЧИ

1. Два звуковых сигнала частотой  $\nu = 150$  Гц синхронно излучаются из двух различных точек, находящихся на одинаковом расстоянии  $l = 340$  м от точки А на берегу озера. Один сигнал приходит от источника В, находящегося в воде, другой идёт от источника С, расположенного в воздухе. Выясните, будут ли эти сигналы усиливать или ослаблять друг друга в т. А. Скорость звука в воде  $v_1 = 1500$  м/с, в воздухе  $v_2 = 340$  м/с.  
[Сигналы будут усиливать друг друга]
2. На пути одного из двух параллельных лучей, распространяющихся в воздухе, поставили плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ) толщиной 6 см. Чему будет равно время запаздывания этого луча?  
[0, 1 нс]

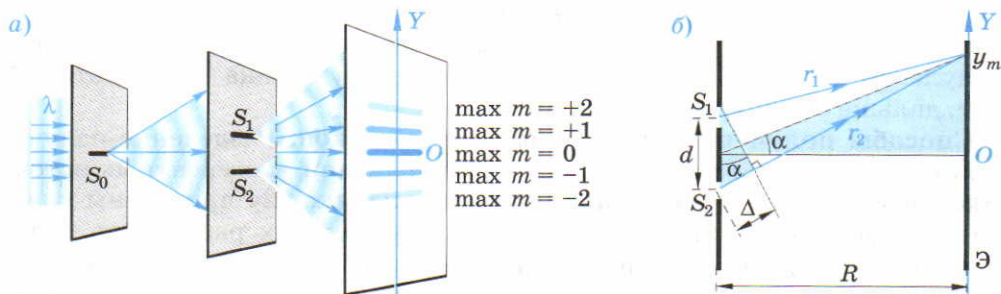


3. Разность хода между лучами от двух когерентных источников в воздухе 6 мкм. Какой станет разность хода между ними в воде ( $n = 4/3$ )? [8 мкм]
4. Две когерентные волны фиолетового света  $\lambda = 400$  нм достигают некоторой точки с разностью хода  $\Delta = 1,2$  мкм. Что произойдёт в этой точке: усиление или ослабление волн?
5. Разность хода лучей, идущих от двух рубиновых лазеров ( $\lambda = 694$  нм) в некоторой точке А составляет 3,47 мкм. Интенсивность излучения каждого из лазеров  $I = 1$  Вт/м<sup>2</sup>. Какая интенсивность излучения будет в точке А? [4 Вт/м<sup>2</sup>]

## § 69. Интерференция света

**Опыт Юнга.** Независимые источники естественного света некогерентны, поэтому от таких источников с помощью глаза невозможно наблюдать устойчивую интерференционную картину, подобную изображённой на рисунке 222. 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). Пройдя через эту щель световая волна падала на экран с двумя щелями  $S_1, S_2$  такой же ширины, находящимися друг от друга на расстоянии  $d$



### ▲ 223

**Опыт Юнга:**

а) разделение волнового фронта; б) определение длины волны света

порядка нескольких микрон (рис. 223, а). 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 монохроматичен, он содержит электромагнитные волны разной длины. Юнг впервые измерил длины волн в различных областях видимого спектра. Для упрощения анализа его результатов предположим, что расстояние между щелями  $S_1$  и  $S_2$  гораздо меньше расстояния от щелей до экрана ( $d \ll R$ ). В этом случае световые лучи, идущие от щелей  $S_1$  и  $S_2$  в точку на экране с координатой  $y_m$ , практически параллельны. Разность хода между ними (рис. 223, б) равна:

$$\Delta = r_2 - r_1 = d \sin \alpha.$$

Угол  $\alpha$  мал, поэтому  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = y_m/R$ .

Тогда условие (204) интерференционного максимума можно представить в виде:

$$d \frac{y_m}{R} = m\lambda, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$$

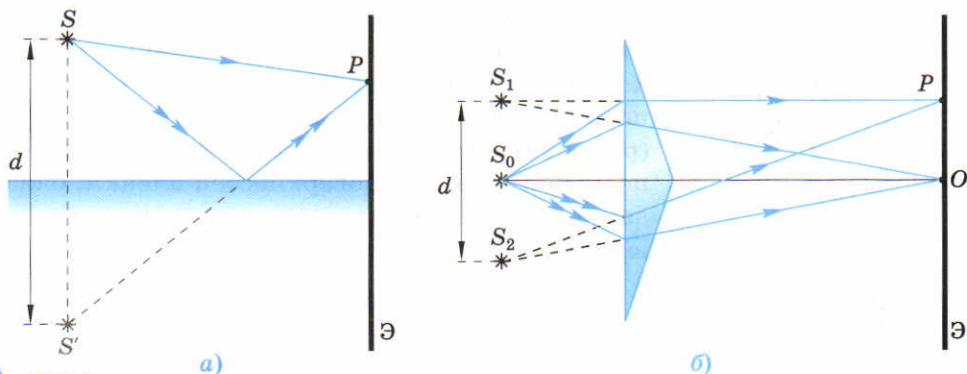
Измерив расстояние  $d$  между щелями, расстояние  $R$  от щелей до экрана и координату  $y_m$  интерференционного максимума, Юнг рассчитал длины волн излучения фиолетового и красного света ( $\lambda_{\text{ф}} = 0,42 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_{\text{кр}} = 0,7 \text{ мкм}$ ):

$$\lambda = \frac{d}{R} \frac{y_m}{m}, \text{ где } m = \pm 1; \pm 2; \dots \quad (206)$$

Совпадение нулевых максимумов для различных длин волн означает смещение всех волн в точке с координатой  $y_0 = 0$ , в которой видна полоса солнечного света. Как видно из выражения (206), координаты интерференционных максимумов, соответствующие одному и тому же порядку  $m \neq 0$ , не совпадают. Чем больше длина волны, тем дальше отстоит  $m$ -й максимум от центра. Поэтому все интерференционные максимумы, кроме нулевого ( $m = 0$ ), окрашены: ближе к центру экрана — фиолетовый цвет, дальше от центра — красный.

**Способы получения когерентных источников.** Разделение излучения от источника естественного света для получения когерентных источников возможно и другими способами. На рисунке 224 приведены классические опыты по интерференции света, в которых разделение излучения происходило с помощью *зеркала Ллойда* и *бипризмы Френеля*. В случае с зеркалом Ллойда (рис. 224, 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. 224, б).





### ▲ 224

Получение когерентных источников:

а) интерференция делением волнового фронта — зеркало Ллойда;

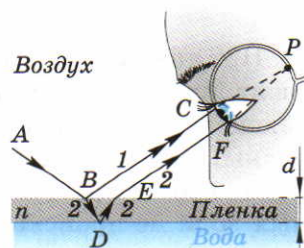
б) интерференция делением амплитуды — бипризма Френеля

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  $d$ , частично отражается (луч 1 — путь  $ABC$ ) и частично преломляется (рис. 225). 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. 288).

Интерференционная картина в тонкой плёнке резко зависит от её толщины, что позволяет измерять толщину плёнки с точностью до  $0,1$  мкм.

Интерференция в тонких плёнках используется для *просветления оптики*.

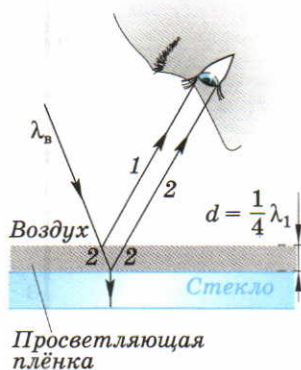
**Просветление оптики** — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки.



### ▲ 225

Ход лучей при интерференции света в тонких плёнках





### ▲ 226

Просветляющее покрытие

Наиболее часто используемый прозрачный материал для просветляющей плёнки —  $\text{MgF}_2$  с коэффициентом преломления  $n_1 = 1,38$ , меньшим коэффициента преломления стекла  $n_2 = 1,5$  (рис. 226). Световые волны 1 и 2, отражённые от передней и задней поверхностей плёнки, оказываются в противофазе, если их время запаздывания равно:

$$\Delta t_{\min} = \frac{T}{2}.$$

С другой стороны, при падении луча перпендикулярно плёнке

$$\Delta t_{\min} = \frac{2d}{v_1},$$

где  $v_1 = c/n_1$  — скорость распространения света в плёнке.

Приравнивая последние выражения, получаем требуемую толщину покрытия:

$$d = \frac{1}{4} v_1 T = \frac{\lambda_1}{4},$$

где  $\lambda_1$  — длина волны света в плёнке.

Толщину покрытия можно выразить через длину волны света  $\lambda_2$  в воздухе

$$d = \frac{\lambda_2}{4n_1}.$$

При такой толщине плёнки световые волны 1 и 2 при интерференции гасят друг друга, что приводит к увеличению доли энергии света, попадающего в оптическую систему. Обычно в качестве  $\lambda_2$  выбирают длину волны, находящейся в жёлто-зелёной части спектра ( $\lambda_2 = 550$  нм), к которой наиболее чувствителен человеческий глаз. Такого гашения отражённых волн не происходит при других длинах волн, чем объясняется фиолетовый цвет просветлённого объектива.

Плёнка оксида кремния  $\text{SiO}$  ( $n_1 = 1,45$ ) наносится на поверхность кремниевых солнечных батарей ( $n_2 = 3,5$ ) для уменьшения отражения от них солнечных лучей, т. е. для максимального преобразования солнечной энергии в электрическую.

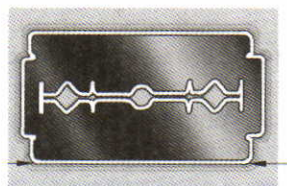
## В О П Р О С Ы

1. Почему невооружённым глазом нельзя наблюдать интерференционную картину от независимых естественных источников света?
2. Опишите опыт Юнга.
3. Как с помощью опыта Юнга можно измерить длину волны света?
4. Как с помощью зеркала Ллойда и бипризмы Френеля получают когерентные источники света?
5. Что такое просветление оптики? Какой должна быть толщина просветляющего покрытия?

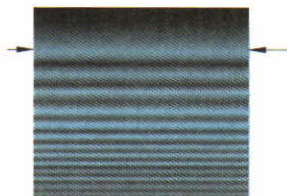
## § 70. Дифракция света

**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. Например, при освещении лезвия монохроматическим светом вне контуров тени наблюдается чередование светлых и тёмных полос (рис. 227). Светлое пятно может возникнуть даже в области геометрической тени за освещённым непрозрачным диском (рис. 228). 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 опровергнуть своими необычными предсказаниями эту теорию. Однако конт-



а)



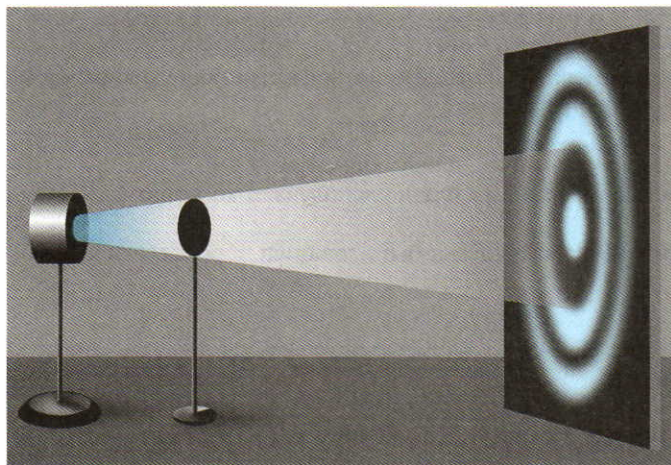
б)

### ▲ 227

*Лезвие при освещении монохроматическим светом:*

- а) реальная тень от лезвия;  
 б) увеличенное изображение тени вблизи нижнего края лезвия





◀ 228

*Освещённость на экране за непрозрачным диском*

рольный опыт лишь блестяще её подтвердил. Описанные выше эксперименты имеют характерную общую особенность. Неоднородность среды (поверхности лезвия и диска) нарушает целостность фронта световой волны, распространяющейся от источника, вызывает отклонение распространения волн от законов геометрической оптики, или *дифракцию*.

**Дифракция — отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики.**

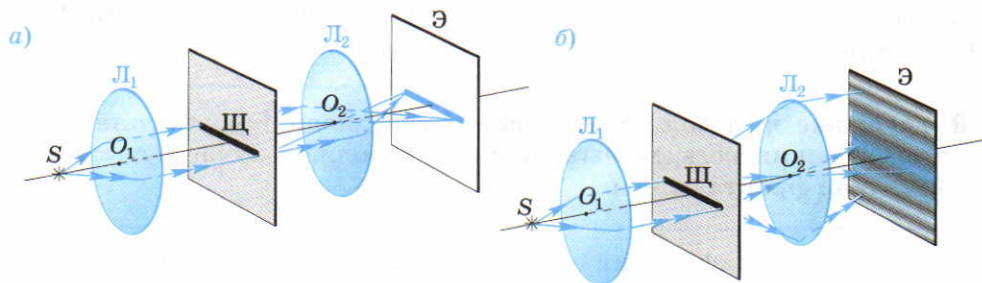
Дифракция сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями среды.

Это явление свойственно всем волновым процессам. Дифракция проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибании волнами препятствий, например 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.

**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. 229). Объяснение такой картины





## ▲ 229

*Интенсивность света за щелью:*

*а) теоретическая картина геометрической оптики;*

*б) результат эксперимента*

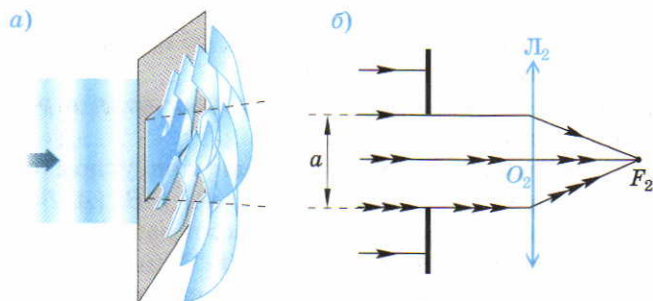
с позиции геометрической оптики оказывается невозможным. На рисунке 229, а приведена картина распределения интенсивности за освещённой щелью, ожидаемая с позиций геометрической оптики, т. е. построено изображение щели, даваемое собирающей линзой  $L_2$  на экране Э. Результат дифракционного эксперимента, приведённый на рисунке 229, б, принципиально отличается от этих предположений.

Теория дифракции света была разработана в 1816 г. французским учёным **Огюстеном Френелем**, развившим идеи Гюйгенса.

**Согласно принципу Гюйгенса:**

- каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде;
- огибающая этих волн определяет положение фронта волны в следующий момент времени.

Принцип Гюйгенса позволяет найти направление распространения фронта волны. Френель дополнил принцип Гюйгенса идеей об интерфе-



## ◀ 230

*Интерференция вторичных волн за щелью:*

- а) возникновение вторичных волн;*  
*б) образование нулевого дифракционного максимума ( $\alpha = 0$ )*

ренции 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.**

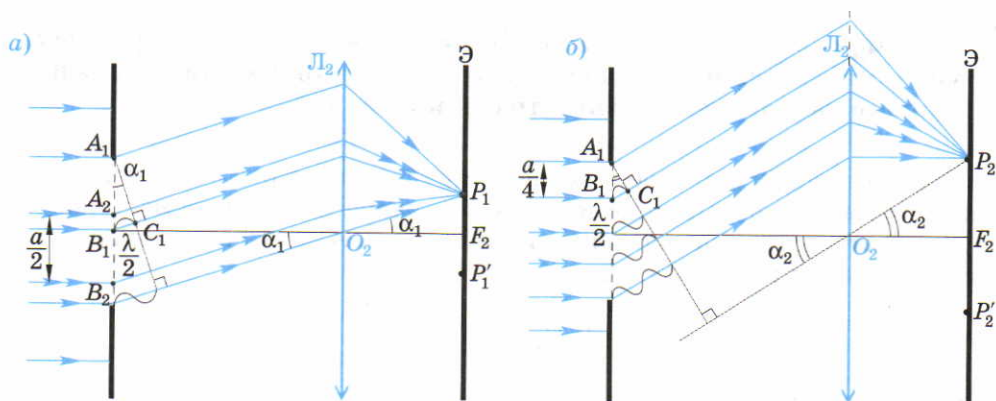
Решить задачу дифракции — значит найти распределение интенсивности света на экране в зависимости от размеров и формы препятствий, вызывающих дифракцию.

Воспользуемся принципом Гюйгенса—Френеля для объяснения дифракционной картины за щелью. Щель можно условно разделить на ряд узких параллельных полосок равной ширины, каждая из которых представляет источник вторичных волн с равной амплитудой. Эти волны когерентны, так как их фазы одинаковы: при нормальном падении волновой фронт совпадает с поверхностью щели. Вторичные волны излучаются во все стороны (рис. 230, 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  $L_2$  (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. 230, 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  $\lambda/2$ . Разделим щель на две равные части (зоны) вдоль её длины. От каждой из зон распространяются вторичные волны. Такое деление щели позволяет свести задачу об интерференции вторичных волн, идущих от разных зон, к задаче об интерференции пар соответственных источников из этих зон.

*Соответственные источники — источники вторичных волн в разных зонах, для которых разность хода одинакова.*

Для вторичных волн, распространяющихся от щели под углом  $\alpha_1$ , такие источники находятся, например, в точках  $A_1$  и  $B_1$ ,  $A_2$  и  $B_2$  ( $A_1B_1 = A_2B_2 = a/2$ ) (рис. 231, а). Интерференция вторичных волн наблюдается в точке  $P_1$ , находящейся в фокальной плоскости линзы  $L_2$ . Минимум интенсивности при интерференции соответственных источников возникает,





### ▲ 231

Возникновение дифракционных минимумов при дифракции света на щели:  
 а) первый дифракционный минимум; б) второй дифракционный минимум

если разность хода вторичных волн, распространяющихся от них, равна  $\lambda/2$ . Для определения разности хода лучей проведём из точки  $A_1$  перпендикуляр  $A_1C_1$  к направлению распространения вторичных волн. Тогда  $\angle B_1A_1C_1 = \alpha$  как углы с соответственно перпендикулярными сторонами. Разность хода соответственных источников

$$\Delta_1 = B_1C_1 = \frac{a}{2} \sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{2}.$$

Следовательно, первый минимум интенсивности при дифракции света на щели наблюдается под минимальным углом  $\alpha_1$  при условии

$$a \sin \alpha_1 = \pm \lambda.$$

Знак «минус» в этом условии возникает из соображений симметрии. Ясно, что такой же минимум интенсивности будет наблюдаться на экране и в точке  $P'_1$ , симметричной  $P_1$  относительно фокуса  $F_2$  линзы  $\mathbb{L}_2$  ( $P_1F_1 = P'_1F_1$ ). (Учитывая протяжённость щели в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, интенсивность света будет минимальной на прямых, проходящих вдоль этого направления через точки  $P_1$  и  $P'_1$ .)

При наблюдении излучения вторичных волн под углом, большим  $\alpha_1$ , разность хода  $\lambda/2$ , соответствующая интерференционному минимуму, будет наблюдаться для соответственных источников, расположенных ближе друг к другу, чем в предыдущем случае. Для получения условия второго интерференционного минимума разделим щель вдоль на четыре части, т. е. на две пары зон Френеля (рис. 231, б).

**Зона Френеля — множество когерентных источников вторичных волн, максимальная разность хода между которыми (для определённого направления распространения) равна  $\lambda/2$ .**

Соседние пары зон Френеля гасят друг друга, так как разность хода соответственных источников из этих зон равна  $\lambda/2$ . В рассматриваемом случае соответственные источники (например,  $A_1$  и  $B_1$ ) находятся на расстоянии  $a/4$  друг от друга, а их разность хода равна:

$$\Delta_2 = B_1C_1 = \frac{a}{4} \sin \alpha_2 = \frac{\lambda}{2}.$$

Второй минимум интенсивности при дифракции света на щели наблюдается при условии:

$$a \sin \alpha_2 = \pm 2\lambda.$$

Знак «минус» соответствует дифракционному минимуму в точке  $P'_2$  ( $P_2F_2 = P'_2F_2$ ).

Разделив щель на чётное число  $2m$  зон Френеля, получаем условие для  $m$ -го дифракционного минимума

$$a \sin \alpha_m = m\lambda, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots \quad (207)$$

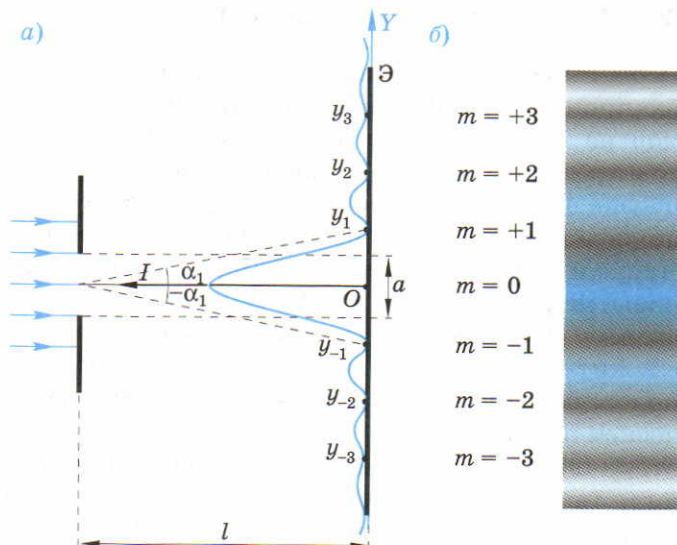
Между дифракционными минимумами располагаются побочные максимумы интенсивности. Центральный максимум  $|\alpha| < \alpha_1$  называют главным дифракционным максимумом.

Распределение интенсивности света на экране за щелью приведено на рисунке 232.

Если экран расположен на большом расстоянии от щели, вторичные волны, интерферирующие на экране, приходят к нему практически параллельно. Поэтому условия дифракционных минимумов и максимумов на экране оказываются практически такими же, как и при наличии линзы (см. рис. 231), сводящей параллельные лучи в одну точку. Интенсивность побочных максимумов более чем в 20 раз меньше интенсивности главного дифракционного максимума. Как видно из рисунка 232, отклонение света от прямолинейного направления становится существенным, когда  $y_1 > a$ . При малом угле  $\alpha_1 \approx \text{tg } \alpha_1 \approx \sin \alpha_1 = \lambda/a$ . С другой стороны,  $\text{tg } \alpha_1 = y_1/l$  ( $y_1 \approx l\alpha_1$ ). Тогда  $y_1 = l\lambda/a$ . Следовательно, дифракция света на отверстиях (или препятствии) размером  $a$  заметно проявляется на расстоянии

$$l > \frac{a^2}{\lambda}. \quad (208)$$





## 232

Распределение интенсивности света за щелью:

- а) теоретический расчёт;  
б) эксперимент

Чем меньше длина волны и чем больше размер препятствия (например, диаметр линзы), тем на больших расстояниях от препятствия наблюдается дифракция, тем менее она существенна. Противоположное неравенство характеризует приближение геометрической оптики, справедливое при условии

$$\lambda \ll \frac{a^2}{l}. \quad (209)$$

Методы геометрической оптики можно использовать для описания распространения достаточно коротких волн, распространяющихся вблизи неоднородностей среды (отверстий, препятствий) больших размеров. Геометрическая оптика — приближённый предельный случай волновой теории.

### ВОПРОСЫ

1. Какое физическое явление называют дифракцией? Каким волновым процессам оно свойственно?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса—Френеля.
3. Какие источники называют соответственными? Дайте определение зоны Френеля.
4. Запишите условие для  $m$ -го дифракционного максимума на щели и поясните его.
5. В каком смысле геометрическая оптика — приближённый предельный случай волновой теории? Запишите условие применимости этого приближения.

## § 71. Дифракционная решётка

**Особенности дифракционной картины.** 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 *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. 233). 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. Расстояние между соответствующими 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

$$d \sin \alpha_m = m\lambda, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2, \dots \quad (210)$$

*Увеличение числа щелей приводит к увеличению яркости дифракционной картины.* Если число щелей  $N$ , а амплитуда напряжённости электрического поля, излучаемого одной щелью,  $E_0$ , то результирующая амплитуда в главном максимуме  $E = NE_0$ . Интенсивность света  $I$  в максимуме пропорциональна квадрату амплитуды  $I \sim E^2$ . Соответственно

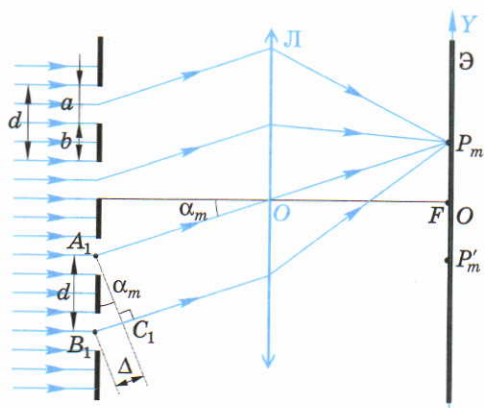
$$I = N^2 I_0,$$

где  $I_0$  — интенсивность света, излучаемого одной щелью.

*Интенсивность света в главном дифракционном максимуме пропорциональна квадрату полного числа щелей дифракционной решётки.*

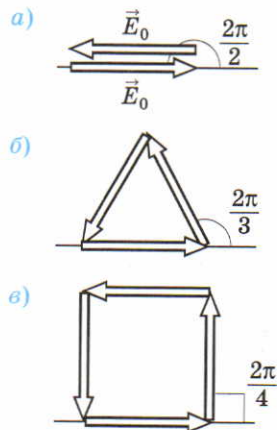
Побочные минимумы возникают в результате интерференции вторичных волн, распространяющихся от разных щелей. В случае двух щелей результирующий минимум интенсивности возникает, если разность фаз





▲ 233

Дифракция света на решётке



▲ 234

Векторные диаграммы для дифракционных минимумов:

- а) две щели ( $N = 2$ );
- б) три щели ( $N = 3$ );
- в) четыре щели ( $N = 4$ )

колебаний между ними  $\Delta \varphi = \pi = 2\pi/2$  (разность хода  $\lambda/2$ ) (рис. 234, а).  $N$  щелей (рис. 234, б, в) дают минимум интенсивности света при разности хода между ними:

$$\Delta_p = \frac{\lambda}{N}, \text{ где } p = \pm 1; \pm 2, \dots, p \neq kN, k = 1, 2, 3, \dots$$

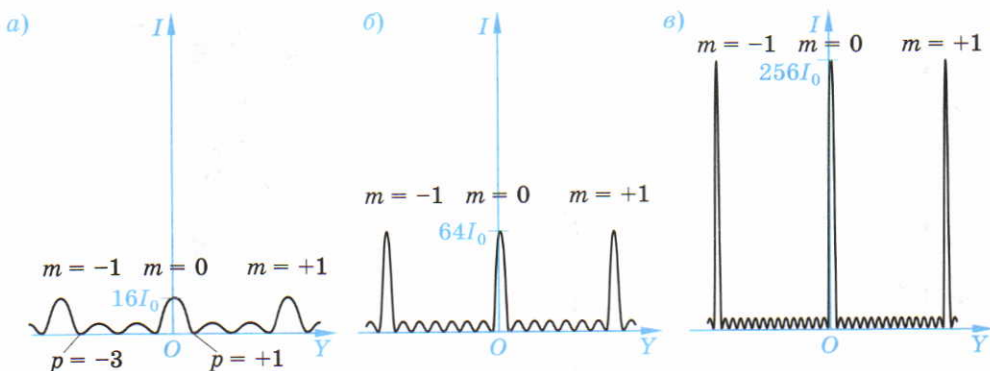
Выражая разность хода через период решётки, получаем условие побочного минимума, наблюдаемого под углом  $\alpha_p$ :

$$d \sin \alpha_p = \frac{\lambda}{N} p, \text{ где } p = \pm 1, \pm 2, \dots, p \neq kN, k = 1, 2, \dots \quad (211)$$

Объединим условия главных максимумов (212) и побочных минимумов (211):

$$d \sin \alpha = 0, \frac{\lambda}{N}, 2 \frac{\lambda}{N}, 3 \frac{\lambda}{N}, \dots, (N-1) \frac{\lambda}{N}, \lambda, (N+1) \frac{\lambda}{N}, \dots, 2\lambda, \dots$$

(Главные максимумы выделены.) Видно, что между двумя главными максимумами располагается  $(N - 1)$  побочных минимумов (разделённых побочными максимумами). Интенсивности этих максимумов много меньше интенсивности главных максимумов. Чем больше число щелей, тем



### ▲ 235

*Интенсивность света за дифракционной решёткой:*

*а) четыре щели; б) восемь щелей; в) шестнадцать щелей*

больше побочных максимумов и минимумов между главными максимумами. Увеличение числа щелей приводит к сужению главных и побочных максимумов (рис. 235).

Как следует из формулы (211), полуширина главного максимума  $\alpha_1 = \lambda/(Nd)$  ( $\sin \alpha_p \approx \alpha_p$ ,  $p = +1$ ). Резкость главных максимумов тем больше, чем больше произведение  $Nd$ , т. е. чем больше полная ширина решётки.

**Разрешающая способность дифракционной решётки.** С помощью дифракционной решётки с известным периодом можно производить измерения длины волны. Определение длины волны сводится к измерению угла  $\alpha_m$ , соответствующего направлению на главный максимум интенсивности (согласно формуле (210)).

При освещении решётки немонахроматическим светом (например, солнечным), содержащим разные длины волн, решётка разлагает свет в спектр. Из формулы (210) следует, что положение главных максимумов зависит от длины волны  $\lambda$ : чем больше  $\lambda$ , тем дальше от центра располагается соответствующий максимум:

$$\sin \alpha_m = \frac{m\lambda}{d}, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2, \dots$$

Из-за того что длина волны красного цвета  $\lambda_1$  больше длины волны синего цвета  $\lambda_2$ , дифракционный угол  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Поэтому в спектре, даваемом дифракционной решёткой, красные линии расположены дальше синих от центра дифракционной картины (рис. IX, а на цветной вклейке, с. 352).



Однако, чем меньше различие двух длин волн, тем ближе они располагаются на экране. При предельной близости длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  их главные максимумы накладываются друг на друга, так что различить их становится невозможно.

Разрешающая способность спектрального прибора характеризует возможность раздельного наблюдения двух спектральных линий, имеющих близкие длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Величина  $A = \frac{\lambda_1}{|\lambda_2 - \lambda_1|}$  называется *разрешающей способностью дифракционной решётки*.

Раздельное наблюдение главных максимумов  $m$ -го порядка близких длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  оказывается возможным, когда главный максимум, соответствующий  $\lambda_2$ , приходится на первый побочный минимум, соответствующий  $\lambda_1$  (рис. IX, б на цветной вклейке, с. 352). При этом

$$\alpha''_m - \alpha'_m = \alpha_1,$$

где  $\alpha'_m, \alpha''_m$  — углы наблюдения  $m$ -х максимумов с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,  $\alpha_1 = \lambda_1/(Nd)$  — полуширина  $m$ -го главного максимума.

Из формулы (210) следует, что  $\alpha'_m = \frac{m\lambda_1}{d}$ , а  $\alpha''_m = \frac{m\lambda_2}{d}$ . Тогда последнее равенство можно привести к виду

$$A = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = Nm.$$

*Высокую разрешающую способность имеют дифракционные решётки с большим числом штрихов  $N$  при наблюдениях спектров высокого порядка  $m > 1$ .*

## ВОПРОСЫ

1. Почему использование дифракционной решётки предпочтительнее в спектральных экспериментах, чем применение щели?
2. Запишите и обоснуйте условие главных максимумов при дифракции света на решётке. Как интенсивность света в главных максимумах зависит от полного числа щелей?
3. Запишите и объясните условие побочных минимумов при дифракции света на решётке.
4. Докажите, что резкость главных максимумов возрастает при увеличении ширины решётки.
5. Какую величину называют разрешающей способностью дифракционной решётки? Что она характеризует и от каких параметров решётки зависит?

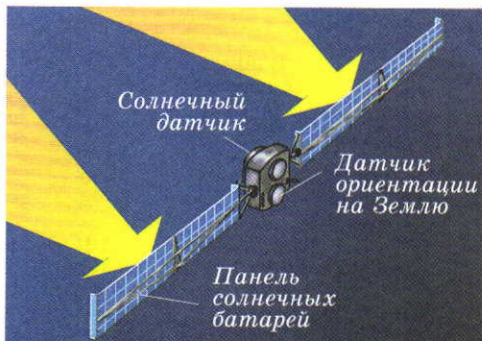
### ЗАДАЧИ

1. На плоскую щель шириной  $a = 10$  мкм падает перпендикулярно щели монохроматический жёлтый свет от натриевой лампы с длиной волны  $\lambda = 589$  нм. Найдите углы, под которыми на экране за собирающей линзой будут расположены нулевой максимум и максимум третьего порядка. [0°; 10°10']
2. При дифракции монохроматического света на щели шириной  $a = 10$  мкм на экране, расположенном за щелью на расстоянии  $l = 1$  м, возникает первый минимум на расстоянии  $y_1 = 6$  см от нулевого максимума. Рассчитайте длину волны падающего света, укажите его цвет. [600 нм; жёлтый]
3. На дифракционную решётку, содержащую 200 щелей (штрихов) на 1 мм падает свет с длиной волны 500 нм. Найдите, под каким углом виден первый дифракционный максимум. [5°44']
4. Период дифракционной решётки  $d = 2,5$  мкм. Сколько максимумов будет содержать спектр, образующийся при нормальном падении на решётку монохроматического жёлтого света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм? [9]
5. Дифракционная решётка с периодом  $d = 10$  мкм имеет 500 щелей (штрихов). Начиная с максимума какого порядка с её помощью можно разрешить (наблюдать раздельно) две линии спектра натрия с длинами волн  $\lambda_1 = 589$  нм и  $\lambda_2 = 589,6$  нм? [Со второго порядка]

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **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:  

$$\Delta t_{\max} = mT, \text{ где } m = 0; \pm 1; \pm 2, \dots$$
- **Минимальная результирующая интенсивность** при интерференции когерентных колебаний в определённой точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное нечётному числу полупериодов этих колебаний:



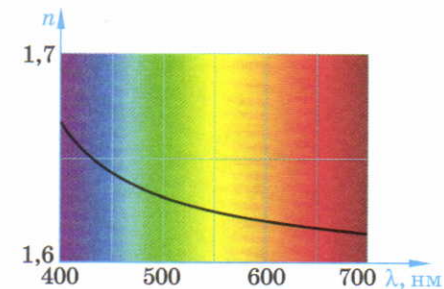
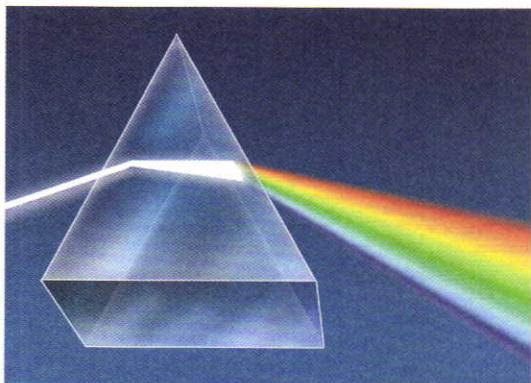
а)



б)

#### ▲ IV

Радиационное давление излучения Солнца:  
 а) на панели солнечных батарей спутника Земли;  
 б) на хвост кометы



а)

б)

#### ▲ V

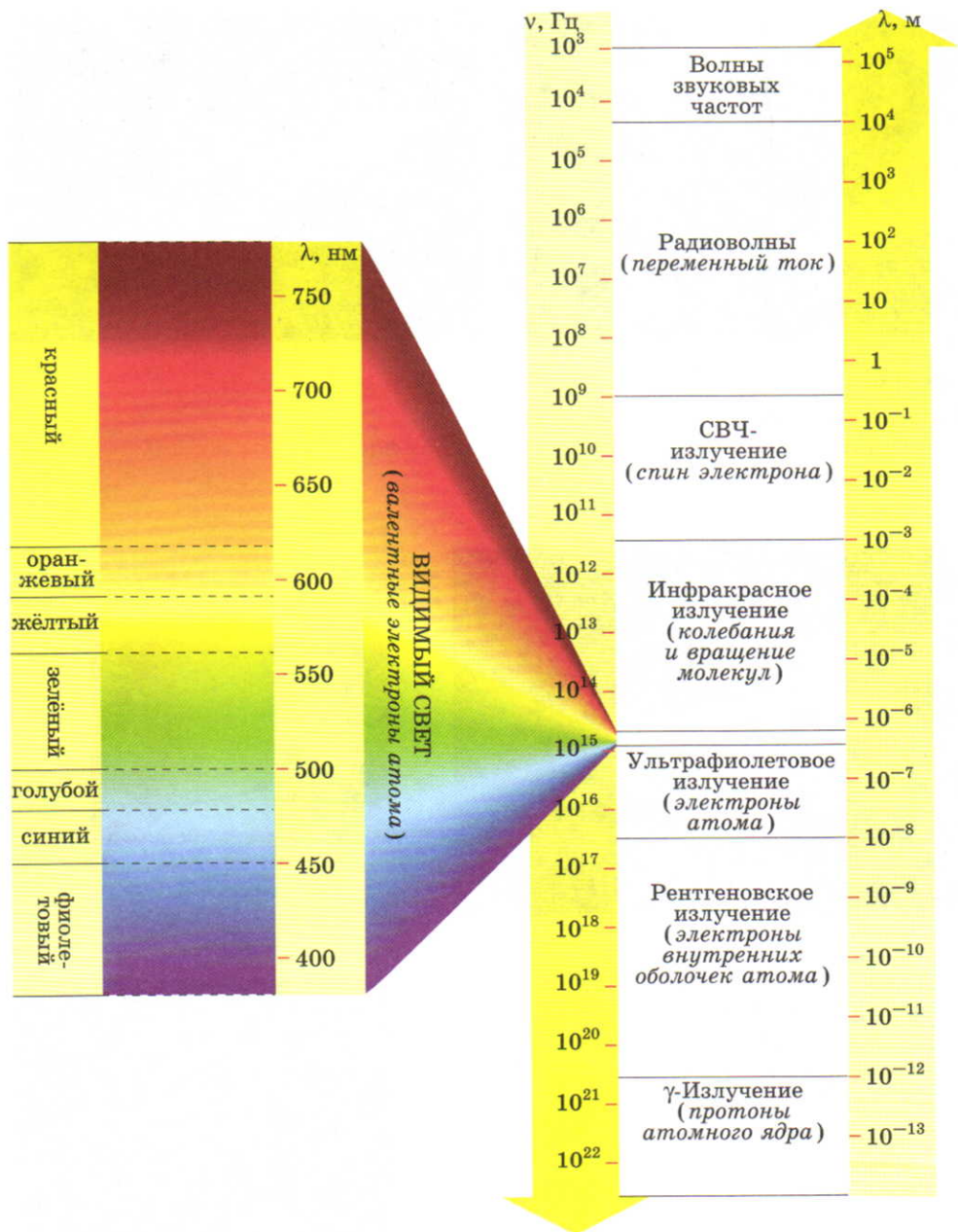
Дисперсия света:  
 а) призма Ньютона;  
 б) зависимость показателя преломления от длины волны



#### ▶ VI

Интерференция света в тонких плёнках.  
 Масляная плёнка на поверхности воды,  
 освещённая солнечным светом





## ▲ VII

Спектр электромагнитных волн и источники их излучения

$$\Delta t_{\max} = (2m + 1)T/2,$$

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 светового потока от источника естественного света.

- **Просветление оптики** — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки.

- **Дифракция** — отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики. Дифракция сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями среды; проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибании волнами препятствий, например 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.

- **Зона Френеля** — множество когерентных источников вторичных волн, максимальная разность хода между которыми (для определённого направления распространения) равна  $\lambda/2$ .

- **Условие дифракционного минимума на щели** ( $a$  — ширина щели):

$$a \sin \alpha_m = m\lambda,$$

где  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ ;  $\alpha_m$  — угол наблюдения.

Приближение геометрической оптики справедливо при условии

$$\lambda \ll \frac{a^2}{l},$$

где  $a$  — размер препятствия на пути волны,  $l$  — расстояние до препятствия.

- **Условие главных максимумов при дифракции света на решётке** с периодом  $d$ :

$$d \sin \alpha_m = m\lambda,$$

где  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$

Увеличение числа щелей приводит к увеличению интенсивности и уменьшению ширины главных максимумов.

Возможность раздельного наблюдения главных максимумов  $m$ -го порядка близких длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  характеризуется разрешающей способностью  $A$  дифракционной решётки:

$$A = \frac{\lambda_1}{|\lambda_2 - \lambda_1|}.$$

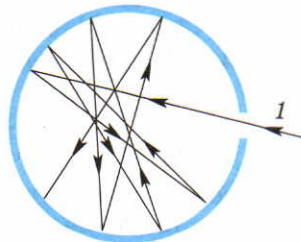
Чем больше число  $N$  щелей и выше порядок спектра  $m$ , тем выше разрешающая способность дифракционной решётки.

## § 72. Тепловое излучение

**Ультрафиолетовая катастрофа.** Тела, нагретые до достаточно высокой температуры, приобретают способность светиться, излучая электромагнитные волны.

**Тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт своей внутренней энергии.**

Тепловое излучение ведёт к уменьшению внутренней энергии и, следовательно, к снижению температуры тела, к его охлаждению. Увеличение внутренней энергии (а значит, повышение температуры тела) возможно лишь при поглощении телом энергии. Испуская электромагнитные волны, а также частично поглощая падающие на них волны, тела способны обмениваться энергией. Постоянная температура тела (или тепловое равновесие в термодинамически изолированной системе) устанавливается, когда уменьшение энергии тела в результате излучения компенсируется её увеличением при поглощении. При термодинамическом равновесии спектр излучаемой и поглощаемой энергий остаётся неизменным во времени.



### ▲ 236

Модель абсолютно  
чёрного тела

Примером равновесного излучения является излучение внутри замкнутой оболочки, окружённой снаружи теплоизоляцией. Энергия, излучаемая каждым элементом поверхности оболочки в единицу времени, равна энергии, передаваемой излучением этому элементу за то же время. Благодаря замкнутости оболочки такое тело, называемое *абсолютно чёрным*, поглощает всю падающую на него энергию.

Для экспериментального наблюдения излучения абсолютно чёрного тела внутри оболочки делают небольшое отверстие (рис. 236).



**Абсолютно чёрное тело — тело, поглощающее всю энергию падающего на него излучения любой частоты при произвольной температуре.**

Луч света  $l$ , попадающий внутрь полости через отверстие, претерпевает многократные отражения от стенок полости. При каждом отражении происходит частичное поглощение энергии света стенками. Поэтому независимо от материала внутренней поверхности оболочки интенсивность света, выходящего из полости через отверстие, во много раз меньше интенсивности падающего извне излучения. Это означает, что практически всё излучение, попадающее в полость, поглощается. По той же причине открытые окна домов днём кажутся чёрными, хотя в комнатах достаточно светло из-за отражения дневного света от стен.

Спектральной характеристикой теплового излучения тела является *спектральная плотность энергетической светимости*  $r_\nu$  — энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот.

Единица спектральной плотности энергетической светимости — *джоуль на квадратный метр* ( $1 \text{ Дж/м}^2$ ). Энергия теплового излучения абсолютно чёрного тела зависит от температуры и длины волны. Единственной комбинацией этих величин с размерностью  $\text{Дж/м}^2$  является  $kT/\lambda^2$  ( $\lambda = c/\nu$ ). Точный расчёт, проделанный *Рэлеем* и *Джинсом* в 1900 г., в рамках классической волновой теории дал следующий результат:

$$r_\nu = 2\pi \frac{\nu^2}{c^2} kT, \quad (212)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Как показал опыт, выражение (212) согласуется с экспериментальными данными лишь в области достаточно малых частот (рис. 237). Для больших частот особенно в ультрафиолетовой области спектра формула Рэрея—Джинса неверна: она резко расходится с экспериментом. Методы классической физики оказались недостаточными для объяснения характеристик излучения абсолютно чёрного тела. Поэтому расхождение результатов классической волновой теории с экспериментом в конце XIX в. получило название «ультрафиолетовой катастрофы».

**Квантовая гипотеза Планка.** В 1900 г. правильное, согласующееся с опытными данными выражение для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела было получено немецким физиком *Максом Планком*. Остановимся на физическом механизме теплового излучения. В результате столкновений хаотически движущихся

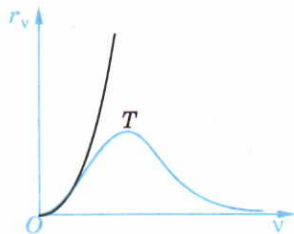
частиц вещества возникает их ускоренное движение. Его следствием является тепловое излучение тела. Чем больше энергия, получаемая частицей в результате столкновения, тем больше энергия её теплового излучения. Однако число частиц, имеющих очень большую энергию при определённой температуре  $T$ , невелико (см. Ф-10, рис. 178). Это означает, что излучение большой энергии маловероятно. С другой стороны, эксперимент показал (в отличие от формулы Рэля—Джинса), что излучение высоких частот также маловероятно. Планк предположил, что *энергия излучения и его частота связаны друг с другом*. При этом 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:

$$E = h\nu, \quad (213)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка.

Теория теплового излучения абсолютно чёрного тела, разработанная Планком с учётом квантовой гипотезы, прекрасно согласовывалась с экспериментом (рис. 237).

Особенностью фундаментальных физических теорий является их преемственность. Более общая квантовая теория определяет границу применимости волновой теории света. Согласно классической волновой теории излучение электромагнитных волн происходит непрерывно, т. е. (на языке квантовой теории) энергия кванта излучения может быть бесконечно малой. Как видно из формулы (213), энергия кванта излучения при малых частотах действительно невелика по сравнению с тепловой энергией. Вот почему в этом диапазоне частот классическая теория удовлетворительно описывает эксперимент. При больших частотах энергия кванта излучения велика, поэтому классические представления о непрерывности излучения неприменимы. Этим и объясняется причина ультрафиолетовой катастрофы.



### ▲ 237

*Тепловое излучение абсолютно чёрного тела: ультрафиолетовая катастрофа — расхождение классической теории теплового излучения с опытом*

**Законы теплового излучения.** Чем выше температура  $T$  нагретого абсолютно чёрного тела, тем большее число частиц, входящих в его состав, обладает высокой энергией. Поэтому при увеличении температуры тела от  $T_1$  до  $T_2$  возрастает энергия теплового излучения на всех частотах.



тах, а максимум излучательной способности (при частоте  $\nu_m$ ) смещается в область больших частот ( $\nu_{m2} > \nu_{m1}$ ).

Закон смещения Вина:

$$\nu_m = b_1 T,$$

где  $b_1$  — коэффициент пропорциональности.

*Частота, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, прямо пропорциональна его абсолютной температуре* (рис. X на цветной вклейке, с. 352). Учитывая связь частоты с длиной волны излучения, закон смещения Вина можно представить в виде

$$\lambda_m T = b, \quad (214)$$

где  $b \approx 3000$  мкм · К — постоянная Вина.

*Произведение длины волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела, на его температуру есть величина постоянная.*

Спектр излучения звёзд близок к спектральному составу излучения абсолютно чёрного тела, потому что энергия, излучаемая звездой, составляет лишь небольшую часть её внутренней энергии. Например, максимум излучения Солнца приходится на  $\lambda_m \approx 0,5$  мкм. Если рассматривать Солнце как чёрное тело, с помощью закона смещения Вина можно оценить температуру наружных слоёв Солнца:  $T \approx 6000$  К. На рисунке X на цветной вклейке для сравнения приведена спектральная плотность энергетической светимости вольфрамовой нити лампы накаливания ( $T_1 = 3000$  К).

Для получения *интегральной* (полной) *светимости*  $R_T$  абсолютно чёрного тела при температуре  $T$  необходимо просуммировать (проинтегрировать) спектральные плотности  $r_\nu$  по всем частотам.

**Интегральная светимость — мощность излучения с единицы поверхности тела:**

$$R_T = \int_0^{\infty} r_\nu d\nu.$$

Интегральные светимости Солнца и вольфрамовой нити лампы накаливания графически равны площадям под кривыми на рисунке X на цветной вклейке.



### Закон Стефана—Больцмана

**Интегральная светимость абсолютно чёрного тела зависит только от его температуры:**

$$R_T = \sigma T^4, \quad (215)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана—Больцмана.

*Интегральная светимость абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его термодинамической температуры.*

**ФОТОН.** Световые кванты можно рассматривать как реальные микро-частицы — *фотоны*, из которых состоит электромагнитное излучение. Фотон — микрочастица, квант электромагнитного излучения. Фотон обладает следующими свойствами.

- Энергия фотона пропорциональна частоте электромагнитного излучения:  $E = h\nu$ .
- Фотон — электрически нейтральная частица, т. е.  $q = 0$ .
- Скорость фотона во всех системах отсчёта равна скорости света в вакууме:

$$\nu = c.$$

- Фотон обладает импульсом:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (216)$$

- Давление электромагнитного излучения, или фотонного газа, можно рассчитывать подобно давлению идеального газа ( $p = 2/3w$ , где  $w$  — объёмная плотность энергии газа). Множитель  $1/3$  в этом выражении появился за счёт того, что частицы идеального газа могут с равной вероятностью двигаться по трём координатным осям. Фотоны, распространяясь лишь в одном направлении, подобно частицам идеального газа упруго отражаются от стенок, оказывая на них давление

$$p_{\text{эм}} = 2\bar{w}_{\text{эм}} = 2\frac{I}{c},$$

где  $I$  — интенсивность электромагнитного излучения.

### ВОПРОСЫ

1. Какое излучение называют тепловым? Почему тепловое излучение снижает температуру тела? Какая величина является спектральной характеристикой теплового излучения?

2. Какое тело называют абсолютно чёрным? Приведите примеры абсолютно чёрных тел.
3. Что такое ультрафиолетовая катастрофа? Сформулируйте квантовую гипотезу Планка.
4. Какую микрочастицу называют фотоном? Перечислите основные физические характеристики фотона.
5. Сформулируйте законы излучения чёрного тела: законы Вина и Стефана—Больцмана.

## § 73. Фотоэффект

**Опыты Столетова.** Если электромагнитная волна состоит из отдельных квантов (фотонов), то поглощение света, как и его излучение, происходит прерывно: фотоны передают всю свою энергию атомам и молекулам вещества целиком.

Ещё одним подтверждением правильности квантовой теории было объяснение *Альбертом Эйнштейном* в 1905 г. явления *фотоэффекта*.

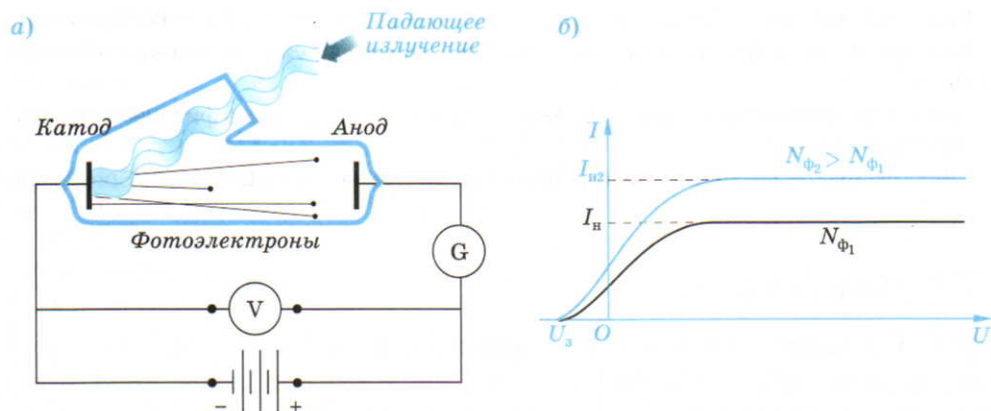
**Фотоэффект — явление вырывания электронов из твёрдых и жидких веществ под действием света.**

Если вырванные электроны вылетают за пределы вещества, фотоэффект называют *внешним*.

Фотоэффект был открыт в 1887 г. *Генрихом Герцем*, а затем исследовался экспериментально русским учёным *А. Г. Столетовым*, немецким физиком *В. Гальваксом* и итальянским учёным *А. Риги*.

Принципиальная схема установки для исследования фотоэффекта приведена на рисунке 238, *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, вырывающиеся светом из катода, под действием электрического поля притягиваются к положительно заряженному аноду. Возникающий в цепи электрический ток называют *фототоком*, а вырванные электроны *фотоэлектронами*. Фототок возникает даже в отсутствие разности потенциалов между анодом и катодом.





### ▲ 238

Опыт Столетова:

а) схема установки; б) вольт-амперная характеристика при фотоэффекте

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*  $I_H$  (рис. 238, 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 238, б.

**Законы и квантовая теория фотоэффекта.** Опытным путём были установлены следующие законы.

#### Законы фотоэффекта

1. Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.

Эти законы невозможно объяснить с помощью волновой теории света.

Согласно этой теории под действием поля световой волны в металле возникают вынужденные колебания электронов. В результате кинетическая энергия электрона может оказаться достаточной для преодоления сил притяжения, удерживающих его внутри металла, т. е. для выхода из металла. При этом кинетическая энергия фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности падающего света, так как с увеличением интенсивности электрону передавалась бы большая энергия. Однако этот вывод противоречит второму закону фотоэффекта. Кроме того, согласно волновой теории свет достаточной интенсивности должен вырывать электроны из металла независимо от частоты излучения; иными словами, красной границы фотоэффекта не должно быть, что противоречит третьему закону фотоэффекта.

Явление фотоэффекта и его законы были объяснены на основе предложенной **Альбертом Эйнштейном** квантовой теории света. Согласно этой теории, распространение света следует рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а 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. 238, б).

Объяснить второй и третий законы фотоэффекта Эйнштейну удалось с помощью закона сохранения энергии. Энергию связи электрона в металле характеризуют *работой выхода*  $A_{\text{вых}}$ .

**Работа выхода — минимальная работа, которую нужно совершить для удаления электрона из металла.**

Значения работы выхода для некоторых металлов приведены в таблице 12.

Энергия фотона идёт на совершение работы выхода и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии

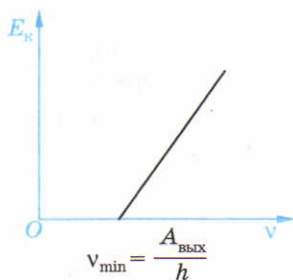
$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2}. \quad (217)$$

Закон сохранения энергии (217) называют *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

**Таблица 12**  
**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





### ▲ 239

Зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты

Кинетическая энергия фотоэлектрона зависит от частоты света линейно (второй закон фотоэффекта):

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = h \left( \nu - \frac{A_{\text{вых}}}{h} \right). \quad (218)$$

График зависимости  $E_k(\nu)$  приведён на рисунке 239. Кинетическая энергия всегда положительна. Это значит, что фотоэффект будет наблюдаться для частот

$$\nu \geq \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Предельная частота  $\nu_{\text{мин}}$  определяет *красную границу фотоэффекта*, ниже которой фотоэффект невозможен (третий закон фотоэффекта):

$$\nu_{\text{мин}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (219)$$

Например, для натрия красной границе соответствует длина волны (см. табл. 12)

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{c}{\nu_{\text{мин}}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}} = 0,54 \text{ мкм}.$$

Излучение такой длины волны находится в красном диапазоне видимого спектра, чем и объясняется исторически сложившееся название — красная граница. Однако для других металлов, например для цинка, красной границе соответствует ультрафиолетовое излучение.

По углу наклона зависимости  $E_k(\nu)$  возможно экспериментальное определение значения постоянной Планка  $h$ .

Совпадение значений постоянной Планка, введённой в теориях теплового излучения и фотоэффекта, подтверждает правильность предположения о квантовом характере излучения и поглощения света веществом.

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.

## ВОПРОСЫ

1. Какое физическое явление называют фотоэффектом?
2. Опишите принципиальную схему опыта Столетова. Что такое фототок и фотоэлектроны?

3. Сформулируйте три закона фотоэффекта и объясните вольт-амперную характеристику при фотоэффекте. Как она будет выглядеть при большей интенсивности света?
4. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Какую величину называют работой выхода?
5. Объясните график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света. Как рассчитывается красная граница фотоэффекта?

### ЗАДАЧИ

1. Найдите энергию фотона с длиной волны  $\lambda = 400$  нм. [3,1 эВ]
2. Найдите кинетическую энергию электрона, вырываемого с поверхности Na фиолетовым светом с длиной волны  $\lambda = 400$  нм. [0,82 эВ]
3. Используя данные таблицы 11, найдите красную границу  $\nu_{\min}$  фотоэффекта для натрия. [550 ТГц]
4. Найдите задерживающую разность потенциалов для фотоэлектронов, вырываемых с поверхности натрия светом с длиной волны  $\lambda = 400$  нм. [0,82 В]
5. Одна из пластин плоского конденсатора, изготовленная из материала с работой выхода  $A$ , освещается излучением с длиной волны  $\lambda$ . Ежесекундно с каждого метра площади пластины вырывается  $N$  фотоэлектронов, которые собираются на второй пластине, находящейся на расстоянии  $d$  от первой. Через какой промежуток времени фототок прекратится? [ $\tau = \epsilon_0(hc/\lambda - A_{\text{вых}})/e^2Nd$ ]

## § 74. 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 в 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 микрочастицы, энергия и импульс которых (в отличие от обычных материальных точек) выражаются через волновые характеристики — частоту и длину волны:

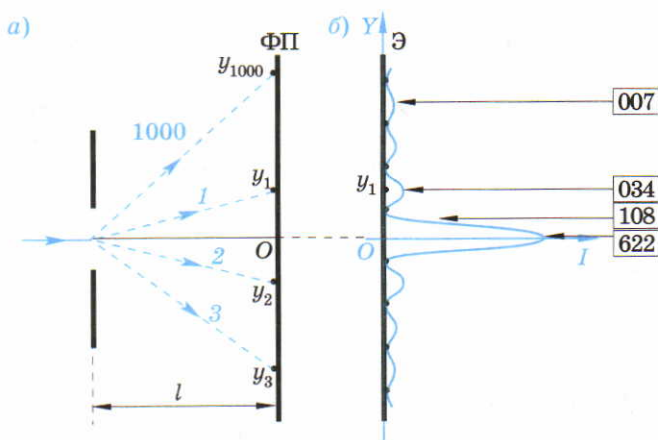
$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

**Дифракция отдельных фотонов.** Дифракция и интерференция света объясняются наличием волновых свойств у каждого отдельного фотона. Прямым подтверждением этого явились опыты 1909 г. *Джозефа Тэйлора* по наблюдению дифракции поочередно летящих мимо иглы одиночных фотонов. В принципе подобная дифракция, например на щели, могла наблюдаться ещё в XVII в. Гримальди и Гюйгенсом или в начале XIX в. Френелем. Для этого интенсивность света, падающего на щель, следовало существенно понизить (например, как в экспериментах Тэйлора — с помощью светофильтров). Ослабление интенсивности означает уменьшение числа  $N_{\phi}$  падающих на щель фотонов. В результате можно настолько уменьшить  $N_{\phi}$ , что фотоны будут следовать друг за другом с интервалом времени, на несколько порядков превышающим время, за которое фотон попадёт на фотопластинку ФП, помещённую за щелью на расстоянии  $l$  (рис. 240). Благодаря этому фотоны не могут взаимодействовать (интерферировать) друг с другом, а налетают на щель поодиночке. 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 240, *а* показаны возможные точки попадания фотонов на фотопластинку. Результат суммирования числа фотонов, попадающих в окрестность точки с определённой координатой  $y$ , приведён на рисунке 240, *б* (после 1000 экспериментов). Например, в окрестность точки с координатой  $y_1$  попали 34 фотона. Чем больше фотонов попадают в данную область, тем больше интенсивность света в ней. Полученная зависимость интенсивности света от координаты полностью совпадает с картиной распределения интенсивности света за щелью, описываемой волновой теорией (см. рис. 232). Дифракционная картина на экране Э за щелью оказывается результатом статистического распределения отдельных фотонов на экране.

240

Дифракция одиночных фотонов на щели:

- а) попадание на фотопластинку одиночного фотона;
- б) суммирование результатов отдельных измерений



В область дифракционных максимумов попадает много фотонов, в области минимумов их мало. Анализ дифракции одиночных фотонов на щели показывает, что движение фотонов принципиально отличается от движения классических частиц. 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 щель попадёт фотон. Можно говорить лишь о вероятности попадания фотона в окрестность определённой точки.

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.

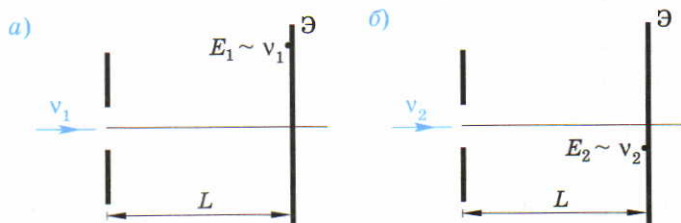
При большой интенсивности света (число фотонов велико) свойства света хорошо объясняются волновой теорией. В случае малой интенсивности света, т. е. малого числа фотонов, свойства света описываются квантовой теорией.

При падении на щель одиночных фотонов разной частоты  $\nu_1$  (рис. 241, а) и  $\nu_2 > \nu_1$  (рис. 241, б) на экране возникают локальные засветки (вспышки

241

Дифракция света на щели малой интенсивности:

- а) частоты  $\nu_1$ ;
- б) частоты  $\nu_2$





разного цвета, соответствующего данной частоте), энергия которых пропорциональна частоте света. Коэффициентом пропорциональности между энергией и частотой является постоянная Планка  $h$ . Постановка подобного эксперимента, а заодно и открытие квантования света в принципе были возможны и в XVIII в., хотя обоснованное объяснение этого явления, вероятно, было бы затруднительно для учёных того времени.

### 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. Как экспериментально наблюдалась дифракция одиночных фотонов на щели?
4. Что показывает анализ опыта по дифракции одиночных фотонов на щели? Почему возникает дифракционная картина за щелью?
5. При каком условии свойства света хорошо описываются волновой теорией, а при каком — квантовой?

## § 75. 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  $\lambda_B$ :

$$E = h\nu; \quad p = \frac{h}{\lambda_B}.$$

**Волновые свойства любой частицы, обладающей импульсом  $p$ , характеризует длина волны де Бройля:**

$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \quad (220)$$

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  $2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ , длина волны де Бройля оказывается соизмеримой с размером атома:

$$\lambda_B = \frac{h}{m_e v_e} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}} = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

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  $\lambda = \lambda_B$ .

Волновые свойства частиц не являются их коллективной характеристикой, а присущи каждой частице в отдельности. В 1949 г. российские физики *В. А. Фабрикант, Л. М. Биберман, Н. Г. Сушкин* выполнили опыт по дифракции электронного пучка предельно малой интенсивности. В этом эксперименте электроны следуют друг за другом с интервалом времени, на четыре порядка превышающим время, за которое электрон попадает на фотопластинку. Это означает, что каждый электрон дифрагирует независимо от других (подобно дифракции отдельных фотонов).

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 экрана неодинакова.*

**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.

Корпускулярно-волновой дуализм частиц означает, что корпускулярные и волновые свойства неразделимы. Координата частицы характери-



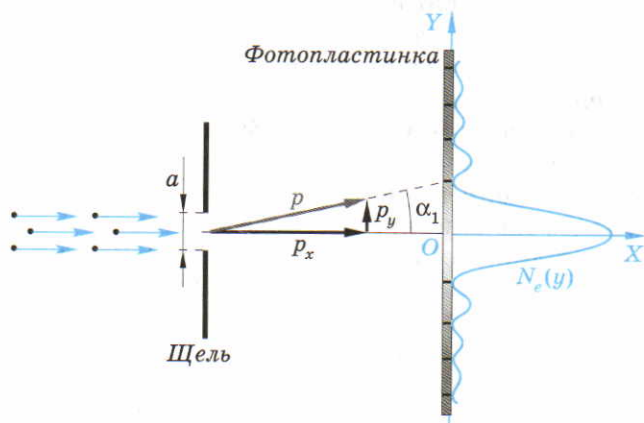
зует её корпускулярные свойства, длина волны де Бройля и связанный с ней импульс характеризует волновые свойства частицы. Точное определение координаты означает предпочтение корпускулярных свойств волновым. Определённая величина импульса частицы свидетельствует о приоритете волновых свойств.

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 удерживать 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. 242). 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 электронов 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  $Y$ :

$$p_y = p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda_B} \sin \alpha.$$



## 242

Измерение импульса частицы при её локализации

Для оценки  $p_y$  можно использовать угол  $\alpha_1$ , соответствующий первому дифракционному минимуму на щели (см. формулу (207)):

$$a \sin \alpha_1 = \lambda_B.$$

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:**

$$\Delta y \Delta p_y \geq h. \quad (221)$$

Обсудим физический смысл соотношения неопределённостей. Предположим, что импульс  $p$  частицы известен точно, т. е.  $\Delta p_y = 0$ . Это значит, что известна и длина волны де Бройля  $\lambda_B = h/p$ . Из соотношения неопределённостей следует, что

$$\Delta y \geq \frac{h}{\Delta p_y}.$$

Следовательно,  $\Delta y \rightarrow \infty$ .

Дело в том, что длина волны точно определена лишь для гармонической волны постоянной амплитуды и бесконечной протяжённости по оси  $Y$ . Это значит, что частицу можно обнаружить в любой точке пространства. Она не локализована и  $\Delta y \rightarrow \infty$ .

С другой стороны, чем точнее определяется координата частицы, тем менее точными становятся сведения о её импульсе. Если  $\Delta y \rightarrow 0$ , то

$$\Delta p_y \geq \frac{h}{\Delta y} \rightarrow \infty.$$

Говорить об определённой длине волны де Бройля и соответственно об определённом импульсе частицы при её локализации бессмысленно. Как



отмечалось ранее, длина волны определена лишь для гармонической волны бесконечной протяжённости, когда  $\Delta y \rightarrow \infty$ .

Соотношение неопределённостей Гейзенберга позволяет оценивать минимальные энергии, которыми обладают микрочастицы при их локализации в определённой области пространства. Таким образом можно, например, оценить по порядку величины энергию электрона в атоме.

Размер атома лития около  $4 \cdot 10^{-10}$  м. Такого же порядка неопределённость координаты  $\Delta y$  электрона. Тогда неопределённость его импульса  $\Delta p_y \geq h/\Delta y$ , а минимальная кинетическая энергия электрона в атоме Li

$$E_k = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = \frac{h^2}{2m_e(\Delta y)^2} \approx 8 \text{ эВ} \quad (1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}).$$

Полученная величина близка к реальной энергии электрона в этом атоме.

Соотношение неопределённостей существует и между другими парами физических величин, например между энергией частицы и временем её измерения. Кинетическая энергия частицы, движущейся по оси  $Y$  со скоростью  $v_y$ , равна:

$$E_y = \frac{mv_y^2}{2}.$$

Соответственно неопределённость энергии:

$$\Delta E_y = \frac{\Delta E_y}{\Delta v_y} \Delta v_y \approx \frac{dE_y}{dv_y} \Delta v_y = mv_y \Delta v_y,$$

а неопределённость импульса ( $p_y = mv_y$ ):

$$\Delta p_y = m \Delta v_y.$$

Неопределённость координаты ( $y = v_y t$ ):

$$\Delta y = v_y \Delta t.$$

Подставляя  $\Delta p$  и  $\Delta y$  в соотношение неопределённостей (221), получаем:

$$mv_y \Delta v_y \Delta t \geq h.$$

Тогда соотношение неопределённостей для энергии частицы и времени её измерения имеет вид:

$$\Delta E_y \Delta t \geq h.$$

(222)

Физический смысл соотношения неопределённостей (222) можно сформулировать так: чем меньше время  $\Delta t$  частица пребывает в некотором состоянии, тем менее определённа её энергия:

$$\Delta E_y \geq \frac{h}{\Delta t}.$$

Наоборот, в стационарном состоянии, где время  $\Delta t$  пребывания частицы стремится к бесконечности, её энергия вполне определённа, так как  $\Delta E_y \rightarrow 0$ .

Принципиальный вывод, следующий из соотношений неопределённостей Гейзенберга, состоит в том, что *нельзя независимо рассматривать корпускулярные и волновые характеристики микрочастиц: они взаимосвязаны. Одновременно 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 и энергии частицы. 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.

## ВОПРОСЫ

1. В чём состоит гипотеза де Бройля? Чему равна длина волны де Бройля?
2. Какие эксперименты подтверждают наличие волновых свойств у микрочастиц?
3. Получите и сформулируйте соотношение неопределённостей Гейзенберга для координаты и импульса.
4. Получите и сформулируйте соотношение неопределённостей Гейзенберга для времени и энергии.
5. Какой принципиальный вывод следует из соотношений неопределённостей Гейзенберга?

## § 76. Строение атома

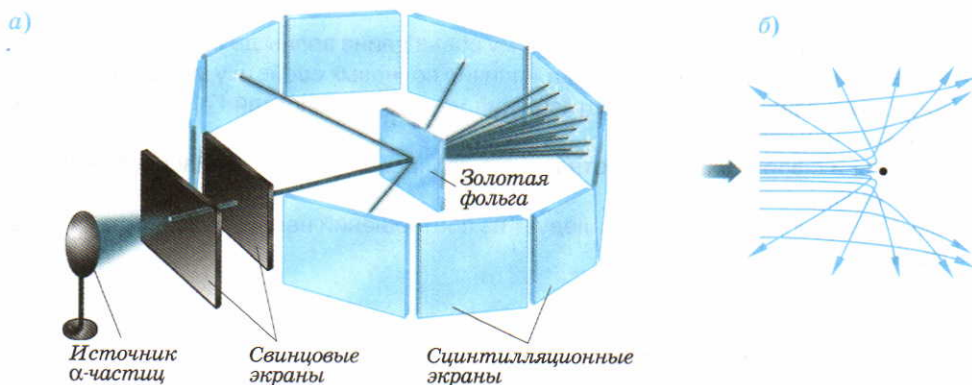
**Опыт Резерфорда.** Наименьшей частью химического элемента, определяющей его основные свойства, является атом. Человеческий глаз не в состоянии его увидеть, а тем более различить его внутреннюю структуру. Судить о том, как масса и заряд распределены внутри отдельного атома, мож-



но, 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. 243, 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. 243, 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 заряженными частицами, обладающими массой, соизмеримой с массой  $\alpha$ -частицы. Малая доля частиц в общем потоке, испытывающих значительное рассеяние, означает, что по-



## ▲ 243

Опыт Резерфорда:

а) принципиальная схема установки; б) рассеяние  $\alpha$ -частиц атомными ядрами

положительный заряд атома сосредоточен в объёме, очень малом по сравнению с объёмом 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 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:

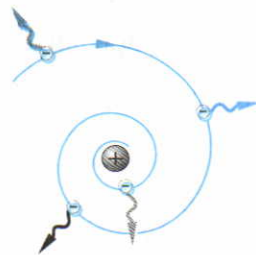
$$R < \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{5 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,3 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$

*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. (154)). Теряя энергию на излучение, электроны должны упасть на ядро (рис. 244) (подобно тому, как искусственный 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.



### ▲ 244

*Падение электрона на ядро*



## 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?

## § 77. 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:

$$m_e \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}. \quad (223)$$

### *Первый постулат Бора*

**В устойчивом атоме электрон может двигаться лишь по особым, стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии.**

### *Правило квантования орбит Бора*

**На длине окружности каждой стационарной орбиты укладывается целое число  $n$  длин волн де Бройля  $\lambda_B = \frac{h}{m_e v}$ , соответствующих движению электрона (рис. 245):**

$$\frac{2\pi r}{\lambda_B} = n, \quad (224)$$

где  $n$  — *главное квантовое число*;  $n = 1, 2, 3, \dots$

Аналогично определялось число мод собственных колебаний в струне, закреплённой на концах. На длине струны укладывалось целое число полуволн (см. Ф-10, (183)). Целое число волн, укладывающихся на стационарной орбите, необходимо из соображений симметрии для плавного замыкания гармонической кривой.

Условие (224) учитывает волновые свойства электрона, хотя было предложено Бором до появления гипотезы де Бройля в виде правила квантования орбит.

**На стационарной орбите момент импульса электрона квантуется (кратен постоянной Планка  $\hbar$ ):**

$$m_e v r = n \hbar, \quad (225)$$

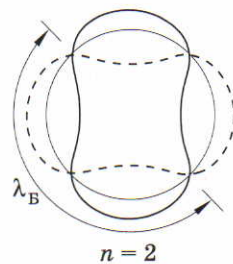
где  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка (аш перечеркнутое);  $n = 1, 2, 3, \dots$

В классической механике величина  $L = mvr$  называется моментом импульса. Момент импульса — векторная физическая величина. При вращении по орбите радиуса  $r$  частицы массой  $m$ , движущейся со скоростью  $v$ , вектор  $L$  момента импульса направлен перпендикулярно плоскости орбиты по правилу буравчика. Если вращать рукоятку буравчика по направлению движения частицы по орбите, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением орбитального момента импульса. Равенство (224) 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 равен  $\hbar/2$ . 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).

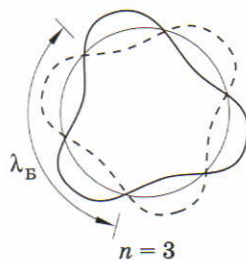
Из системы двух уравнений (222), (224) можно найти две неизвестные величины  $r$  и  $v$ . Возможные значения радиусов стационарных орбит даются выражением:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} n^2, \quad (226)$$

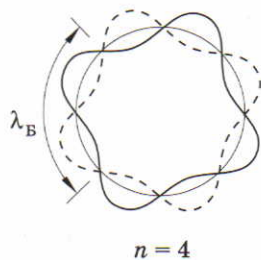
где  $n = 1, 2, 3, \dots$



а)



б)



в)

### ▲ 245

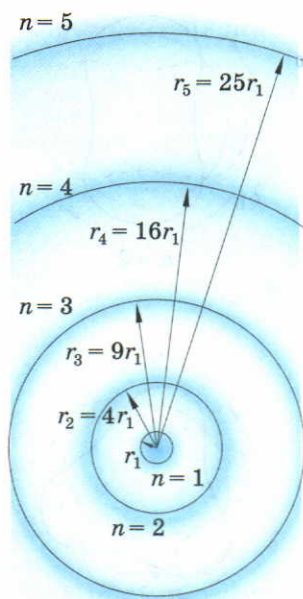
Целое число длин волн де Бройля на стационарных орбитах:

а)  $n = 2$ ;

б)  $n = 3$ ;

в)  $n = 4$





Первые пять боровских орбит изображены на рисунке 246.

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:

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{km_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Скорость движения электрона по  $n$ -й орбите можно найти, подставив выражение (226) в формулу (225):

$$v_n = k \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (227)$$

Скорость электрона максимальна на первой боровской орбите:

$$v_1 = k \frac{e^2}{\hbar} \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

## ▲ 246

*Орбиты электрона в атоме водорода*

**Энергетический спектр атома водорода.** Энергия электрона в атоме складывается из его кинетической энергии и потенциальной кулоновской энергии взаимодействия с ядром (см. Ф-10, (203)):

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{ke^2}{r}.$$

Нуль потенциальной энергии электрона выбран на бесконечном расстоянии от ядра. Знак «минус» соответствует энергии притяжения отрицательного и положительного зарядов. Подставляя в последнее выражение значения радиуса стационарных орбит (226) и скорости движения по ним электрона (227), получаем возможную величину энергии электрона в атоме:

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (228)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Энергия электрона в атоме принимает не любые, а дискретные значения, т. е. квантуется.

**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.

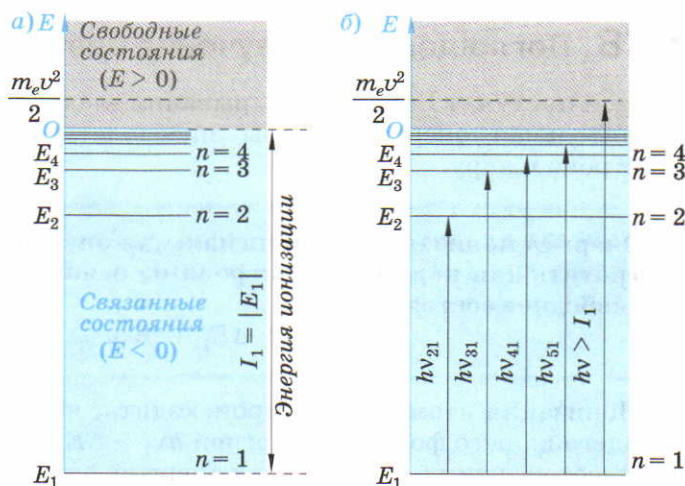
Энергия основного состояния электрона в атоме водорода:

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ.}$$

В основном состоянии электрон находится ближе всего к ядру и его энергия связи с ядром максимальна по модулю.

*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. 247, а). При  $n \rightarrow \infty$



## 247

Энергетический спектр атома водорода:

а) свободные и связанные состояния;  
б) переходы электрона при поглощении света



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 247, а 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.*

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 (230), *энергетический спектр связанных состояний дискретен.*

## ВОПРОСЫ

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.

## § 78. 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:

$$\Delta E_{i1} = |E_1|.$$

Ионизация атома может происходить, например, под действием падающего на него фотона с энергией  $h\nu_1 \geq \Delta E_{i1}$ . При этом электрон поглощает фотон, покидая атом. Если энергия фотона недостаточна для иони-

зации атома ( $h\nu < \Delta E_{i1}$ ), 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 247, б. 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 излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:*

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n. \quad (229)$$

Подставляя значения энергии атома в начальном и конечном состояниях, получаем:

$$\nu_{mn} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (230)$$

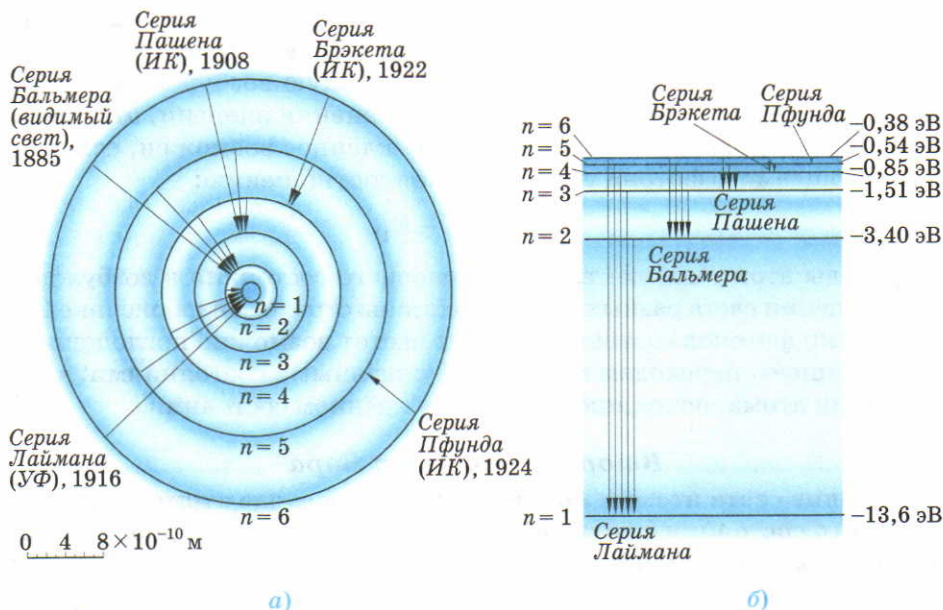
где  $n = 1, 2, 3, \dots; m > n$ .

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 *серию Бальмера*, наблюдаемую в видимом свете. На рисунке 248 показаны серии излучения атома водорода в разных диапазонах, а также





## ▲ 248

Серии излучения атома водорода:

- а) переходы между орбитами стационарных состояний;  
 б) переходы между энергетическими уровнями

указаны фамилии учёных, наблюдавших эти серии впервые, и даты их открытия.

На рисунке XI, а на цветной вклейке (с. 353) 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 XI, б на цветной вклейке (с. 353).

**Виды излучений.** Для того чтобы излучить фотон, атом должен обладать избыточной энергией по сравнению с энергией основного состояния, т. е. атомный электрон должен находиться в возбуждённом состоянии. Так как любая система стремится занять состояние с минимальной энергией, то в термодинамическом равновесии большинство атомов находится в основном состоянии. Переход атома в возбуждённое состояние возможен при сообщении ему энергии извне.

- *Тепловое излучение* возникает при тепловых столкновениях атомов.
- Кроме теплового излучения возможен ещё один вид излучения — *люминесценция* (от дат. *luminis* — свет).

Люминесцентные явления различаются механизмом возбуждения атомов. *Катодолюминесценция* возникает при бомбардировке атомов электронами, *фотолюминесценция* — при облучении вещества видимым светом, рентгеновским или гамма-излучением, *хемилюминесценция* — при химических реакциях. *Флуоресценция* — кратковременная люминесценция (заканчивающаяся через  $10^{-8}$  с после возбуждения атомов). *Фосфоресценция* — длительная люминесценция.

На явлении люминесценции основана работа люминесцентных ламп, в несколько раз более экономичных, чем лампы накаливания. Внутренняя поверхность люминесцентных ламп покрыта *люминофором* — веществом, в котором происходит люминесценция (в лампах — фотолюминесценция, в электронных трубках — катодолюминесценция). Опыты по исследованию фотолюминесценции впервые в России были проведены в 50-х гг. XX в. *С. И. Вавиловым*.

**Спектральный анализ.** Атомы каждого химического элемента излучают определённые длины волн и имеют *линейчатый спектр*, характерный именно для этого элемента (см. рис. XI, *a* на цветной вклейке, с. 353).

**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 обнаруживать 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 погло-



щаются в верхних слоях атмосферы (рис. XII на цветной вклейке, с. 353). 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 определять помимо химического состава объектов их температуру, давление, скорость движения, напряжённость электрического поля и индукцию магнитного поля.

### ВОПРОСЫ

1. Какие переходы электрона в атоме возможны при поглощении света? Какую энергию называют энергией ионизации?
2. Сформулируйте второй постулат Бора.
3. Запишите выражения для спектра электромагнитных волн, излучаемых и поглощаемых атомом водорода.
4. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные виды излучений.
5. На каких физических принципах основан спектральный анализ? Приведите примеры избирательного поглощения электромагнитного излучения атмосферой Земли.

### ЗАДАЧИ

1. Найдите красную границу  $\lambda_{\text{max}}$  для ионизации излучением атома водорода в основном состоянии. [91,4 нм]
2. Какая длина волны в серии Бальмера соответствует переходу с уровня  $k = 4$  на уровень  $n = 2$ ? Определите цвет излучения линии. [487 нм; зелёный]
3. Излучение какой длины волны поглощает электрон при переходе из основного состояния атома водорода в первое возбуждение? [121 нм]
4. Какая минимальная длина волны наблюдается при излучении серии Бальмера? [365 нм]
5. Ион  $\text{Li}^{2+}$  имеет заряд ядра  $Z = 3e$ . Найдите энергию, необходимую для ионизации оставшегося около ядра электрона, находящегося в основном состоянии. Какая максимальная длина волны излучения требуется для такой ионизации? [122 эВ; 10 нм]

## § 79. Лазер

**Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения.** В традиционных источниках света, таких как лампа накаливания или натриевая лампа, атомы получают энергию от электронов, создающих электрический ток.

Перейдя в возбуждённое состояние, электрон атома без какого-либо внешнего воздействия (спонтанно) возвращается в основное состояние, излучая фотон. Атомы возбуждаются электронами и излучают фотоны независимо друг от друга, поэтому излучаемые ими фотоны некогерентны друг с другом. Рассмотрим теперь возможные процессы взаимодействия атома с фотоном. Пусть энергия фотона

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (231)$$

где  $E_1, E_2$  — энергии основного и возбуждённого состояний атома.

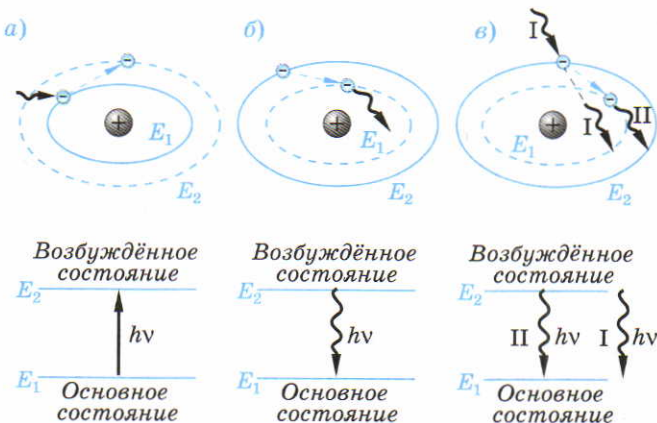
1. *Поглощение света.* Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией  $E_1$ , может поглотить фотон, перейдя в возбуждённое состояние с энергией  $E_2 > E_1$  (рис. 249, а). Интенсивность поглощённого излучения пропорциональна концентрации  $n_1$  атомов, находящихся в основном состоянии.

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. 249, 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. *Индукированное излучение.* В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбуждённый атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 249, в).



◀ 249

Процессы взаимодействия атома с фотоном:  
 а) поглощение фотона;  
 б) спонтанное излучение;  
 в) вынужденное излучение



**Индукцированное (вынужденное) излучение** — излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.

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. 255, 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 излучения, усиливаемого в результате 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

$$n_2 > n_1. \quad (232)$$

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).**

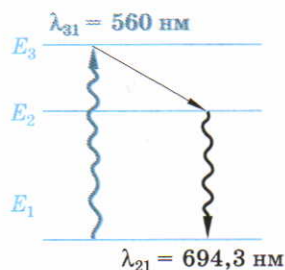
Рассмотрим принцип действия рубинового лазера. Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома  $\text{Cr}^{3+}$ .

С помощью мощного импульса лампы-вспышки («оптической накачки») ионы хрома переводятся из основного состояния  $E_1$  в возбуждённое  $E_3$  (рис. 250). 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. 251, а). Индуцированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического кристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается (рис. 251, б).

Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — частично прозрачным (рис. 251, 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:*

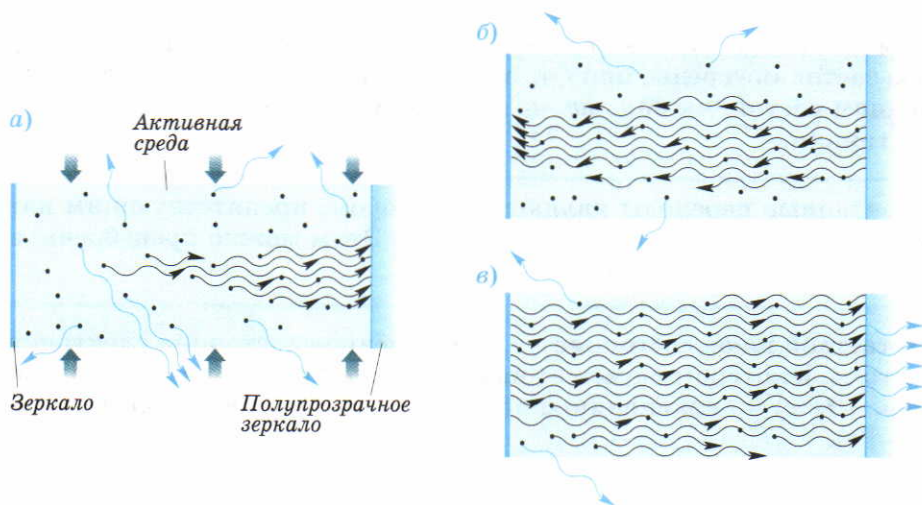
- лазерное излучение обладает исключительной монохроматичностью и когерентностью;



## ▲ 250

*Оптические процессы в рубиновом лазере*





## ▲ 251

*Оптическое усиление:*

*а) оптическая «накачка»; б) оптическое усиление;*

*в) генерация лазерного излучения*

- 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, превышает напряжённость поля внутри атома.

**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 штрих-кодов 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 задавался 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.

### ВОПРОСЫ

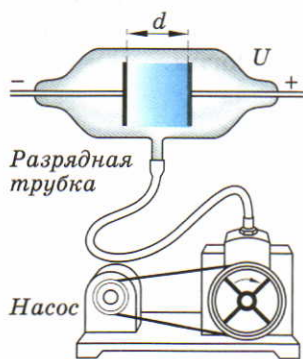
1. Какие возможны процессы взаимодействия атома с фотоном?
2. Какой источник излучения называют лазером?
3. Какую населённость энергетических уровней атома (молекулы) называют инверсной? Какое состояние электрона в атоме называют метастабильным?
4. Опишите принцип действия рубинового лазера. Охарактеризуйте основные особенности лазерного излучения.
5. Как используются лазеры в различных областях науки, техники и медицины?

## § 80. Электрический разряд в газах

**Несамостоятельный и самостоятельный разряды.** Энергетический спектр отдельного атома газа в значительной степени определяет электрические свойства газа в целом. При комнатных температурах газы (включая воздух) состоят из нейтральных атомов (молекул). Число свободных зарядов в газе при таких условиях ничтожно. Так в  $1 \text{ см}^3$  воздуха на уровне моря в 1 с рождается около 10 пар первичных ионов и электронов. Практическое отсутствие свободных электронов приводит к тому, что газ, будучи диэлектриком, не проводит электрический ток. Это позволяет, в частности, строить воздушные линии электропередачи. Появление в газе значительного числа свободных электрических зарядов требует дополнительного внешнего воздействия, при котором возможен распад атомов (молекул) на электроны и положительные ионы, — ионизация газа. Начальная (первичная) ионизация газа может быть вызвана внешним *ионизатором*, например нагреванием газа, воздействием на него ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного, космического излучений. При этом ионизованный газ (плазма) становится проводником электрического тока. Если газ поместить в электрическое поле, свободные электроны и ионы начинают двигаться направленно. В газе возникнет электрический ток (*разряд*). При прекращении действия внешнего ионизатора свободные заряды перестают образовываться, что приводит к прекращению тока и *несамостоятельного разряда*.

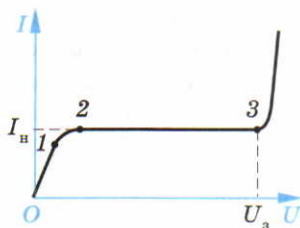


**Несамостоятельный разряд** — электрический разряд в газе, возникающий лишь при наличии внешнего ионизатора.



### ▲ 252

Электрический разряд в газе



### ▲ 253

Вольт-амперная характеристика разряда в газе

электрического поля  $E = \frac{U}{d}$  кинетическая энергия первичного электрона  $e_1^-$  может превысить энергию ионизации  $\Delta E_{i1}$  атома (молекулы) газа и вызвать его ионизацию:



( $e_2^-$  — вторичный электрон, ставший свободным в результате ионизации атома). Реакция (233) начинается при условии

Чем больше напряжение  $U$ , приложенное к газу (рис. 252), тем больше заряженных частиц достигнет электродов. Поэтому при несамостоятельном разряде (при малых напряжениях) выполняется закон Ома (рис. 253, участок 0—1). При последующем увеличении напряжения электродов достигают все имеющиеся заряды (рис. 253 — участок 2—3), так что сила тока  $I$  перестаёт расти. Через газ протекает ток насыщения  $I_n$ .

При дальнейшем увеличении напряжения, начиная с определённого его значения  $U_3$  (зависящего от рода газа и давления в сосуде, расстояния между электродами, материала катода), сила тока  $I$  резко возрастает и появляется свечение газа. Происходит *электрический пробой* газа, когда без внешнего ионизатора зажигается *самостоятельный разряд*. **Электрический пробой** — процесс превращения непроводящего вещества в проводник в результате приложения к нему достаточно сильного электрического поля.

**Самостоятельный разряд** — явление прохождения через газ электрического тока, не зависящего от внешних ионизаторов.

**Электрический пробой газа при высоком давлении.** Разность потенциалов между электродами ускоряет первичные («затравочные») электроны. При определённой напряжённости

$$eEL_i = \Delta E_{i1}, \quad (234)$$

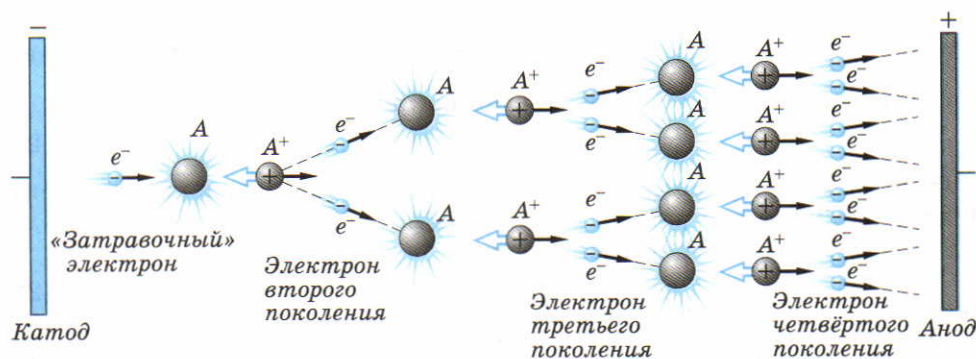
где  $L_i$  — длина свободного пробега электрона при ионизации — расстояние между двумя последовательными соударениями электрона с атомом. На длине пробега электрон приобретает энергию, достаточную для ионизации. Чем больше давление  $p$  газа, тем чаще сталкивается электрон с атомами, тем меньше длина свободного пробега, т. е.  $L_i \sim \frac{1}{p}$ .

В результате реакции (233) ионизации атома электронным ударом появляются положительный ион и два медленных электрона: первичный, потерявший свою энергию, и вторичный, покинувший атом. Они снова ускоряются электрическим полем и также производят ионизацию. Возникает четыре свободных электрона и т. д. (рис. 254), а затем *электронная лавина*: число свободных электронов нарастает лавинообразно. Все электроны, достигшие анода, выбывают из игры. Для повторения процесса необходимы новые первичные электроны.

Явление пробоя имеет резко выраженный *пороговый* характер. Это значит, что пробой происходит только при напряжениях, превышающих определённое (для каждого конкретного условия) значение, называемое *напряжением зажигания*  $U_3$ .

Согласно формуле (234) напряжение зажигания разряда прямо пропорционально давлению газа и линейному размеру сосуда:

$$U_3 \sim pd. \quad (235)$$



## ▲ 254

*Лавинная ионизация газа.*

*Под действием электрического поля электроны движутся к аноду, а положительные ионы — к катоду*



Формула (237) хорошо описывает эксперимент (рис. 255) при высоких давлениях газа ( $pd \gg 10 \text{ Па} \cdot \text{м}$ ). При таких давлениях концентрация атомов столь велика, что электрон, получивший достаточную для ионизации энергию, сразу ионизует атом.

**Электрический пробой разреженного газа.** При малых давлениях газа, когда концентрация атомов мала, вторичный электрон может достигнуть стенки сосуда или анода, не встретив атом и не ионизуя его. При этом электронная лавина не развивается и пробой не возникает. Развитие электронной лавины при малых давлениях ( $pd \ll 10 \text{ Па} \cdot \text{м}$ ) оказывается возможным, если вторичные электроны будут образовываться быстрее, чем, достигнув стенки (или анода), рекомбинировать с положительными ионами. Другими словами, время ионизации  $\tau_i$  атома (молекулы) электроном, движущимся со средней скоростью  $v$  ( $\tau_i = L_i/v$ ), должно быть меньше либо равно времени рекомбинации  $\tau_p$ :

$$\tau_i \leq \tau_p. \quad (236)$$

С помощью формулы (234) можно получить, что

$$\tau_i = \frac{\Delta E_{i1} d}{e U_3}. \quad (237)$$

При оценке времени движения электронов до стенки (или анода) следует учесть, что в отсутствие столкновений с атомами электрон попадет на стенку за время  $d/v$ . Перемещаясь на расстояние  $d$ , электрон претерпевает  $d/L_c$  столкновений ( $L_c$  — длина свободного пробега электрона при упругих столкновениях с атомами,  $L_c \sim \frac{1}{p}$ ). Поэтому столкновения с атомами газа увеличивают время рекомбинации

$$\tau_p = (d/v) \cdot (d/L_c). \quad (238)$$

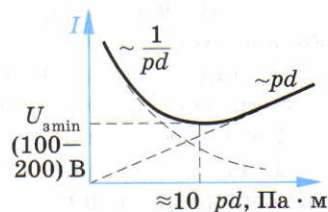
Подстановка значений  $\tau_i$  и  $\tau_p$  в соотношение (238) позволяет получить обратно пропорциональную зависимость напряжения зажигания от давления газа и линейного размера сосуда

$$U_3 \sim 1/pd. \quad (239)$$

Гиперболическая зависимость порогового напряжения зажигания от произведения ( $pd$ ) показана на рисунке 255. Анализ зависимости  $U_3$  ( $pd$ ) показывает, что для электрического пробоя как плотного, так и разреженного газа требуется высокое напряжение зажигания (порядка 1000 В). В плотном газе сильное электрическое поле требуется для того, чтобы на малой длине свободного пробега электрон успел набрать энергию, достаточную для ионизации атома и возникновения электронной лавины. В разре-

женном газе из-за редких столкновений с атомами электроны, возникающие при ионизации, почти беспрепятственно диффундируют на анод и стенки сосуда и там рекомбинируют с положительными ионами. Поэтому для ионизации газа, достаточной для пробоя, они должны образовываться в объеме быстрее, чем уходить на анод. Для этого необходимо сильное электрическое поле, стимулирующее ионизацию. Наименьшее значение напряжения зажигания (порядка 100 В) требуется при промежуточных давлениях  $pd \approx 10$  Па·м. С целью экономии электроэнергии именно такие давления газа используются в люминесцентных лампах.

**Виды газового разряда.** Время нарастания электронной лавины очень мало, порядка  $10^{-7}$ — $10^{-3}$  с. При этом электрический ток возрастает на несколько порядков. Однако длительный самостоятельный разряд нельзя обеспечить лишь первичными «затравочными» электронами. Для поддержания разряда и электрического тока необходима *эмиссия* (испускание) электронов с катода. По способу эмиссии электронов с катода разряд разделяют на *тлеющий* и *дуговой*.



### ▲ 255

*Зависимость напряжения зажигания разряда от давления газа и линейного размера сосуда*

**Тлеющий разряд** — самостоятельный разряд, в котором эмиссия электронов с холодного катода происходит под действием ударов положительных ионов и излучения, возникающего при развитии разряда.

Для тлеющего разряда характерна небольшая сила тока  $10^{-6}$ — $10^{-1}$  А и малое давление порядка  $10^{-3}$  р<sub>а</sub>. При напряжении порядка пробойного в разрядной трубке светится столб газа: цвет свечения зависит от рода газа. Неон, например, светится красным цветом (рис. XIII, а на цветной вклейке, с. 384).

**Дуговой разряд** — самостоятельный разряд, в котором эмиссия электронов происходит с поверхности горячего катода.

Для дугового разряда (дуги) характерна значительная сила тока (больше 1 А) и высокое давление газа порядка атмосферного (рис. XIII, б на цветной вклейке, с. 384). Ослепительно светящийся канал между сварочным электродом и обрабатываемым металлом является дуговым раз-



рядом (дугой) в воздухе. Процесс испускания электронов при нагревании катода до высокой температуры называется *термоэлектронной эмиссией*. В ряде твёрдых веществ термоэлектронная эмиссия происходит при температурах, при которых испарение самого вещества катода ещё мало. Такие вещества и используют для изготовления катодов.

В сильно неоднородных электрических полях (около заострённых электродов, громоотводов или линий электропередачи) возникает светящаяся область, по форме напоминающая корону, — *коронный разряд* (рис. XIII, в на цветной вклейке, с. 384).

При более высоких напряжениях, давлениях порядка атмосферного и больших расстояниях между электродами может возникнуть *искровой разряд*. Грандиозной формой искрового разряда является молния (рис. XIII, г на цветной вклейке, с. 384), для которой электродами служат электрически заряженное облако и Земля.

**Газовый разряд в современной технике.** Наряду с традиционным использованием газового разряда в источниках света, лазерах, в световых индикаторах электромагнитного поля, при нагреве, резке и сварке металлов важно отметить его применение в плазменных экранах телевизоров, когда достаточно крупные изображения оказывается невозможно получить с помощью электронно-лучевой трубки.

Рассмотрим сначала принцип получения цветного изображения на *плазменном экране*. Любое цветное изображение на экране складывается из отдельных светящихся точек (пикселей). Многочисленные опыты показали, что любой цвет может быть представлен в виде комбинации трёх основных цветов: красного «к», зелёного «з» и синего «с» при определённой пропорции их интенсивностей. Подобный эффект связан со структурой сетчатки глаза, содержащей три типа нервных окончаний — «колбочек», наиболее чувствительных к красному, зелёному и синему свету соответственно. Если, например, в мозг идут сигналы только от колбочек, чувствительных к зелёному свету, цвет излучения будет казаться наблюдателю зелёным. Другой тип светочувствительных окончаний — «палочки» — реагирует на уровень интенсивности света. Свет воспринимается наблюдателем как белый (бесцветный), если содержит три основных цвета в определённой пропорции их интенсивностей (условно):  $k + z + c = \emptyset$ .

Поэтому для получения цветного изображения каждый пиксель состоит из трёх ячеек, испускающих излучение красного, зелёного и синего цвета соответственно (рис. XIV, а на цветной вклейке, с. 384). Каждая ячейка размером около 100 мкм заполнена смесью инертных газов неона и ксенона при давлении порядка атмосферного. К каждой ячейке подведены электроды, расположенные вдоль взаимно перпендикулярных осей, вблизи наружной и внутренней поверхностей экрана. Электроды покры-

ваются слоем диэлектрика. Когда к электродам подводится напряжение порядка 100—200 В, внутри ячейки возникает импульсный разряд длительностью около 20 нс (рис. XIV, б на цветной вклейке, с. 384). Напряжение зажигания удаётся уменьшить покрытием диэлектрика слоем оксида магния MgO, облегчающего вторичную эмиссию электронов при бомбардировке катода ионами  $Ne^+$ . Возникающий разряд сопровождается ультрафиолетовым излучением, интенсивность которого зависит от значения напряжения, приложенного к ячейке. Стенки ячеек пикселя покрыты люминофорами, которые преобразуют ультрафиолетовое излучение в излучение красного, зелёного или синего цвета соответственно. Подобная конструкция позволяет воспроизвести изображение пикселя произвольной интенсивности и любого цвета. Полная картина на экране получается как суперпозиция изображений отдельных точек.

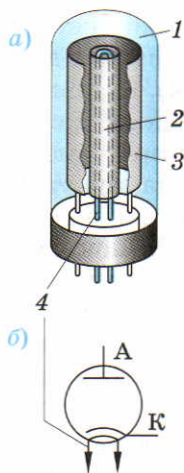
**Электрический ток в вакууме.** Электрический ток в разреженных газах (в которых длина свободного пробега молекул больше размеров сосуда) может протекать, если ввести в сосуд свободные заряды. Наиболее просто это можно осуществить с помощью термоэлектронной эмиссии с поверхности катода. В двухэлектродной электронной лампе — вакуумном диоде — внутри вакуумированного стеклянного баллона 1 находятся два электрода: катод 2 и анод 3. Катод представляет собой никелевую трубочку, покрытую слоем оксидов щелочноземельных металлов (BaO, SrO, CaO), облегчающих термоэлектронную эмиссию (рис. 256, а). Подогрев катода обеспечивается спиралью 4, расположенной внутри катода. Цилиндрический анод окружает катод. Условное обозначение диода с подогреваемым катодом дано на рисунке 256, б.

Электроны, покинувшие катод в результате термоэлектронной эмиссии, под действием электрического поля между катодом и анодом достигают анода. Обратное направление тока невозможно. *Вакуумный диод* (подобно полупроводниковому) *обладает односторонней проводимостью* и также может быть использован для выпрямления переменного тока.

Для регулирования величины анодного тока используют трёхэлектродную электронную лампу — *триод*. Для этого в триоде между катодом и анодом помещается третий электрод 5 (в виде спирали) — сетка (рис. 257, а). Условное обозначение триода дано на рисунке 257, б. Положительная разность потенциалов между сеткой и катодом оттягивает в сторону анода электроны, вылетевшие из катода в результате термоэлектронной эмиссии (рис. 258, а), тем самым увеличивая анодный ток. Отрицательная разность потенциалов между сеткой и катодом препятствует движению электронов от катода и уменьшает анодный ток (рис. 258, б).

Триод используется в электронных схемах подобно транзистору. Роль эмиттера играет катод, коллектора — анод, базы — сетка.



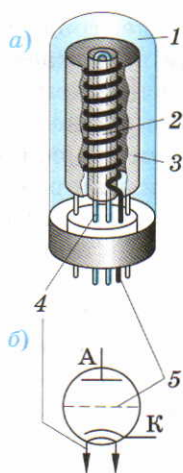


## ▲ 256

Вакуумный диод:

а) конструкция;

б) условное обозначение

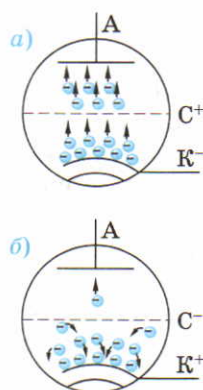


## ▲ 257

Триод:

а) конструкция;

б) условное обозначение



## ▲ 258

Сетка как регулятор

анодного тока в триоде:

а)  $\varphi_C - \varphi_K > 0$ ;

б)  $\varphi_C - \varphi_K < 0$

Электрический ток в вакууме, созданный электронными пучками, широко используется в электронно-лучевых трубках, электронных микроскопах, а также при нагреве, резке и сварке металлов, стерилизации медицинских инструментов.

### ВОПРОСЫ

1. В чём отличие несамостоятельного и самостоятельного разрядов?
2. Сформулируйте условия пробоя газа высокого давления и разреженного газа.
3. В чём отличие тлеющего и дугового разрядов?
4. Поясните принцип действия плазменного экрана.
5. Опишите конструкцию вакуумного диода и триода.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Тепловое излучение** — электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт своей внутренней энергии.
- **Абсолютно чёрное тело** — тело, поглощающее всю энергию падающего на него излучения любой частоты при произвольной температуре.

■ **Спектральная плотность энергетической светимости** — энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот. Единица спектральной плотности энергетической светимости — Дж/м<sup>2</sup>.

Энергия кванта излучения прямо пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$E = h\nu,$$

где  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка.

Фотон — микрочастица, квант электромагнитного излучения.

■ **Законы теплового излучения:**

Закон смещения Вина

$$\lambda_m T = b,$$

где  $\lambda_m$  — длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела,  $T$  — температура чёрного тела,  $b \approx 3000$  мкм · К — постоянная Вина.

■ **Закон Стефана—Больцмана:** интегральная светимость абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры:

$$R_T = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана—Больцмана.

■ **Фотоэффект** — явление вырывания электронов из твёрдых и жидких веществ 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.

■ **Соотношения неопределённостей Гейзенберга.**

1. Произведение неопределённости координаты частицы на неопределённость её импульса не меньше постоянной Планка:

$$\Delta y \Delta p_y \geq h.$$

2. Произведение неопределённости энергии частицы на неопределённость времени её измерения не меньше постоянной Планка:

$$\Delta E_y \Delta t \geq h.$$

■ **Постулаты Бора.**

1. В устойчивом атоме 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 излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

Правило квантования орбит Бора: На длине окружности каждой стационарной орбиты укладывается целое число  $n$  длин волн де Бройля, соответствующих движению электрона:

$$\frac{2\pi r}{\lambda_B} = n.$$

■ **Основное состояние атома** — состояние с минимальной энергией.

■ **Люминесценция** — неравновесное излучение вещества.

■ **Спектральный анализ** — метод определения химического состава и других характеристик вещества по его спектру.

Основные излучательные процессы атомов: поглощение света, спонтанное и вынужденное излучение.

■ **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 излучения, усиливаемого в результате индуцированного 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.

### § 81. Состав атомного ядра

**Протон и нейтрон.** Опыты Резерфорда, проведённые в 1910 г. (см. § 77), 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, 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,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  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. Если, например, заряд ядра атома  ${}^{12}_6\text{C}$  равен  $+6e$ , то это означало бы, что ядро состоит из шести протонов с общей массой 6 а. е. м. Однако опыт показывает, что масса атома  ${}^{12}_6\text{C}$  равна 12 а. е. м. Следовательно, кроме протонов в состав ядра входят и другие частицы общей массой 6 а. е. м.

В 1932 г. английский физик **Джеймс Чедвик** установил, что при облучении ядер атома бериллия  $\alpha$ -частицами 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 покоя 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 неустойчи-



ности. Нейтрон достаточно быстро самопроизвольно 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  ${}^1_1p$ , а нейтрона —  ${}^1_0n$ . Нижний индекс характеризует электрический заряд частицы, кратный заряду ( $+e$ ) протона (или зарядовое число  $Z$ ), верхний — число нуклонов, которое содержит частица (или массовое число  $A$ ).

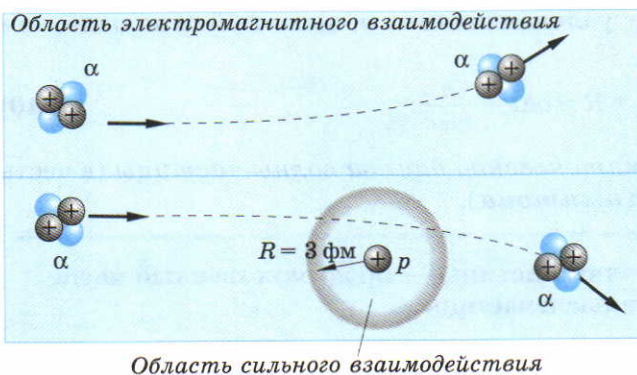
Подобно электрону, протон и нейтрон имеют спиновой момент импульса, равный  $\hbar/2$ , т. е. *протон и нейтрон обладают полуцелым спином (в единицах  $\hbar$ ).*

**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.

**Изотопы — атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое число протонов в ядре (зарядовое число  $Z$ ) и разное число  $N$  нейтронов.**

Например, водород имеет три изотопа:  ${}^1_1\text{H}$  — протий (в ядре только один протон),  ${}^2_1\text{H}$  — дейтерий (в ядре — протон и нейтрон),  ${}^3_1\text{H}$  — тритий (в ядре — протон и два нейтрона).

**Сильное взаимодействие нуклонов.** Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате сильного взаимодействия, существующего между этими частицами. Наличие такого взаимодействия было подтверждено 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 прото-



259

Электромагнитное и сильное взаимодействие  $\alpha$ -частицы с протоном

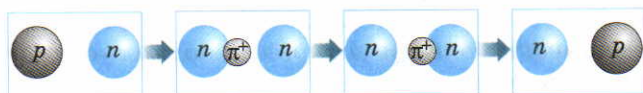
на, находясь от него на расстоянии, превышающем 3 фм ( $1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$ ). На меньших расстояниях пролёта от протона наблюдалось притяжение  $\alpha$ -частиц к протону (рис. 259), обусловленное сильным взаимодействием нуклонов друг с другом. Нейтрон начинает притягиваться к протону, 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. 260).

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 является лишь наглядной иллюстрацией. Взаимодействие посредством обмена виртуальными частицами не имеет столь простого объяснения. Дело в том, что свободный протон (или нейтрон) не может согласно законам сохранения импульса и энергии испустить частицу без поступления энергии извне. Для такого испускания необходима энергия, не меньшая  $\Delta E = m_0 c^2$  ( $m_0$  — масса частицы). Однако соотношение неопределённостей Гейзенберга  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$  допускает нарушение закона сохранения энергии в течение малого промежутка времени  $\Delta t = \hbar / (m_0 c^2)$ , необходимого для испускания частицы, называемой вир-

260

Обменное взаимодействие протона и нейтрона





туальной. За это время виртуальная частица не может уйти дальше, чем на расстояние

$$R = c\Delta t = \frac{\hbar}{m_0 c}. \quad (240)$$

Эту длину называют *комптоновской длиной волны частицы* (в честь американского физика **А. Комптона**).

**Комптоновская длина волны частицы — пространственный масштаб существования виртуальной частицы.**

Комптоновская длина волны определяет радиус действия того или иного вида взаимодействия.

Электромагнитные взаимодействия заряженных частиц осуществляются обменом фотонами. Для фотона  $m_0 = 0$ , поэтому радиус действия электромагнитных сил  $R \rightarrow \infty$ , т. е. эти силы являются дальнедействующими.

Зная радиус действия ядерных сил  $R_{\text{я}} \approx 10^{-15}$  м, можно оценить массу виртуальной частицы — переносчика сильного взаимодействия:

$$m_0 = \frac{\hbar}{R_{\text{я}} c} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ кг.}$$

Полученная в результате приближённой оценки масса оказывается очень близка к массе элементарной частицы  $\pi^+$ -мезона, открытой в 1947 г.:  $m_{\pi^+} = 2,5 \cdot 10^{-28}$  кг.

Сильное взаимодействие не зависит от заряда частиц; оно связывает между собой заряженные нуклоны ( $p$ — $p$ -взаимодействие), нейтральные ( $n$ — $n$ -взаимодействие), а также заряженные и нейтральные частицы ( $n$ — $p$ -взаимодействие). *Зарядовая симметрия сильного взаимодействия* — независимость сил, взаимодействие между нуклонами от их электрических зарядов.

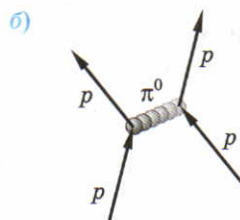
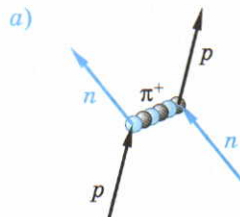
Взаимодействие протонов происходит в результате обмена виртуальными нейтральными  $\pi^0$ -мезонами (пионами). Процесс обмена нуклонов виртуальными частицами изображают на *диаграммах Фейнмана* (**Р. Фейнман** — американский физик), на которых реальной частице сопоставляется прямая линия, а виртуальной — волнистая (рис. 261).

Ядерные силы взаимодействия зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. При антипараллельных спинах энергия взаимодействия нуклонов оказывается меньше, чем при параллельных. *Парное расположение нуклонов с антипараллельными спинами в одном энергетическом состоянии ядра энергетически более выгодно, чем возникновение пары таких нуклонов с параллельными спинами.*

**Состав и размер ядра.** Рассмотрим состав ядра некоторых химических элементов, чтобы выяснить 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. 262). Подобное парное размещение нуклонов соответствует максимальному заполнению соответствующей энергетической оболочки. Энергия ядер, как и атомов, квантуется, т. е. ядра обладают дискретным спектром энергетических состояний. В случае нечётного числа протонов или нейтронов в ядре неспаренный нуклон может занять лишь следующий, более высокий энергетический уровень. Обладая большей энергией, ядра с нечётными числами  $Z$  и  $N$  (*нечётно-нечётные ядра*) оказываются менее стабильными. Существует всего четыре стабильных нечётно-нечётных ядра  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$  и  ${}^{14}_7\text{N}$ , для которых  $Z = N$ , а *нечётно-чётных* стабильных ядер не существует вообще.

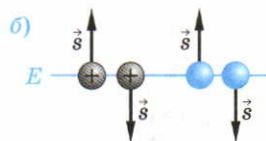
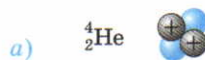
Нечётно-чётные ядра — ядра, состоящие из нечетного (четного) числа протонов и чётного (нечётного) числа нейтронов. Наиболее стабильными являются *чётно-чётные ядра*, состоящие из чётного числа протонов и чётного числа нейтронов. Известно около 160 стабильных чётно-чётных ядер. Особой устойчивостью среди чётно-чётных ядер отличаются «магические» ядра — ядра, у которых число  $Z$  протонов или  $N$  нейтронов равно одному из чисел 2, 8, 20, 28, 50, 82,



### ▲ 261

*Нуклон-нуклонное взаимодействие в результате обмена пионами:*

- а) *протон-нейтронное взаимодействие;*
- б) *протон-протонное взаимодействие*



### ▲ 262

*Ядро атома гелия:*

- а) *нуклоны в ядре;*
- б) *нуклоны в основном энергетическом состоянии*



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. Устойчивые магические ядра напоминают атомы инертных газов, характеризующиеся сферической симметрией и химической пассивностью, связанной с наибольшей энергией связи валентных электронов. Тем не менее число электронов на электронных оболочках атомов инертных газов меняется в последовательности, отличной от магических чисел: 2, 10, 18, 36, 54, 86.

Максимальной устойчивостью и поэтому наибольшей распространённостью в природе обладают *дважды магические ядра*, у которых магическим является как число протонов, так и число нейтронов. Таких ядер всего пять:  ${}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{16}_8\text{O}$ ;  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ;  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ . Особая прочность дважды магического ядра  ${}^4_2\text{He}$  проявляется, в частности, в том, что такие ядра ( $\alpha$ -частицы) испускаются при радиоактивном распаде ядер.

У магических, и особенно дважды магических ядер с массовым числом  $A$ , энергия связи нуклона аномально велика по сравнению с его энергией связи в ядрах с соседними массовыми числами ( $A - 1$ ) и ( $A + 1$ ).

Предполагая, что нуклоны плотно упакованы в ядре с массовым числом  $A$ , можно оценить радиус  $R$ . Условно вводя радиус нуклона  $r_0$ , можно утверждать, что объём ядра складывается из объёма отдельных нуклонов

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \left( \frac{4}{3} \pi r_0^3 \right) A.$$

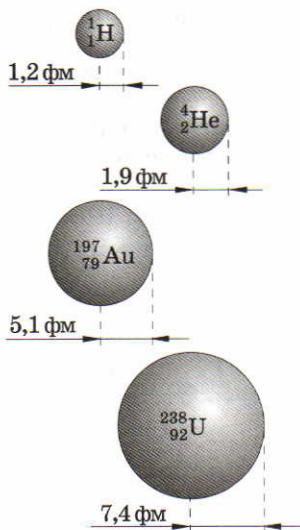
Следовательно, радиус ядра равен:

$$R = r_0 A^{1/3}. \quad (241)$$

Эксперименты показывают, что  $r_0 = 1,2$  фм. На рисунке 263 показаны относительные размеры ядер водорода, гелия, золота и урана.

Зная радиус ядра, можно оценить плотность ядерного вещества, зная, что  $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ кг}$ ,

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m_{\text{я}}}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{A \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi R^3 \cdot A} = \\ &= \frac{1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi (1,2 \cdot 10^{-15})^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$



### ▲ 263

Относительные размеры ядер

Для сравнения плотность воды  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Один кубический сантиметр ядерного вещества имел бы массу 230 млн т. Из ядерного вещества состоят нейтронные звёзды — гигантские ядра, удерживаемые гравитационным притяжением.

### ВОПРОСЫ

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 и дважды магическим?
5. Объясните зависимость радиуса ядра от массового числа.

### ЗАДАЧИ

1. Сколько протонов и нейтронов содержит изотоп  $^{15}_7\text{N}$ ?
2. Сколько нейтронов в ядре  $^{15}\text{O}$ ?
3. Идентифицируйте следующие изотопы:  $^{210}_{87}\text{X}$ ,  $^{202}_{82}\text{Y}$ ,  $^{105}_{47}\text{Z}$ .
4. Рассчитайте радиус ядра атома серебра  $^{108}_{47}\text{Ag}$ . [5,71 фм]
5. Во сколько раз ядро атома урана  $^{238}_{92}\text{U}$  больше ядра атома кислорода  $^{16}_8\text{O}$ ? [2,46]

## § 82. 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 ( $Z = 82$ ). Поэтому стабильных ядер размером, например, с горошину не существует. Нейтронная звезда, состоящая из ядерного вещества, удерживается гравитационным притяжением, существующим лишь для больших масс.

Энергию связи нуклонов в ядре можно оценить с помощью соотношения неопределённостей Гейзенберга для координаты и импульса. При локализации нуклона в ядре неопределённость его координаты оказывается порядка диаметра ядра  $\Delta x \approx 2R = 10^{-14}$  м. При этом возникает неопределённость импульса:



$$\Delta p_x \geq \frac{h}{\Delta x} \approx \frac{h}{2R_n}.$$

Соответственно минимальная энергия нуклона, локализованного в ядре, равна:

$$E_{\min} = \frac{(\Delta p_x)^2}{2m_p} \approx \frac{h^2}{2m_p(2R_n)^2} = \frac{(6,62 \cdot 10^{-34})^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27} \cdot (10^{-14})^2} = 13,7 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 8,6 \text{ МэВ}.$$

Это простая оценка, по порядку величины подтверждённая экспериментами, показывает, что 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. С помощью соотношения неопределённости можно показать, что в ядре не может находиться электрон. Электрон в 1836 раз легче протона, поэтому при его локализации в ядре энергия электрона во столько же раз превосходила бы энергию связи нуклонов в ядре  $E_{\min}$ . В таком случае электрон мгновенно покинул бы ядро.

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:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2.$$

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:

$$\Delta m = 6(m_p + m_n) - m_{\text{я}} = 0,09894 \text{ а. е. м.}$$

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:

$$(E_{\text{св}})_1 = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{92,16}{12} = 7,68 \text{ МэВ/нуклон.}$$

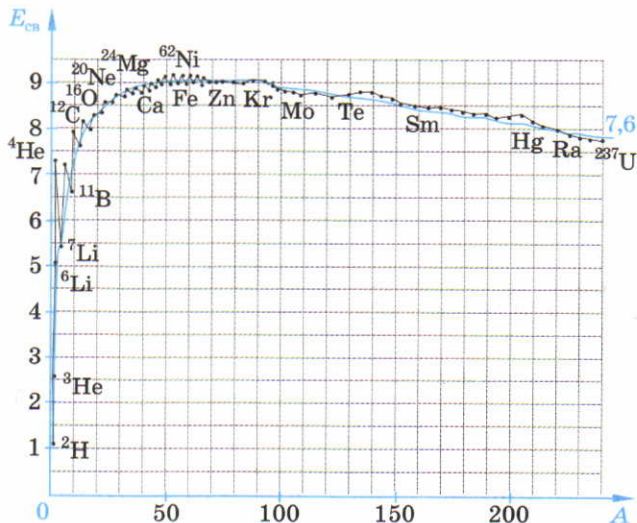
Зависимость удельной энергии нуклона в ядре от массового числа приведена на рисунке 264.

Для небольших ядер удельная энергия связи мала из-за малого числа нуклонов. Наибольшей энергией связи обладают стабильные ядра с массами, кратными целому числу  $\alpha$ -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 числа  $A$  нуклонов в ядре подтверждает, что нуклоны связаны короткодействующими силами. Лишний нуклон взаимодействует лишь с ближайшими соседями. При дальнедействующих 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.



264

Удельная энергия связи нуклона в ядре



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.

## ВОПРОСЫ

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? Объясните зависимость удельной энергии связи от массового числа.
4. Почему при синтезе лёгких ядер выделяется значительная энергия?
5. Почему при делении тяжёлых ядер выделяется энергия?

## ЗАДАЧИ

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. [15,7 МэВ]
2. Рассчитайте энергию связи нуклонов в ядре атома азота  ${}^{14}_7\text{N}$  ( $m_a = 14,003242$  а. е. м.). [104,8 МэВ]
3. Рассчитайте удельную энергию связи ядра атома лития  ${}^7_3\text{Li}$  ( $m_a = 7,017601$  а. е. м.). [5,4 МэВ/нуклон]
4. Найдите энергию, выделяющуюся при реакции синтеза  ${}^4_2\text{He}$ :  
 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$   
 $(m_{{}^2_1\text{H}} = 2,0141$  а. е. м.;  $m_{{}^3_1\text{H}} = 3,01605$  а. е. м.;  $m_{{}^4_2\text{He}} = 4,0026$  а. е. м.). [17,6 МэВ]
5. Рассчитайте энергию, выделяющуюся при реакции деления ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$ :  
 ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{140}_{58}\text{Ce} + {}^{94}_{40}\text{Zr} + 6\cdot{}^0_{-1}\text{e} + 2\cdot{}^1_0\text{n}$   
 $(m_{\text{U}} = 235,0439$  а. е. м.;  $m_{\text{Ce}} = 139,9054$  а. е. м.;  $m_{\text{Zr}} = 93,9036$  а. е. м.). [208 МэВ]

## § 83. 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  ${}^1_1\text{H}$ )  $Z \leq N$  ( $Z/N \leq 1$ ) 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. Ядра, содержащие избыточное число протонов, освобождаются от этого избытка в результате *альфа-распада*.

**Альфа-распад** — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием  $\alpha$ -частицы.

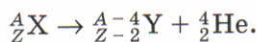
Ядра, содержащие избыточное число нейтронов, уменьшают их число в результате *бета-распада*.



**Бета(минус)-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона и антинейтрино.**

**Альфа-распад.** 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 числа нуклонов запишем уравнение альфа-распада:



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:  $\frac{Z-2}{N-2} < \frac{Z}{N}$ .

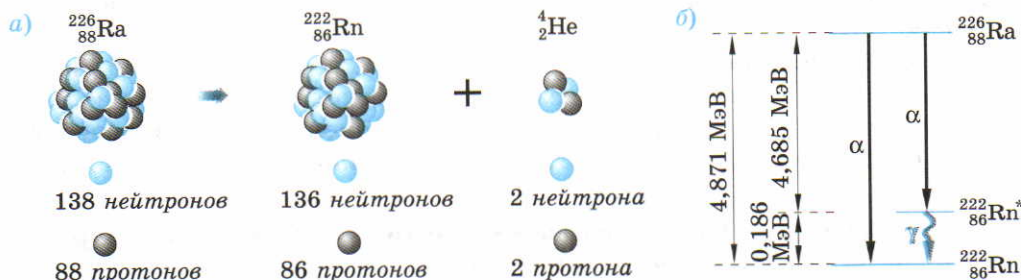
Широко применяемым источником  $\alpha$ -частиц является радий —  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ . При распаде он превращается в радон (рис. 265, а):



**Энергия распада — суммарная кинетическая энергия продуктов распада.**

Кинетическая энергия продуктов распада определяется разностью масс материнского ядра  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  и продуктов распада реакции (244):

$$E_k = (m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\alpha})c^2.$$



## ▲ 265

Альфа-распад радия: а) продукты распада; б) энергетический спектр

Известно, что  $m_{\text{Ra}} = 226,025406$  а. е. м.,  $m_{\text{Rn}} = 222,017574$  а. е. м.,  $m_{\alpha} = 4,002603$  а. е. м., а одной атомной единице массы соответствует энергия 931,494 МэВ. Тогда

$$E_k = 4,871 \text{ МэВ.}$$

Большую часть этой энергии уносит более легкая  $\alpha$ -частица, и эта энергия постоянна. Она определяется соотношением масс дочернего ядра и  $\alpha$ -частицы.

Альфа-распад  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  может проходить в два этапа: сначала образуется дочернее ядро  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  в возбуждённом состоянии, которое затем, испуская  $\gamma$ -квант с энергией 0,186 МэВ, переходит в основное состояние  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  (см. рис. 265, б).

**Гамма-излучение — электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбуждённого в более низкие энергетические состояния.**

**Бета-распад.** 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, большим на единицу,



Электрон не содержит нуклонов, поэтому его массовое число равно нулю.

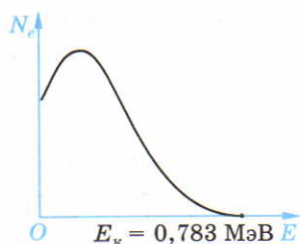
Появление вопросительного знака в уравнении реакции не случайно. В процессе бета-распада один из нейтронов превращается в протон. При этом вследствие закона сохранения электрического заряда образуется электрон. В результате процесса  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$  выделяется энергия:

$$E_k = (m_n - m_p - m_e)c^2; E_k = 0,783 \text{ МэВ.}$$

Практически вся эта энергия должна передаваться более лёгкой частице — электрону. Поэтому все образующиеся при бета-распаде электроны должны обладать одной и той же энергией, равной 0,783 МэВ.

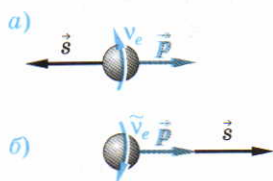
Однако эксперименты, проведённые Чедвиком в 1914 г., показали, что энергия электронов может быть любой в пределах от 0 до 0,783 МэВ. На рисунке 266 приведено распределение электронов бета-распада по энергиям, или, другими словами, дан спектр энергий этих электронов. Из результатов опыта Чедвика следует, что не вся энергия распада пере-





### ▲ 266

Спектр энергий электронов при  $\beta$ -распаде

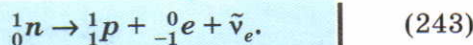


### ▲ 267

Спины античастиц:

- а) нейтрино;  
б) антинейтрино

даётся электрону. В 1931 г. австрийский физик **Вольфганг Паули** предположил, что при  $\beta$ -распаде возникает ещё одна электрически нейтральная частица, которая приобретает импульс и уносит с собой часть энергии. 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. 267). Спин  $\vec{s}$  нейтрино направлен противоположно его импульсу  $\vec{p}$  (направлению скорости движения), а спин антинейтрино сонаправлен с ним. На рисунке 267 условно показано направление вращения нейтрино относительно направления его импульса. Нейтрино и антинейтрино обладают полуцелым спином  $\hbar/2$ . Таким образом процесс превращения нейтрона в протон сопровождается вылетом не только электрона, но и электронного антинейтрино:



Соответственно антинейтрино возникает и в процессе  $\beta$ -распада:



Электрон и антинейтрино не входят в состав ядра атома, а рождаются в процессе  $\beta$ -распада. Фотон также не является составной частью атома, а возникает лишь при переходе ядра атома из одного квантового состояния в другое. Появление новых элементарных частиц в ходе ядерных реакций отражает их фундаментальное свойство — *взаимопревращаемость*.

Распределение энергии распада между электроном и антинейтрино носит случайный характер: энергия уносится и электроном, и антинейтрино. В редких случаях вся энергия передаётся электрону. Этот случай соответствует верхней границе  $E_k = 0,783$  МэВ электронного спектра (см. рис. 266). В этом случае энергия антинейтрино минимальна и определяется его массой покоя.

Оценки массы нейтрино и антинейтрино показали, что их массы составляют менее 1/20 000 от массы электрона. Пытаясь уточнить массы

нейтрино, учёные сталкиваются с большими экспериментальными трудностями. Дело в том, что нейтрино и антинейтрино не участвуют в сильном и электромагнитном взаимодействии, и их гравитационная масса крайне мала. Если бы распад нейтрона или  $\beta$ -распад ядер был обусловлен электромагнитным взаимодействием, то он происходил бы в десятки миллиардов раз быстрее. Чтобы составить представление о интенсивности слабых взаимодействий, в которых участвуют нейтрино и антинейтрино, достаточно сказать, что длина свободного пробега нейтрино с энергией 1 МэВ в воде равна примерно  $10^{19}$  м (1000 световых лет). Такое расстояние, которое проходит нейтрино между столкновениями, намного превышает линейные размеры звёзд (например, диаметр Солнца  $1,4 \cdot 10^9$  м). Нейтрино свободно пронизывают Солнце, а тем более Землю. Уточнение массы нейтрино позволит правильнее оценить массу Вселенной. «Скрытая» масса невидимых нейтрино существенно определяет дальнейший процесс эволюции Вселенной.

### ВОПРОСЫ

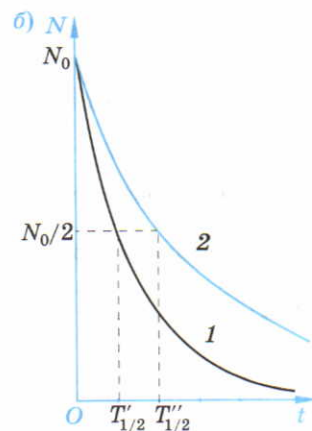
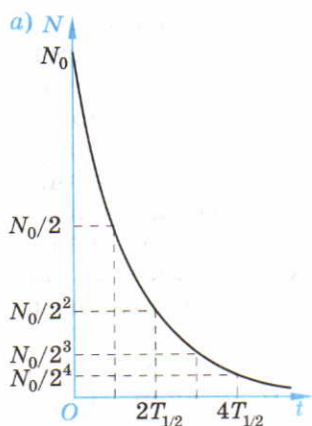
1. Какое физическое явление называют радиоактивностью? Какие различают виды радиоактивности?
2. Что является причиной радиоактивного распада?
3. Какой радиоактивный распад называют  $\alpha$ -распадом? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате  $\alpha$ -распада?
4. Какой радиоактивный распад называют  $\beta$ -распадом? Относительная доля каких нуклонов в ядре уменьшается в результате  $\beta$ -распада?
5. Как объясняется возникновение электронного антинейтрино при  $\beta$ -распаде?

## § 84. 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 распадутся за этот промежуток времени. Например, половина атомов радона распадутся за 3,82 дня. Чем больше первоначальное число атомов  $N_0$ , тем точнее будет выполняться это вероятностное предсказание.

**Период полураспада — промежуток времени, за который распадутся половина первоначального числа атомов.**





## ▲ 268

**Закон радиоактивного распада:**

а) число нераспавшихся атомов как функция времени;

б) число нераспавшихся атомов в двух образцах с разным периодом полураспада

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**

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (245)$$

Период полураспада для разных изотопов 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 268, 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 одина-

ковым в обоих образцах) (рис. 268, б). Периоды полураспада для некоторых изотопов приведены в таблице 13.

**Активность радиоактивного вещества.** Зная число  $N$  нераспавшихся атомов и их начальное число, можно найти число атомов  $N_{\text{расп}}$ , распавшихся к моменту времени  $t$ :

$$N_{\text{расп}} = N_0 - N = N_0 - N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Скорость изменения любой физической величины со временем определяется как производная от этой величины по времени. Например, скорость частицы в определённом направлении равна производной по времени от соответствующей

координаты:  $v_x = \frac{dx}{dt}$  — скорость изменения маг-

нитного потока  $\Phi$  характеризуется производной  $\frac{d\Phi}{dt}$ . Аналогично ско-

рость радиоактивного распада определяется производной  $\frac{dN_{\text{расп}}}{dt} = A$ , называемой *активностью радиоактивного вещества*.

Таблица 13

**Период полураспада радиоактивных серий**

Начальный изотоп	Конечный изотоп	Период полураспада, лет
${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^{207}_{82}\text{Pb}$	$7,04 \cdot 10^8$
${}^{238}_{92}\text{U}$	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	$4,47 \cdot 10^9$
${}^{232}_{90}\text{Th}$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$	$1,41 \cdot 10^{10}$

### 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.

Для расчёта активности воспользуемся основным логарифмическим тождеством  $2 = e^{\ln 2}$  ( $e$  — основание натуральных логарифмов). С его помощью представим  $N_{\text{расп}}$  в виде

$$N_{\text{расп}} = N_0 - N_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}}.$$

Тогда

$$A = \frac{dN_{\text{расп}}}{dt} = -N_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}} \left( -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \right) = N_0 e^{-t / T_{1/2}} \frac{\ln 2}{T_{1/2}}.$$

С учётом формулы (245) окончательно получаем ( $1/\ln 2 = 1,44$ ):

$$A = \frac{N}{1,44 T_{1/2}}. \tag{246}$$



Чем быстрее распадаются ядра, тем меньше период полураспада, а значит, тем больше активность вещества. Активность пропорциональна числу нераспавшихся атомов, которое убывает с течением времени. Следовательно, активность радиоактивного вещества убывает с течением времени. Активность одного грамма радия равна  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Эта величина часто используется на практике в качестве единицы активности — *кюри* (1 Ки);  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Промежуток времени  $t = 1,44T_{1/2}$  характеризует *среднее время жизни радиоактивного изотопа*.

**Радиоактивные серии.** Естественный радиоактивный распад конкретного изотопа может являться отдельным звеном длинной последовательности (серии) ядерных превращений. Промежуточные в серии дочерние ядра, будучи нестабильными, продолжают распадаться до тех пор, пока не образуется стабильное ядро. Например, стабильные изотопы свинца образуются при трёх естественных радиоактивных сериях распадов, начинающихся с материнских ядер  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и  ${}^{232}_{90}\text{Th}$ .

Период полураспада для этих серий приведён в таблице 12.

Вся совокупность радиоактивных изотопов, возникающих в серии радиоактивных превращений урана, называется *радиоактивным семейством урана*. Серия радиоактивных превращений  ${}^{238}_{92}\text{U}$  показана на рисунке 269, где по оси абсцисс откладывается зарядовое число  $Z$ , а по оси ординат  $N$  — число нейтронов в ядре. При альфа-распаде и  $Z$ , и  $N$  уменьшаются на две единицы, при бета-распаде  $Z$  увеличивается на единицу, а  $N$  на единицу уменьшается.

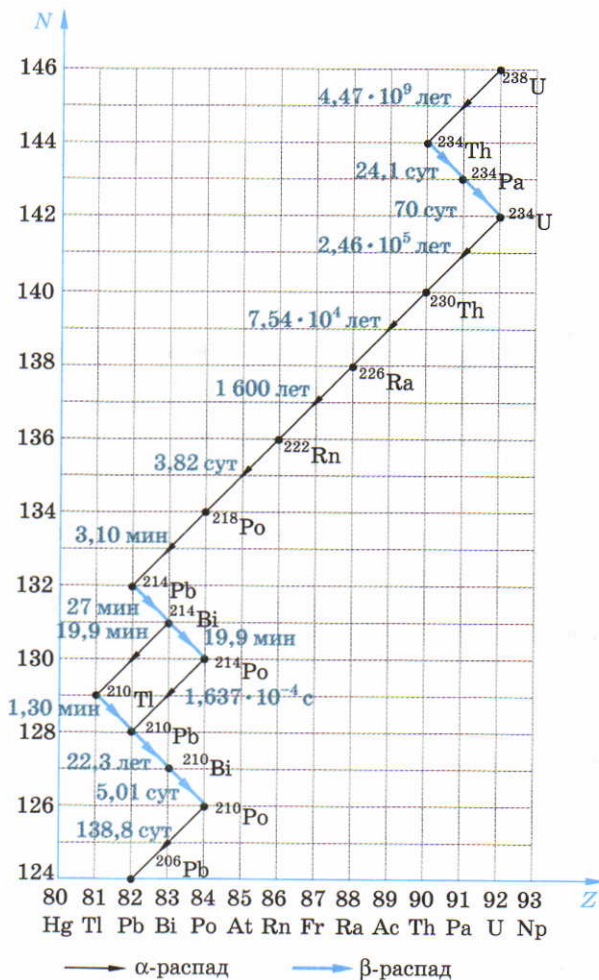
Для каждого промежуточного радиоактивного превращения на рисунке 269 приведён период полураспада.

Явление радиоактивного распада широко используется в *изотопной хронологии*, т. е. для определения 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.

## ВОПРОСЫ

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.



269

*Серия естественного радиоактивного распада изотопа*

4. Какая физическая величина характеризует скорость радиоактивного распада? В каких единицах она измеряется?
5. Опишите серию радиоактивных превращений  $^{238}_{92}\text{U}$ . Какие изотопы относятся к радиоактивному семейству урана?

**ЗАДАЧИ**

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. **[4,5 · 10<sup>9</sup> лет]**



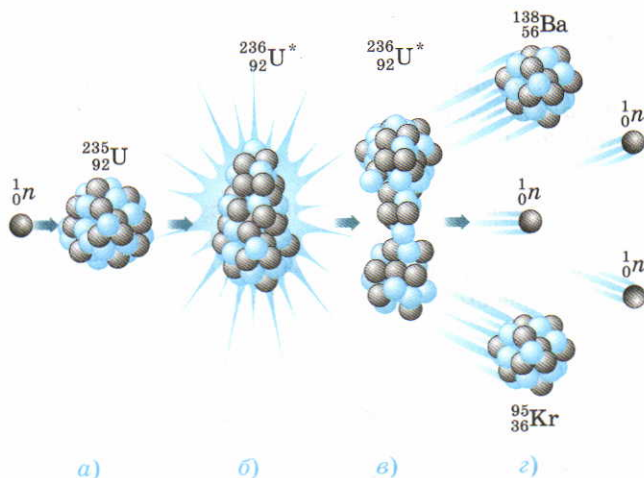
- Изотоп протактиния  ${}_{91}^{234}\text{Pa}$  имеет период полураспада  $T_{1/2} = 1,18$  мин. Какая часть изотопов останется нераспавшимися через час? **[4,97 · 10<sup>-16</sup>]**
- Радиоактивный фосфор  ${}_{15}^{32}\text{P}$ , использующийся для диагностики болезней кровообращения, имеет период полураспада 14,3 дня. Найдите активность образца с числом атомов  $N = 5 \cdot 10^{16}$ . **[3 · 10<sup>10</sup> Бк]**
- Период полураспада  ${}_{88}^{222}\text{Ra}$   $T_{1/2} = 3,82$  дня. Найдите среднее время жизни этого изотопа. **[5,5 дня]**
- Сколько альфа- и бета-распадов происходит в серии радиоактивных превращений  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ? **[8; 6]**

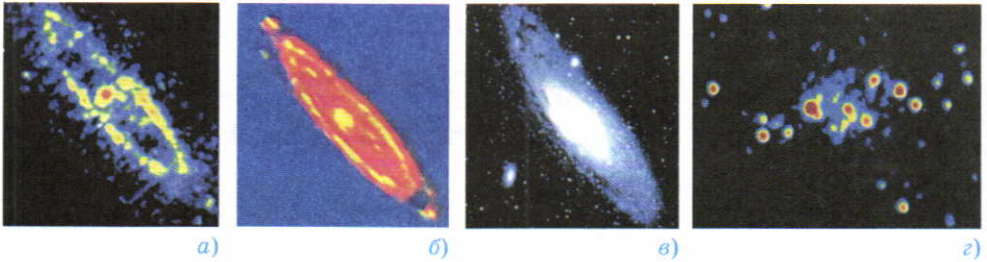
## § 85. Искусственная радиоактивность

**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  ${}_{92}^{235}\text{U}$  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. 270, а). Временный захват нейтрона нарушает хрупкую стабильность ядра, обусловленную тонким балансом сил кулоновского отталкивания и ядерного притяжения (рис. 270, б). Возникающие пространственные колебания нуклонов возбуждённого ядра (обозначаемого со звёздочкой)  ${}_{92}^{236}\text{U}^*$  являются неустойчивыми. Избыток нейтронов в центре ядра означает избыток протонов на

### 270

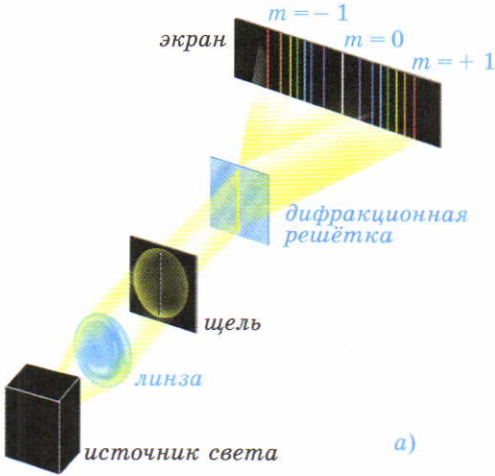
Процесс деления ядра:  
 а) взаимодействие нейтрона с ядром;  
 б) захват нейтрона ядром;  
 в) колебание возбуждённого ядра;  
 г) образование осколков деления



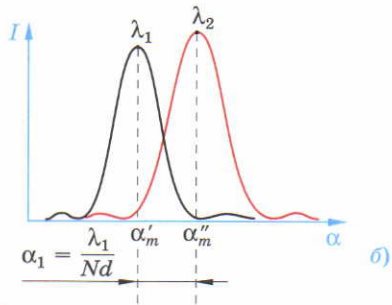


### ▲ VIII

Излучение туманности Андромеды:  
 а) в радиодиапазоне;  
 б) в ИК-диапазоне;  
 в) в видимом свете;  
 г) в рентгеновском диапазоне



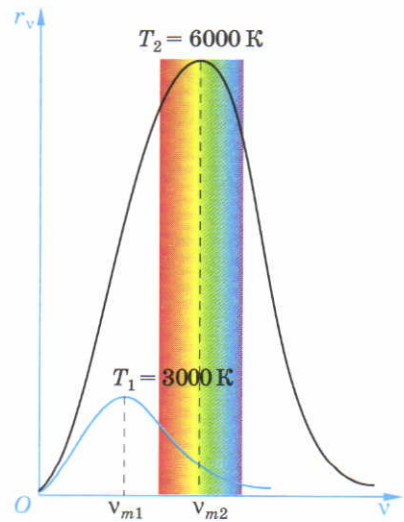
а)



б)

### ▲ IX

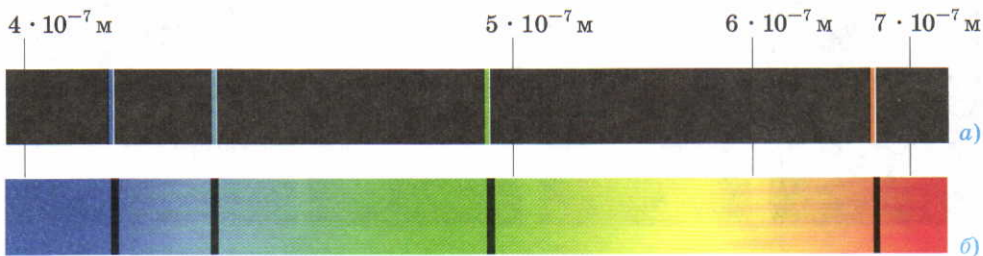
Разложение излучения в спектр с помощью дифракционной решётки:  
 а) оптическая схема;  
 б) раздельное наблюдение спектральных линий



### ▲ X

Тепловое излучение чёрного тела.  
 Закон теплового излучения





## ▲ XI

Серия Бальмера для атома водорода:

а) спектр излучения;

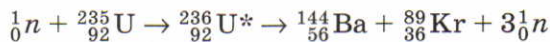
б) спектр поглощения



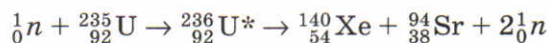
## ▲ XII

Поглощение космического излучения атмосферой Земли

периферии (рис. 270, в). Их взаимное отталкивание приводит к искусственной радиоактивности изотопа  ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ , т. е. к его делению на ядра меньшей массы, называемые *осколками деления* (рис. 270, 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  ${}_{92}^{235}\text{U}$  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 различием удельных энергий связи ядер урана и осколков реакции. Удельная энергия связи нуклона в ядре урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  около 7,6 МэВ, а осколков реакции около 8,5 МэВ (см. рис. 264). Поэтому в результате реакции деления выделяется энергия  $(8,5 - 7,6)$  МэВ = 0,9 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 кт взрывчатого ве-

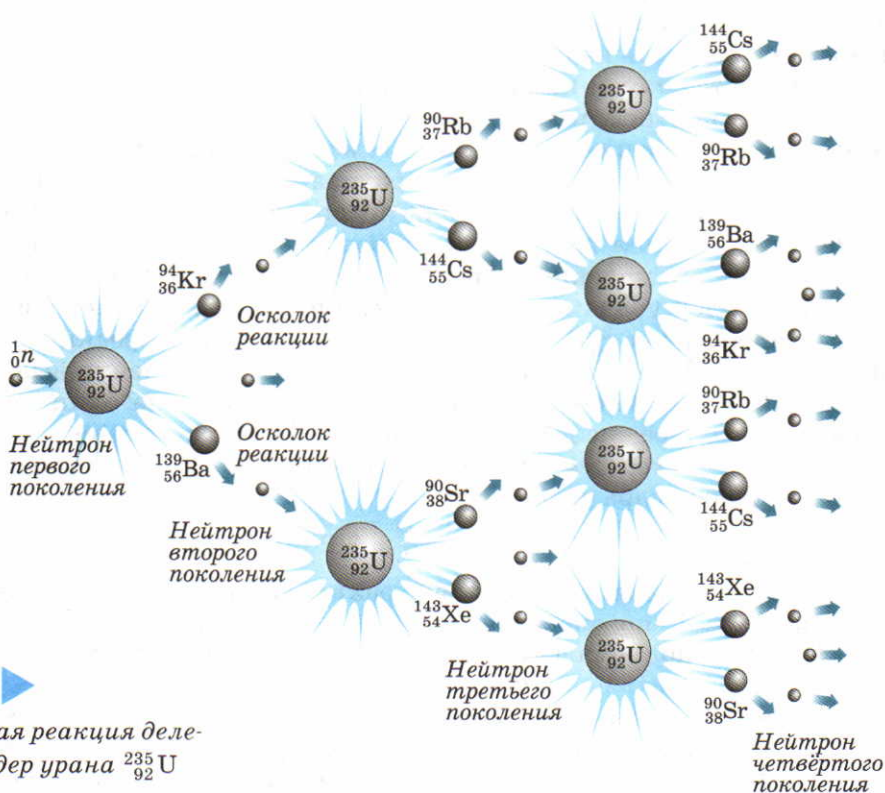


щества тринитротолуола. С помощью такой энергии можно вскипятить около 2000 т воды.

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. 271). Цепная реакция может возникать также при делении искусственно созданных изотопов урана  $^{233}_{92}\text{U}$  и плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$ .

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 связана с большим временем их взаимодействия



из-за малой скорости относительного движения. Для деления ядер урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , 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.

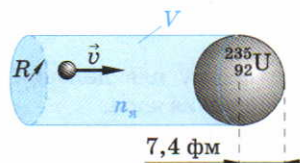
При  $k > 1$  реакция нестационарна: число нейтронов лавинообразно нарастает.

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  $l$  успевают образоваться новый нейтрон в результате реакции деления.*

За время пролёта среды первичный нейтрон столкнётся только с теми ядрами радиусом  $R$ , центры которых находятся в пределах цилиндра с площадью поперечного сечения  $\pi R^2$  и длиной образующей  $l$  (рис. 272). Объём цилиндра  $V = \pi R^2 l$ .

Зная концентрацию ядер  $n_{\text{я}}$ , найдём число ядер в объёме  $V$ , равное числу столкновений нейтрона с ядрами в единицу времени:

$$v_c = n_{\text{я}} V = n_{\text{я}} \cdot \pi R^2 l.$$



### ▲ 272

*Столкновение  
первичного нейтрона  
с ядром*



Каждое столкновение приводит к образованию вторичного нейтрона, самоподдерживающаяся реакция возникает при условии, что  $\nu_c = 1$ .

Следовательно, *минимальный критический размер активной зоны* (в которой протекает цепная реакция):

$$l = \frac{1}{n_{\text{я}} \pi R^2}.$$

По известной плотности урана  $\rho = 18,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и молярной массе  $M = 235 \cdot 10^{-3}$  кг/моль можно оценить концентрацию ядер ( $N_A$  — число Авогадро):

$$n_{\text{я}} = \frac{\rho}{m_{\text{а}}} = \frac{\rho}{M} N_A = \frac{18,7 \cdot 10^3}{235 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 4,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Учитывая, что радиус ядра урана  $R \approx 7,4 \cdot 10^{-15}$  м, получаем критический размер активной зоны:

$$l = \frac{1}{4,8 \cdot 10^{28} \pi \cdot (7,4 \cdot 10^{-15})^2} \approx 0,12 \text{ м}.$$

Считая, что активная зона имеет форму куба со стороной  $l$ , можно оценить критическую массу:

$$m_{\text{кр}} = \rho l^3 = 33,2 \text{ кг}.$$

Более точные расчёты даёт значение критической массы, по порядку величины совпадающее с результатом нашей оценки ( $m_{\text{кр}} = 47$  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  ${}_{92}^{235}\text{U}$  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. Проведите оценку критического размера активной зоны и критической массы.

## § 86. 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.

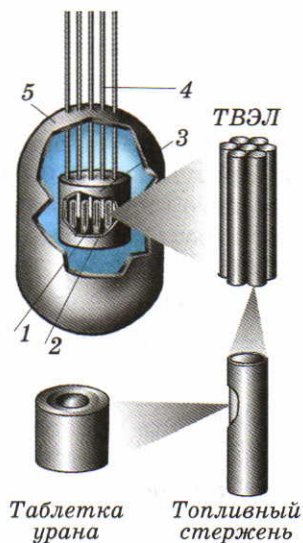
Впервые управляемая цепная реакция деления ядер урана была осуществлена в 1942 г. в США под руководством итальянского физика Ферми. Цепная реакция с коэффициентом размножения нейтронов  $k = 1,0006$  длилась в течение 28 мин, после чего реактор был остановлен. В настоящее время в мире работает около тысячи ядерных реакторов различного типа и назначения.

Принципиальная схема ядерного реактора показана на рисунке 273.

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  ${}_{92}^{235}\text{U}$  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  ${}_{92}^{235}\text{U}$  в цепной реакции было наиболее эффективно, их замедляют, вводя в активную зону *замедлитель 2* — *вещество, уменьшающее кинетическую энергию нейтронов*. В качестве 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, § 34)). 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*.



▲ 273

Схема ядерного реактора



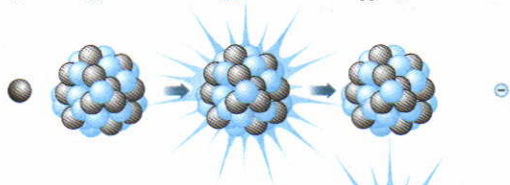
Управление скоростью цепной реакции осуществляется с помощью передвижения в активной зоне *регулирующих стержней 4*. Такие стержни изготавливают из материалов, сильно поглощающих нейтроны (кадмий, карбид бора). При увеличении глубины погружения регулирующих стержней в активную зону число поглощаемых 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.

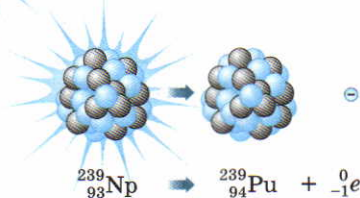
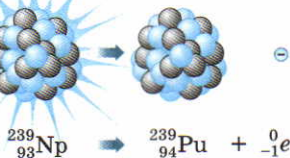
Для защиты персонала, обслуживающего ядерный реактор, от мощного потока нейтронов и  $\gamma$ -квантов, возникающих при делении ядер и бета-распадах осколков реакции, предусмотрена *радиационная защита 5*. Быстрые нейтроны вначале замедляются с помощью материалов из лёгких элементов, а затем поглощаются 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 изотопов 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. 274, 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. 274, 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 энер-



б)



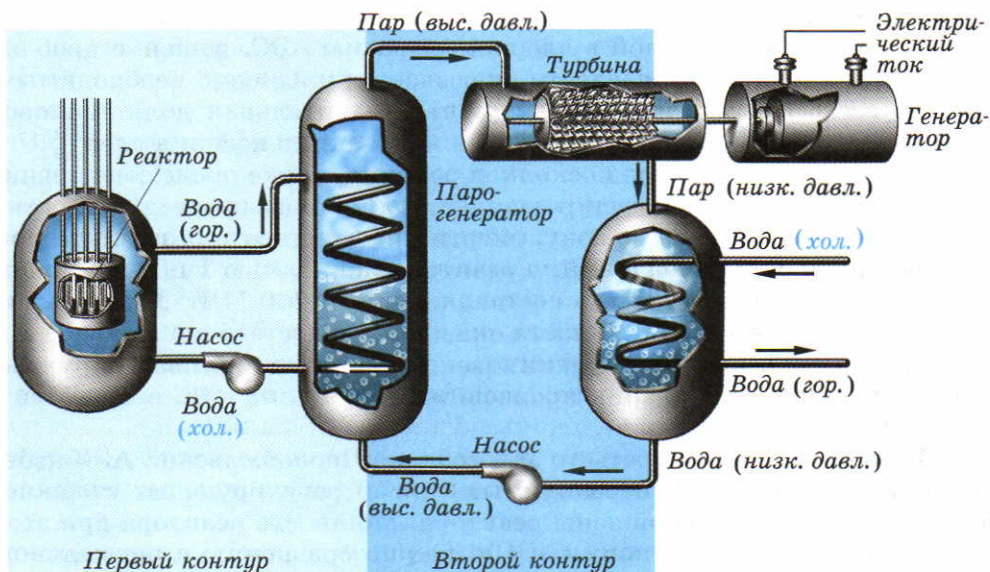
◀ 274

Производство плутония в ядерном реакторе:  
 а) образование нептуния  ${}^{239}_{93}\text{Np}$ ;  
 б) возникновение плутония  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$

гию пара, вращающего паровую турбину. Паровая турбина в свою очередь вращает ротор генератора, вырабатывающего электрический ток.

Принципиальная схема атомной электростанции приведена на рисунке 275.

Мощность реактора — количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени.



▲ 275

Принципиальная схема атомной электростанции



При каждом акте деления выделяется энергия около  $200 \text{ МэВ} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ . Тогда мощности  $3000 \text{ МВт}$  будет соответствовать  $3 \cdot 10^9 / 3,2 \cdot 10^{-11} \approx 10^{18}$  актов деления в секунду. При делении ядер стенки ТВЭЛов сильно нагреваются. Отвод тепла из активной зоны осуществляется *теплоносителем* — водой. В мощных реакторах зона нагревается до температуры  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  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  $1 \text{ ГВт}$  эта дополнительная тепловая мощность составляет около  $200 \text{ МВт}$ . В отсутствие охлаждающей воды этой мощности оказывается достаточно для расплавления оболочки реактора и проникновения ядерного топлива в окружающую среду. Подобная авария произошла в  $1979 \text{ г.}$  на АЭС в Три-Майл-Айленд (США).

В  $1986 \text{ г.}$  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  $4 \text{ с}$  выросла с  $1\%$  от нормы в  $100 \text{ раз}$  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 радиоак-

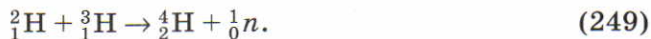
тивных веществ в атмосферу составил около  $10^{18}$  Бк. Радиоактивное заражение обширных территорий Украины, Белоруссии и России будет сказываться ещё в течение многих лет (достаточно сказать, что период полураспада плутония  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  — 24 000 лет). В результате работы АЭС возникают 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.

### ВОПРОСЫ

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 (рис. 273).
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 (рис. 275).
5. Охарактеризуйте основные меры безопасности, необходимые при работе АЭС.

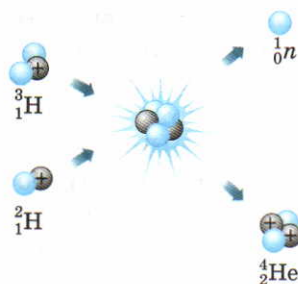
## § 87. Термоядерный синтез

**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. 264). 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. 276) приобретает 70% этой энергии. Сравнение энергии, приходящейся 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.*





### ▲ 276

#### Термоядерный синтез

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.

Оценим потенциальную энергию взаимодействия ядер дейтерия и трития, имеющих заряд  $(+e)$  и сблизившихся на расстояние  $r = 10^{-14}$  м (см. Ф-10, формула (236)):

$$W = k \frac{e^2}{r} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{10^{-14}} = 2,3 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,14 \text{ МэВ}.$$

Средняя кинетическая энергия ядер определяется температурой (см. Ф-10, формула (172)):

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT.$$

Тогда преодолеть кулоновское отталкивание смогут лишь ядра, имеющие кинетическую энергию:

$$\bar{E} \geq W$$

или температуру

$$T \geq \frac{2W}{3k} = \frac{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-14}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} = 10^9 \text{ К}.$$

Кинетическая энергия наиболее быстрых ядер может быть порядка 0,14 МэВ и при температурах  $10^7$  К, на два порядка меньших за счёт «хвоста» максвелловского распределения частиц по скоростям (см. Ф-10, § 50). Тем не менее реакции слияния лёгких ядер могут протекать лишь при температурах порядка сотен миллионов градусов и поэтому называются *термоядерными* (от лат. *therme* — тепло).

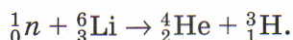
**Термоядерный синтез** — реакция, в которой при высокой температуре, большей  $10^7$  К, из лёгких ядер синтезируются более тяжёлые.

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.

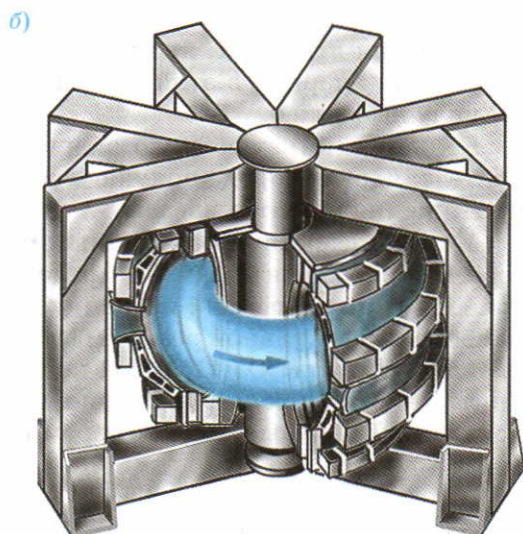
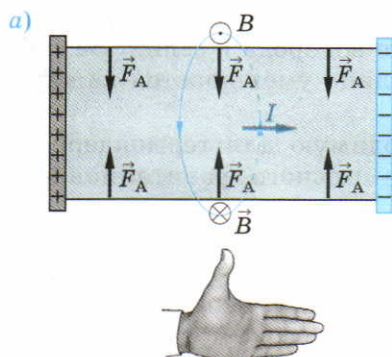
Большую кинетическую энергию, необходимую для термоядерного синтеза, ядра водорода получают в результате сильного гравитационного притяжения к центру звезды.

**Управляемый термоядерный синтез.** Осуществление управляемого термоядерного синтеза (УТС) предоставило бы человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Дейтерий, необходимый для наиболее эффективной реакции (247), 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. 277, а). 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 нарушается конфигурация плазменного столба, разряд становится неустойчивым. Для уменьшения пространственной неоднородности разряда советские физики **А. Д. Сахаров** и **И. Е. Тамм** предложили применять плазменную конфигурацию в форме бублика (тора), которая используется в установке УТС «Токамак» (рис. 277, б). На этой установке удалось нагреть плазму до температуры  $1,3 \cdot 10^7$  К. Однако удержать возникающую при этом





### ▲ 277

Управляемый термоядерный синтез:

- а) удержание плазмы магнитным полем;  
 б) установка «Токамак»

плазму в течение необходимого для поддержания термоядерной реакции времени пока не удаётся, но существует обоснованная уверенность, что создание термоядерного реактора — дело ближайшего будущего.

### ВОПРОСЫ

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? Приведите оценку такой температуры.
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?

## § 88. 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

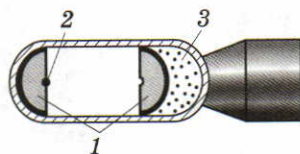
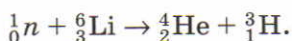
цепная реакция деления ядер с огромным выделением энергии — ядерный взрыв. Необходимым условием для осуществления такой реакции является наличие критической массы урана  $^{235}_{92}\text{U}$  или плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  (см. § 85). Превышение критической массы ведёт к неуправляемой реакции взрывного типа.

Одна из возможных конструкций атомной бомбы приведена на рисунке 278. 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 взорвана 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 газообразный 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.

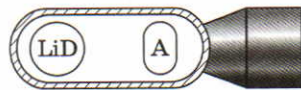
Мощность взрыва характеризуют *тротиловым эквивалентом*. Мощность первого ядерного взрыва составила 20 кт, т. е. при таком взрыве выделяется такая же энергия, как и при взрыве 20 000 т тринитротолуола.

**Водородная бомба.** Неуправляемый термоядерный синтез удалось осуществить при взрыве водородной (термоядерной) бомбы. Одна из возможных конструкций водородной бомбы приведена на рисунке 279. Термоядерным зарядом является твёрдое вещество дейтерид лития 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  $^3_1\text{H}$ :



### ▲ 278

Принципиальная конструкция атомной бомбы



### ▲ 279

Принципиальная конструкция водородной бомбы





## ▲ 280

*Термоядерный взрыв  
в атмосфере*

Наличие дейтерия и трития при высокой температуре взрыва атомной бомбы инициирует термоядерную реакцию (239), 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 (247)) вызывают в нём новую цепную неуправляемую реакцию деления. Возникает третья фаза взрыва водородной бомбы. Подобным образом создаётся термоядерный взрыв практически неограниченной мощности (рис. 280).

В СССР первая экспериментальная модель водородной бомбы была испытана 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. В настоящее время при наличии глобального ядерного конфликта использование всех запасов ядерного оружия способно несколько раз уничтожить всё живое на Земле. Поэтому жизненно необходимыми являются международные договоры о запрещении ядерных испытаний и о нераспространении ядерного оружия и средств его доставки.

### ВОПРОСЫ

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?

## § 89. Биологическое действие радиоактивных излучений

**Воздействие радиоактивного излучения на вещество.** Изучение воздействия радиоактивного излучения на живые организмы становится актуальной задачей современной цивилизации. Использование положи-

тельных полезных аспектов этого воздействия и возможное своевременное прогнозирование предотвращения его негативных последствий представляет в настоящее время практический интерес.

Термин «радиоактивное излучение» подразумевает не только гамма- и рентгеновское излучение, но и продукты радиоактивных превращений: электроны, протоны,  $\alpha$ -частицы, ионы тяжелых элементов. Торможение быстрых заряженных частиц в электрическом поле ядра атомов сопровождается испусканием квантов тормозного рентгеновского излучения. Радиоактивное излучение называют также *ионизирующим излучением*, так как, проходя через живую ткань, оно вызывает ионизацию атомов. 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 14 приведены коэффициенты качества для различных видов ионизирующих излучений.

Таблица 14

**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



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.

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).

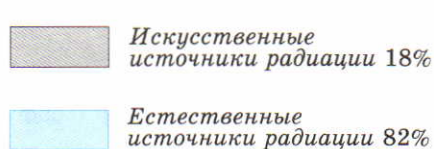
1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой доза поглощённого гамма-излучения равна 1 Гр.

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 приведен на рисунке 281.



281

Вклад источников ионизирующего излучения в радиационной фон



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 развитых 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.

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

- Протон — нуклон в заряженном состоянии, нейтрон — в нейтральном.

Протон и нейтрон обладают полуцелым спином, равным  $\hbar/2$ .

Ядро атома любого химического элемента состоит из протонов и нейтронов. Химические свойства элемента определяются зарядовым числом  $Z$ , или числом протонов в ядре.

- **Изотопы** — атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое число протонов в ядре (зарядовое число  $Z$ ) и разное число нейтронов  $N$ .

Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате сильного взаимодействия друг с другом.

- **Зарядовая симметрия сильного взаимодействия** — независимость сил взаимодействия между нуклонами от их электрических зарядов.

Энергетически выгодно парное расположение нуклонов с антипа-

раллельными спинами в одном энергетическом состоянии ядра.

Наиболее стабильными являются чётно-чётные ядра (состоящие из четного 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.

Максимальной устойчивостью и поэтому наибольшей распространённостью в природе обладают дважды магические ядра  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ , у которых магическим является как число протонов, так и число нейтронов.

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 успевают образоваться новый нейтрон в результате реакции деления.

- **Ядерный реактор** — устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер.
- **Мощность реактора** — количест-



во тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени.

■ **Термоядерный синтез** — реакция, в которой при высокой температуре, большей  $10^7$  К, из легких 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.

## § 90. 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 бóльшую, 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, взаимодействующий с другими микробъектами как единое целое.**

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 момента 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*.

*Фермионы — частицы с полуцелым спином:  $\hbar/2$ ;  $3\hbar/2$ , ...* . К фермионам относятся, например, электрон  $e^-$ , протон  $p$ , нейтрон  $n$ , электронное нейтрино  $\nu_e$ .

*Бозоны — частицы с целым спином:  $0$ ;  $\hbar$ ,  $2\hbar$ , ...* . К бозонам относятся, например, фотон  $\gamma$ ,  $\pi^+$ -мезон.

Для распределения фермионов по возможным энергетическим состояниям справедлив принцип Паули.

### *Принцип Паули*

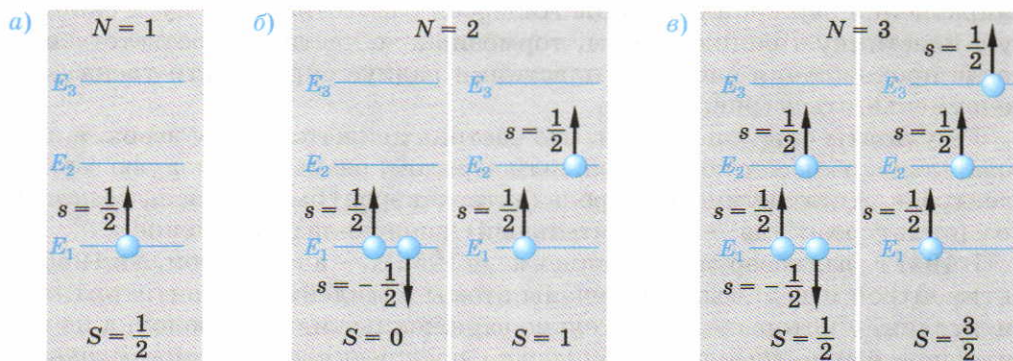
**В одном и том же энергетическом состоянии может находиться не более двух фермионов с противоположными спинами.**

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 состояниям системы  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  (рис. 282). 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. 282, а). Два из возможных распределений двух фермионов по энергиям приведены на рисунке 282, 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  $3\hbar/2$ .

**Античастицы.** Элементарные частицы существуют в двух разновидностях: частицы и античастицы. Каждой элементарной частице должна соответствовать античастица.



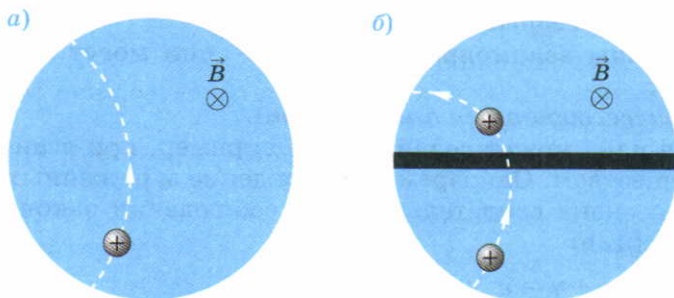
### ▲ 282

Распределение фермионов по энергетическим уровням:

а)  $N = 1$ ; б)  $N = 2$ ; в)  $N = 3$

**Античастица  $\bar{a}$  (элементарной частицы  $a$ ) — элементарная частица, имеющая (по отношению к  $a$ ) равную массу покоя, 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, заполняющий камеру), Андерсон обнаружил трек, принадлежащий частице с массой электрона. В перпендикулярном магнитном поле частица двигалась по окружности радиусом  $R = m_e v / (eB)$  (см. § 23, формула (64)). Её направление движения было неизвестно и зависело от знака заряда (рис. 283, а). Если частицей был электрон, то он должен был двигаться сверху вниз. Для определения



### ◀ 283

Трек позитрона в камере Вильсона в магнитном поле:

а) без свинцовой пластинки;  
 б) со свинцовой пластинкой



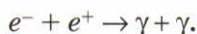
направления движения частицы Андерсон разместил на её пути свинцовую пластинку толщиной 6 мм, тормозившую частицу. Соответственно после прохождения частицей пластинки радиус окружности трека должен уменьшиться (рис. 283, б).

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 они исчезают (*аннигилируют*).

**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):



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

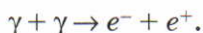
$$E_{\min} = 2m_e c^2 = 2(9,1 \cdot 10^{-31}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,02 \text{ МэВ}.$$

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

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

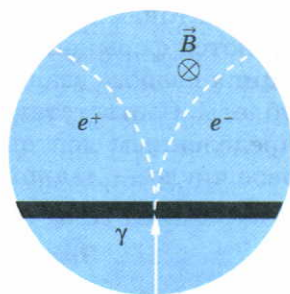
*Рождение пары* — процесс, обратный аннигиляции.

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



Электрически нейтральный квант превращается в частицы, общий заряд которых равен нулю. Для рождения пары у  $\gamma$ -кванта должна быть достаточная минимальная энергия, равная энергиям покоя частицы, —  $m_e c^2 = 0,51$  МэВ. При больших энергиях возможно рождение частиц большей массы.

На рисунке 284 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 разноимённо заряженные частицы в противоположные стороны, чем и объясняется их закручивание в разных направлениях.



▲ 284

Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле

### ВОПРОСЫ

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.

## § 91. Лептоны как фундаментальные частицы

**Лептонный заряд.** Наиболее удобной систематикой многочисленных элементарных частиц явилась их классификация по видам взаимодействий, в которых они участвуют. Все частицы, обладающие массой, гравитационно взаимодействуют друг с другом. 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).

**Адроны** — элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

**Лептоны** — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.



К лептонам относят 12 частиц (6 частиц и 6 античастиц). Все лептоны являются фермионами — они обладают полуцелыми спинами  $\hbar/2$ . В реакциях слабого взаимодействия лептонов участвуют лептон-нейтринные дублеты. Соответствующее нейтрино всегда возникает в реакции вместе с определённым лептоном. Для выделения класса лептонов вводят квантовое число — *лептонный заряд*  $L$ . Для лептонов  $L = 1$ , для антилептонов  $L = -1$ , для адронов  $L = 0$ .

### Закон сохранения лептонного заряда

**Сумма лептонных зарядов до и после взаимодействия сохраняется.**

Лептонный заряд электрона  $e^-$  и электронного нейтрино  $\nu_e$ , образующих первый лептонный дублет, равен единице, а позитрона  $e^+$  и электронного антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  равен  $-1$ .

Например, для реакции  $\beta^-$ -распада  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  закон сохранения лептонного заряда имеет вид:  $0 = 0 + 1 - 1$ .

Второй лептонный дублет образуют отрицательно заряженный мюон  $\mu^-$  и мюонное нейтрино  $\nu_\mu$ . Мюон был открыт в 1936 г. в космических лучах (на  $1 \text{ см}^2$  поверхности Земли каждую минуту попадает один мюон), и по своим свойствам он напоминает тяжёлый электрон. Масса мюона в 207 раз больше массы электрона. Через 2,2 мкс мюон распадается на электрон, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино, отличающееся от электронного. Лептонный заряд мюона и мюонного нейтрино  $L = 1$ :

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Для реакции распада мюона выполняется закон сохранения лептонного заряда:  $1 = 1 - 1 + 1$ .

Античастицам  $\mu^+$  и  $\bar{\nu}_\mu$  соответствует лептонный заряд  $L = -1$ .

В 1975 г. был открыт самый тяжёлый отрицательно заряженный лептон — таон  $\tau^-$  (или  $\tau$ -лептон). Таон в 3492 раза тяжелее электрона и почти в 2 раза тяжелее протона. За промежуток времени порядка  $4 \cdot 10^{-13} \text{ с}$   $\tau^-$  распадается на мюон  $\mu^-$ , мюонное антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$ , таонное нейтрино  $\nu_\tau$ . Лептонный заряд таона и таонного нейтрино  $L = 1$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau.$$

Для реакции распада таона закон сохранения лептонного заряда имеет вид

$$1 = 1 - 1 + 1.$$

Таон и таонное нейтрино образуют третий лептонный дублет.

Таблица 15

**Лептоны и их характеристики**

Дублет	Название	Символ		Масса		L	Время жизни, с
		частицы	анти-частицы	в $m_e$	в МэВ		
I	Электрон	$e^-$	$e^+$	1	0,511	$\pm 1$	Стабилен
	Электронное нейтрино	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0	$0 (< 1,4 \cdot 10^{-5})$	$\pm 1$	Стабильно
II	Мюон	$\mu^-$	$\mu^+$	207	105,66	$\pm 1$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0	$0 (< 0,25)$	$\pm 1$	Стабильно
III	Таон	$\tau^-$	$\tau^+$	3492	1784	$\pm 1$	$10^{-13}$
	Таонное нейтрино	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	0	$0 (< 35)$	$\pm 1$	Стабильно

В таблице 15 приведены важнейшие характеристики лептонов, для масс нейтрино приведены оценки сверху. Отличие от нуля массы нейтрино даёт возможность астрофизикам оценить огромную массу тёмного невидимого вещества во Вселенной. С помощью этих оценок можно найти плотность Вселенной, которая определяет дальнейший процесс её расширения и эволюции.

**Слабое взаимодействие лептонов.** Любое взаимодействие обусловлено обменом виртуальных частиц. Сильное взаимодействие нуклонов обеспечивается обменом  $\pi^+$ -мезоном (см. § 80). Зная радиус действия сил слабого взаимодействия  $R_{сл} \approx 10^{-18}$  м, можно приблизительно оценить массу  $m_0$  виртуальной частицы — переносчика слабого взаимодействия.

Согласно формуле (233):

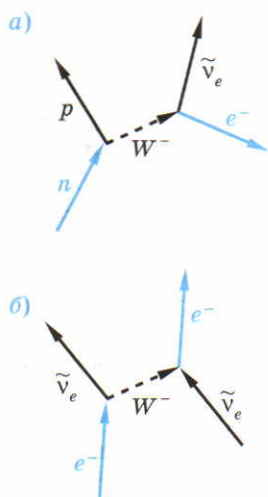
$$m_0 = \frac{\hbar}{R_{сл} \cdot c} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{10^{-18} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 3 \cdot 10^{-25} \text{ кг.}$$

Массе  $m_0$  соответствует энергия  $m_0 c^2 = 200 \text{ ГэВ} = 2 \cdot 10^{11} \text{ эВ}$ .

В 1956 г. американский физик **Джулиан Швингер** предположил, что переносчиком слабого взаимодействия являются два заряженных промежуточных векторных бозона  $W^+$  и  $W^-$  (от англ. weak — слабый). В 1961 г. другой американский учёный **Шелдон Глэшоу** предположил, что таким переносчиком может быть 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  $m_W = 81 \text{ ГэВ}$  и  $m_Z = 91 \text{ ГэВ}$ . Видно, что эти величины по порядку совпадают с нашей оценкой.





### ▲ 285

Слабое взаимодействие с участием  $W^-$ -бозона:

а)  $\beta$ -распад;  
 б) взаимопревращение  $e^-$  и  $\tilde{\nu}_e$

1. На какие две группы делятся все элементарные частицы по отношению к сильному взаимодействию?
2. Какие фундаментальные частицы относят к лептонам? Каким лептонным зарядом они обладают?
3. Сформулируйте закон сохранения лептонного заряда при распаде нейтрона, мюона и таона.
4. Приведите оценку массы виртуальной частицы — переносчика слабого взаимодействия. Какие частицы переносят слабое взаимодействие? Когда они были открыты?
5. Как происходит  $\beta$ -распад с участием промежуточного  $W^-$ -бозона?

### ВОПРОСЫ

## § 92. Классификация и структура адронов

**Классификация адронов.** К классу адронов в настоящее время относят около 300 элементарных частиц, участвующих 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.

Таблица 16

## Классификация адронов

Адроны		
Мезоны ( $s = 0, 1$ ) $\pi^0, \pi^+, \pi^-$ , $K^+, K^-, K^0, \tilde{K}^0, \eta^0$	Барионы	
	Нуклоны ( $s = 1/2$ ) $p, \tilde{p}, n, \tilde{n}$	Гипероны ( $s = 1/2, 3/2$ ) $\Lambda^0, \tilde{\Lambda}^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, \tilde{\Sigma}^0$ , $\Xi^0, \tilde{\Xi}^0, \Xi^-, \Xi^+, \Omega^-, \Omega^+$

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. 16). 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.

**Структура адронов. Кварки.** В среднем большие 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 пришло в 1969 г. из Стэнфорда, 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, 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 стакане, 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 полуце-



лым. Только при сложении трёх полуцелых спинов кварков можно получить полуцелый спин нуклона (см. рис. 282, 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  $+2/3e$  назвали  $u$ -кварком (от англ. up — вверх), а кварк с зарядом  $-1/3e$  —  $d$ -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*. 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

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):

$$1 = 1 + 0 + 0.$$

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 17 приведены основные характеристики кварков и антикварков.

Таблица 17

**Характеристики кварков и антикварков**

Кварк (аромат) $s = 1/2$	$q$	$B$	Антикварк (аромат) $s = 1/2$	$q$	$B$
$u, c, t$	$+2/3e$	$1/3$	$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$	$-2/3e$	$-1/3$
$d, s, b$	$-1/3e$	$1/3$	$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$	$+1/3e$	$-1/3$

**ВОПРОСЫ**

1. На какие группы по спину делят адроны? На какие подгруппы подразделяют барионы?
2. В чём состояла кварковая гипотеза М. Геллмана и Д. Цвейга? Какие эксперименты подтвердили существование трёх точечных зарядов в нуклонах? Почему спин этих зарядов (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 чисел? Сформулируйте закон сохранения барионного заряда. Как он подтверждает невозможность распада бариона на более мелкие частицы?
5. Приведите важнейшие характеристики основных типов кварков. Как называют различные типы кварков?

## § 93. 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 отличаются *цветом*. Согласно этой гипотезе каждый тип (аромат) кварков может иметь *три цветовых заряда*: красный, зелёный и синий. Конкретный  $u$ -кварк определён окрашен, он несёт один из трёх цветовых зарядов: либо красный  $u_r$ , либо зелёный  $u_g$ , либо синий  $u_b$ . Поэтому кварки, входящие в  $\Delta^{++}$ -барион, не одинаковы, а отличаются цветом. Его состав можно представить в виде  $(u_r u_g u_b)$ .

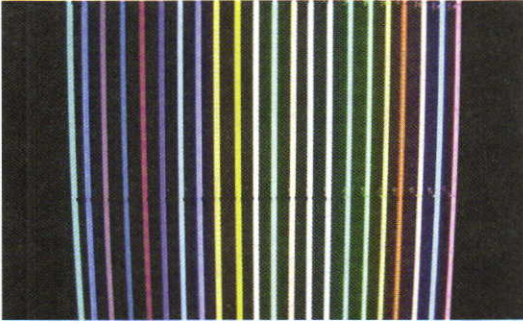
Реально, конечно, кварки не окрашены. Но эта удобная аналогия с цветом позволяет легче запомнить и оперировать сложными понятиями. Антикварки имеют антицвет, как бы нейтрализующий цвет: антикрасный (фиолетовый), антизелёный (красный), антисиний (жёлтый). Можно сказать, что основные цвета (красный, зелёный, синий) как бы подобны положительному электрическому заряду, а антицвета — отрицательному.

Цветовой заряд является характеристикой взаимодействия кварков, но не адронов в целом. Цветовое взаимодействие между адронами не наблюдается на опыте.

*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. XV на цветной вклейке, с. 385).



а)



б)

### ▲ XIII

*Типы самостоятельного разряда:*

*а) тлеющий разряд*

*в газоразрядных трубках;*

*б) дуговой разряд;*

*в) коронный разряд;*

*г) искровой разряд — молния*



в)



г)

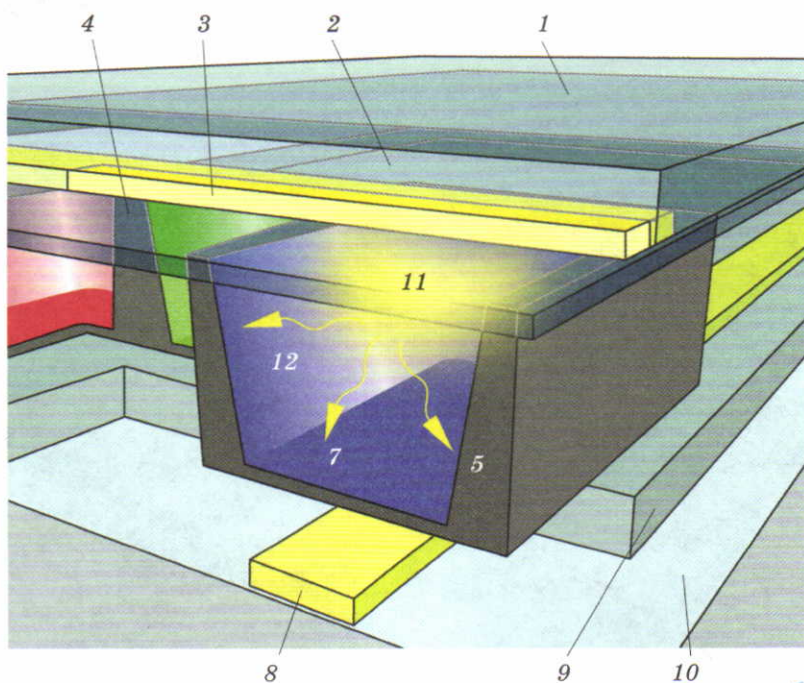
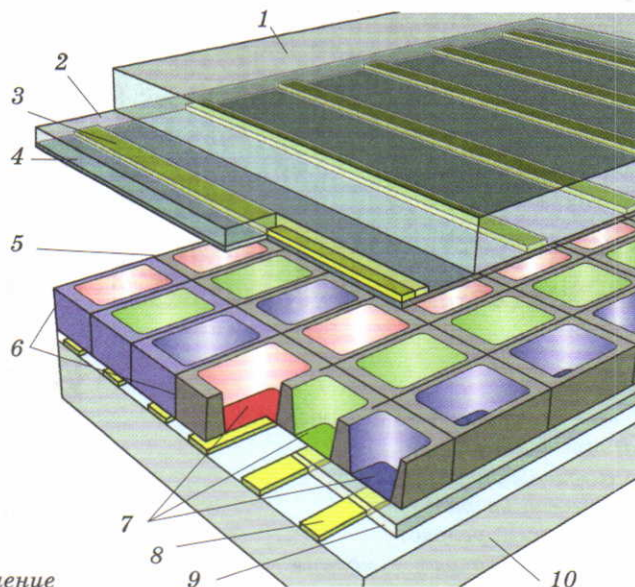


## XIV

Плазменный дисплей:




















а) принципиальная конструкция;  
б) разряд в ячейке пикселя.

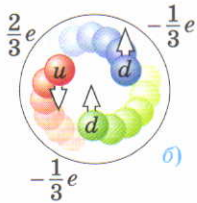
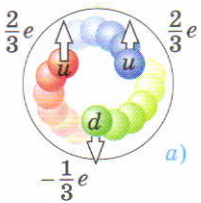
1. Внешнее стеклянное покрытие
2. Слой диэлектрика
3. Внешний электрод
4. Покрытие оксида магния MgO
5. Ребро жёсткости
6. Пиксель
7. Люминофор (к, з, с)
8. Внутренний электрод
9. Слой диэлектрика
10. Внутреннее стеклянное покрытие
11. Электрический разряд
12. Ультрафиолетовое излучение



# Таблица I

Три поколения фундаментальных частиц

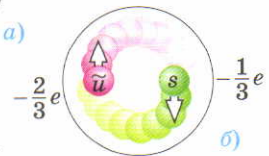
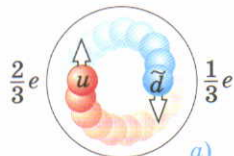
Поколение	Частица	Цвет	$q$	$m$ , ГэВ	
I	Кварк	$u$	  	$\frac{2}{3}e$	0,330
		$d$	  	$-\frac{1}{3}e$	0,333
	Лептон	$e^-$		$-e$	$5,11 \cdot 10^{-4}$
		$\nu_e$		0	$< 1,4 \cdot 10^{-8}$
II	Кварк	$c$	  	$\frac{2}{3}e$	1,5
		$s$	  	$-\frac{1}{3}e$	0,54
	Лептон	$\mu^-$		$-e$	0,106
		$\nu_\mu$		0	$< 2,5 \cdot 10^{-4}$
III	Кварк	$t$	  	$\frac{2}{3}e$	173
		$b$	  	$-\frac{1}{3}e$	5
	Лептон	$\tau^-$		$-e$	1,78
		$\nu_\tau$		0	$< 0,035$



## ▲ XV

Кварковая структура нуклонов:

- а) протон;  
б) нейтрон



## ▲ XVI

Кварковая структура мезона:

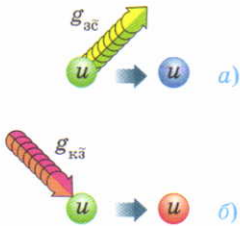
- а)  $\pi^+$ -мезон;  
б)  $K^-$ -мезон



## Таблица II

Переносчики фундаментальных взаимодействий

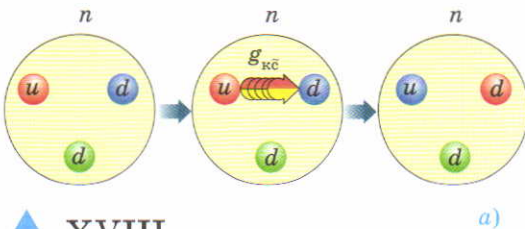
Взаимодействие	Переносчики взаимодействий
Сильное	 $\bar{3}$ $\bar{c}$ $\bar{k}$ $\bar{s}$ $\bar{b}$ $\bar{t}$ <i>антицвет</i> <i>цвет</i> $k$ $k$ $z$ $z$ $c$ $c$ Глюоны
Электromагнитное	 $\gamma$ Фотон
Слабое	 $W^+$ $Z^0$ $W^-$ Промежуточные векторные бозоны
Гравитационное	 $S = 2$ Гравитон



### ▲ XVII

Изменение цвета кварка:

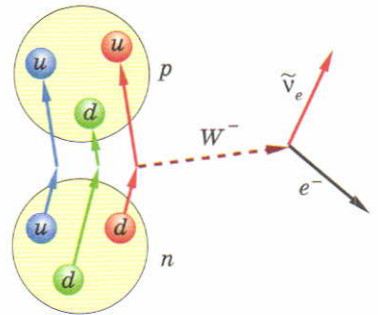
- а) излучение глюона;  
 б) поглощение глюона



### ▲ XVIII

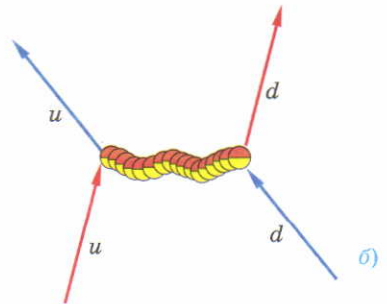
Взаимодействие кварков в нейтроне:

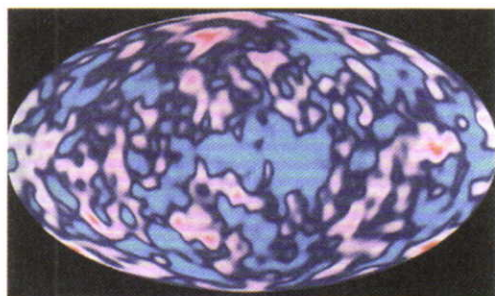
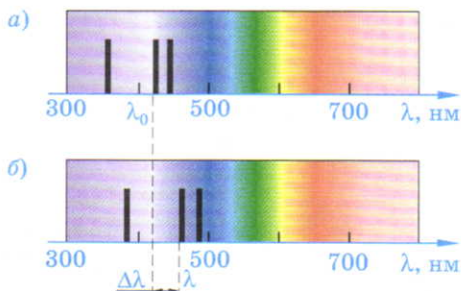
- а) обмен глюоном;  
 б) диаграмма Фейнмана



### ▲ XIX

Изменение аромата кварка при  $\beta^-$ -распаде





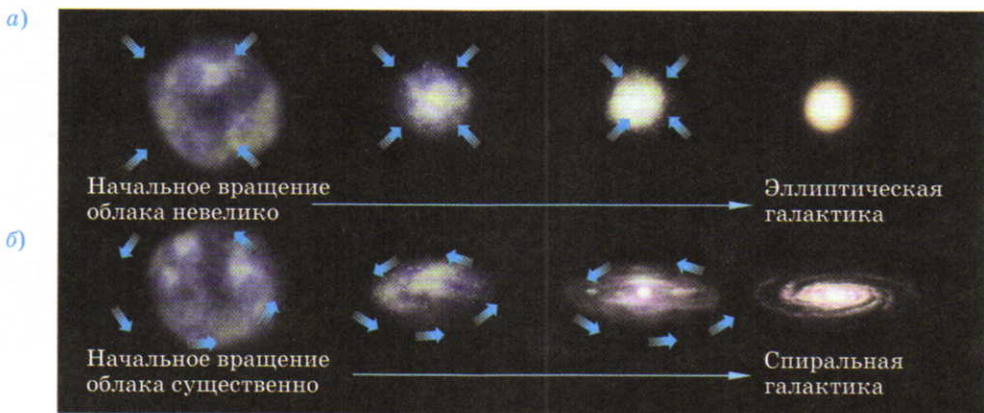
## XX

Спектральные линии  
излучения звезды:

- a) звезда покоится ( $v = 0$ );  
б) звезда движется  
от наблюдателя ( $v = 0,1c$ )

## XXII

Анизотропия температуры реликтового  
излучения, измеренной космическим  
аппаратом COBE, как подтверждение  
флуктуаций плотности первичного газа  
примерно через 350 000 лет с момента  
Большого взрыва



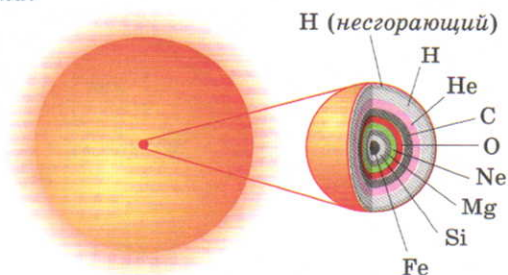
## XXIII

Образование галактик из газового облака:

- a) эллиптической;  
б) спиральной

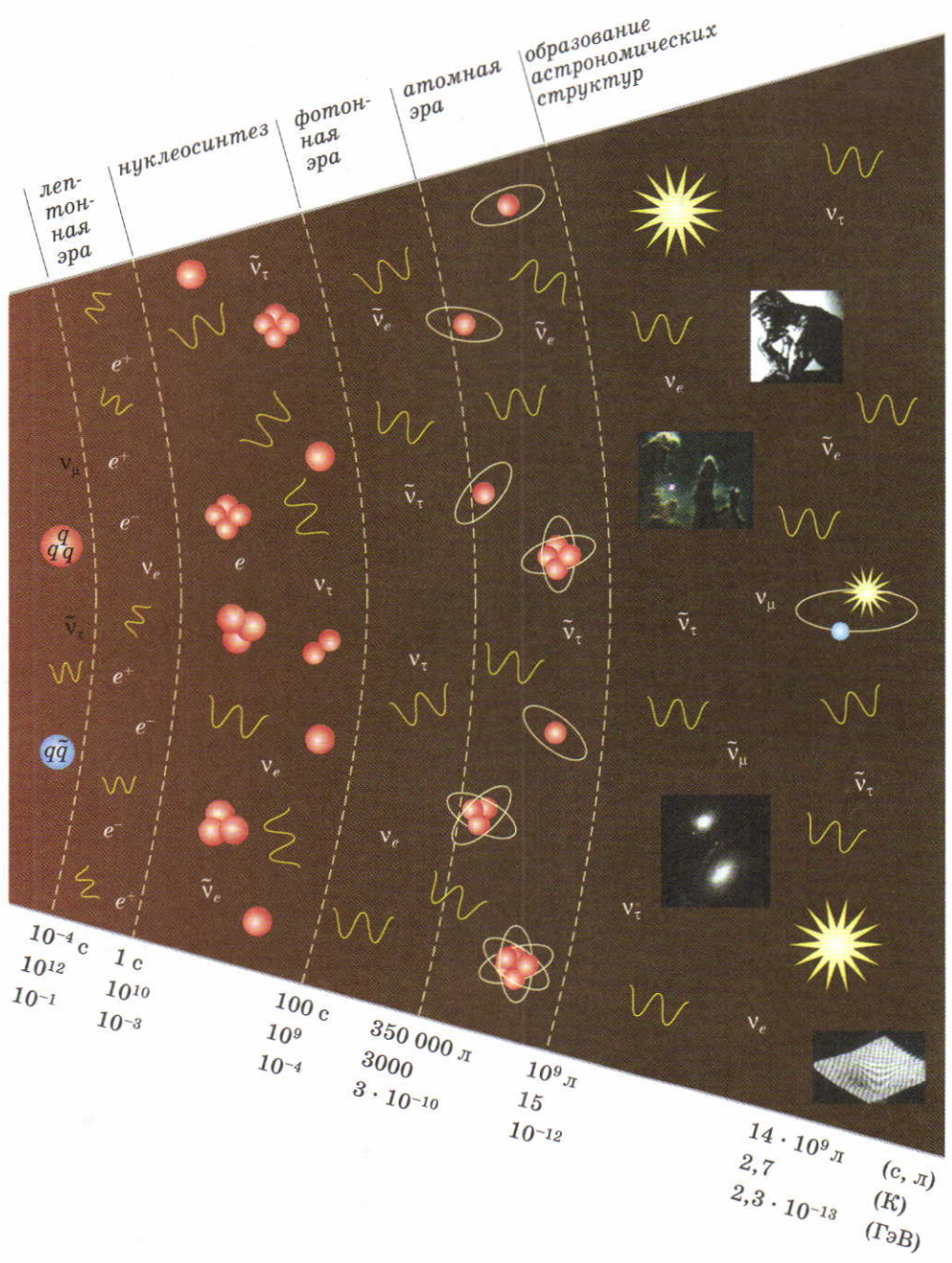
## XXV

Ядро предсверхновой звезды.  
Процентный состав химических  
элементов примерно такой же,  
как на Земле













## ▲ XXIV

*Крабовидная туманность как результат взрыва сверхновой*

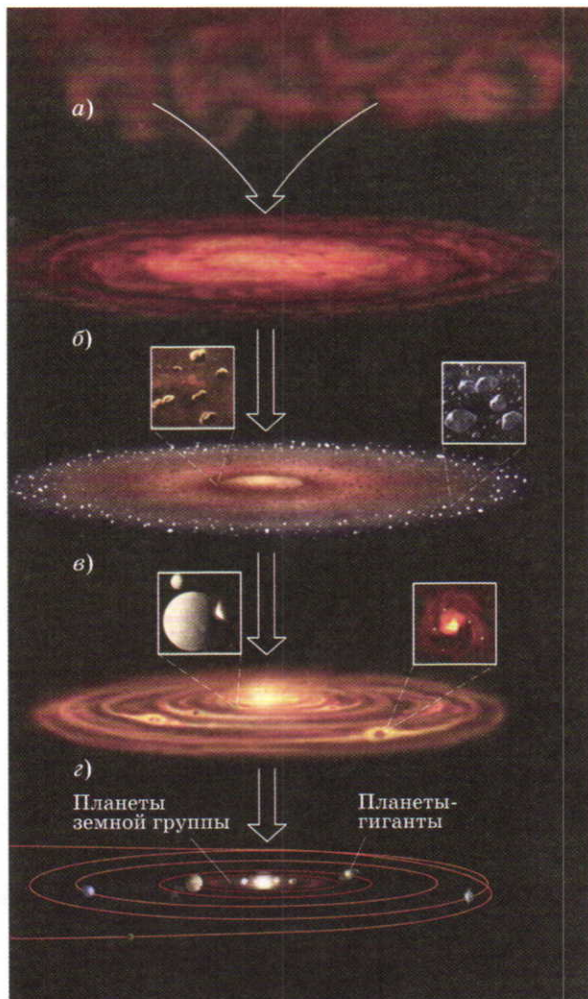


## ▲ XXVI

*Газопылевые диски, сопровождающие рождение новых звёзд в созвездии Ориона. У половины звёзд возможно образование планетарных систем*

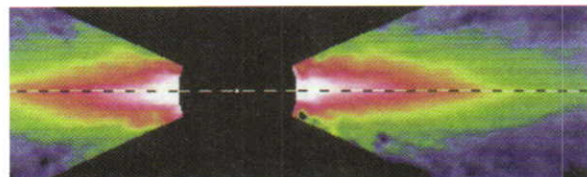
## ▶ XXVIII

*Газопылевой диск у звезды β Пикторис (фотография с телескопа Хаббла). В центральной области находится яркая звезда и ближайшая к ней планета*



## ▲ XXVII

*Процесс образования Солнечной системы*



Протоны и нейтроны состоят из кварков, но выделить кварки нельзя. Свободные кварки не наблюдаемы. Это принципиально ограничивает бесконечное дробление структуры 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). На рисунке XVI на цветной вклейке (с. 385) 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.

Соответствующие пары кварков и лептонов образуют три поколения фундаментальных частиц (табл. I на цветной вклейке, с. 384). Все стабильные структуры окружающего нас сравнительно низкотемпературного мира состоят из фундаментальных частиц первого поколения: двух стабильных лептонов (электрона и нейтрино) и двух кварков (*u* и *d*). При более высоких температурах и больших энергиях существуют второе и третье поколения нестабильных частиц, которые рождались на ранних этапах возникновения горячей Вселенной. В настоящее время такие частицы возникают в результате сильных и слабых взаимодействий в мощных ускорителях заряженных частиц. Как шутят физики, горячая Вселенная являлась гигантским ускорителем для бедняков, подчёркивая



факт огромных расходов на строительство мощных современных ускорителей заряженных 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. 385).

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. XVII, *a* на цветной вклейке, с. 385). 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. XVII, *b* на цветной вклейке, с. 385). Обмениваясь глюонами, кварки как бы обмениваются местами. Таким образом происходит, например, взаимодействие кварков в нейтроне (рис. XVIII, *a* на цветной вклейке, с. 385). Излучение красным кварком глюона, переносящего красно-антисиний заряд, приводит к цветовому обмену кварков. Процесс цветового обмена кварков изображён на диаграмме Фейнмана (рис. XVIII, *b* на цветной вклейке, с. 385).

*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. XIX на цветной вклейке, с. 385). *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 — суперсиммет-

рии, или супергравитации. Новые подходы позволяют глубже понять не только природу фундаментальных частиц, но и природу пространства и времени.

## ВОПРОСЫ

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? Чем отличаются три поколения фундаментальных частиц?
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)?

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Элементарная частица** — микроробъект, 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.
- **Закон сохранения лептонного заряда:** *сумма лептонных зарядов*



до и после взаимодействия сохраняется.

- **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  $\pm 2/3e, \pm 1/3e$  и дробный барионный заряд  $\pm 1/3$ .
- **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 1, переносчик сильного взаимодействия. Всего 8 глюонов (6 из них переносят цветовой заряд, а 2 бесцветны). Полное число переносчиков фундаментальных взаимодействий — бозонов — равно 13.



## Эволюция Вселенной

### § 94. Структура Вселенной, её расширение

**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 ( $1 \text{ св. г.} = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \times 3600 = 9,46 \cdot 10^{15} \approx 10^{16}$  (м)).

Изучение мегаструктур будет проводиться нами методами *астрофизики*.

---

**Астрофизика — раздел астрономии, изучающий физические свойства астрономических объектов.**

---

Особенности эволюции объектов во Вселенной являются предметом изучения *космологии* (от греч. *κοσμολογία* — изучение мира). *Космология* — теоретическая астрофизика мегамишталов, изучающая строение и эволюцию Вселенной как целого.

Охарактеризуем сначала особенности распределения в пространстве астрономических объектов. В таблице 18 приведены средние размеры



неоднородностей пространственного распределения объектов — основных астрономических структур — в порядке возрастания их размера.

Таблица 18

## Средний размер астрономических структур

Астрономическая структура	Планетная система	Ближайшие звёзды	Звёздное скопление	Галактика	Скопление галактик	Сверхскопления галактик	Наблюдаемая Вселенная
Средний размер, св. лет	1	10	100	100 000	10 млн	100 млн	14 млрд

На рисунке 286 показано пространственное расположение 22 ближайших к Солнечной системе звёзд. Скопление звёзд, расположенных на расстоянии не более 250 св. лет от Солнца, изображено на рисунке 287.

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  $10^9/10^{18} = 10^{-9}$  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 — Млечный Путь, совершает один оборот вокруг него за период  $T = 230$  млн лет (рис. 288). По этим данным можно оценить массу  $M_G$  галактики и примерное число  $N$  звёзд в ней. Второй закон Ньютона для Солнца массой  $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$  кг имеет вид

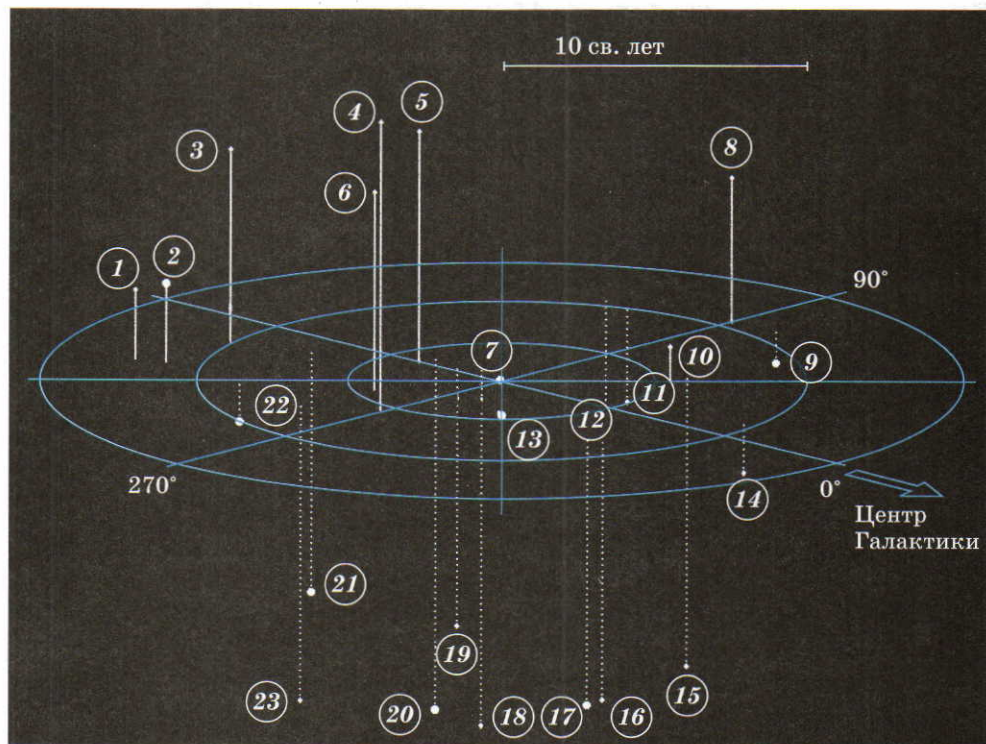
$$M_\odot \frac{4\pi^2}{T^2} r = G \frac{M_\odot M_G}{r^2}. \quad (248)$$

Следовательно,

$$M_G = 4\pi^2 \frac{r^3}{GT^2} = 2 \cdot 10^{41} \text{ кг.}$$

Тогда примерное число звёзд в Галактике оказывается порядка

$$N = \frac{M_G}{M_\odot} = 10^{11}.$$



## ▲ 286

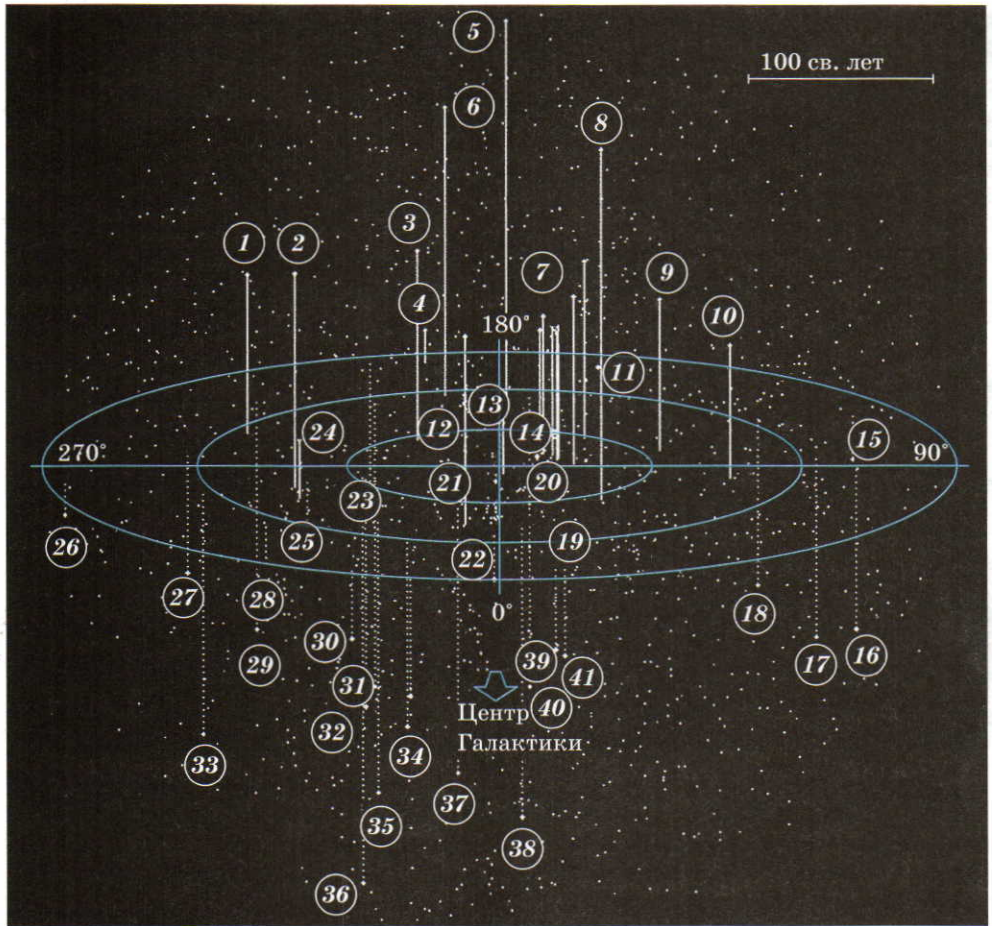
*Пространственное расположение звёзд, ближайших к Солнцу:*

- 1 — звезда Лейтена; 2 — Процион; 3 — G51-15; 4 — Росса 128;  
 5 — Лаланд 21185; 6 — Вольф 359; 7 — Солнце; 8 — Струве 2398;  
 9 — Лебедь 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 Эридан; 22 — Сириус; 23 — L372-58

Местная группа галактик (скопление галактик), включающая Млечный Путь, насчитывает около сорока ближайших галактик (рис. 289). 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. 289), перемещающегося в направлении ближайшего сверхскопления со скоростью 400 км/с.

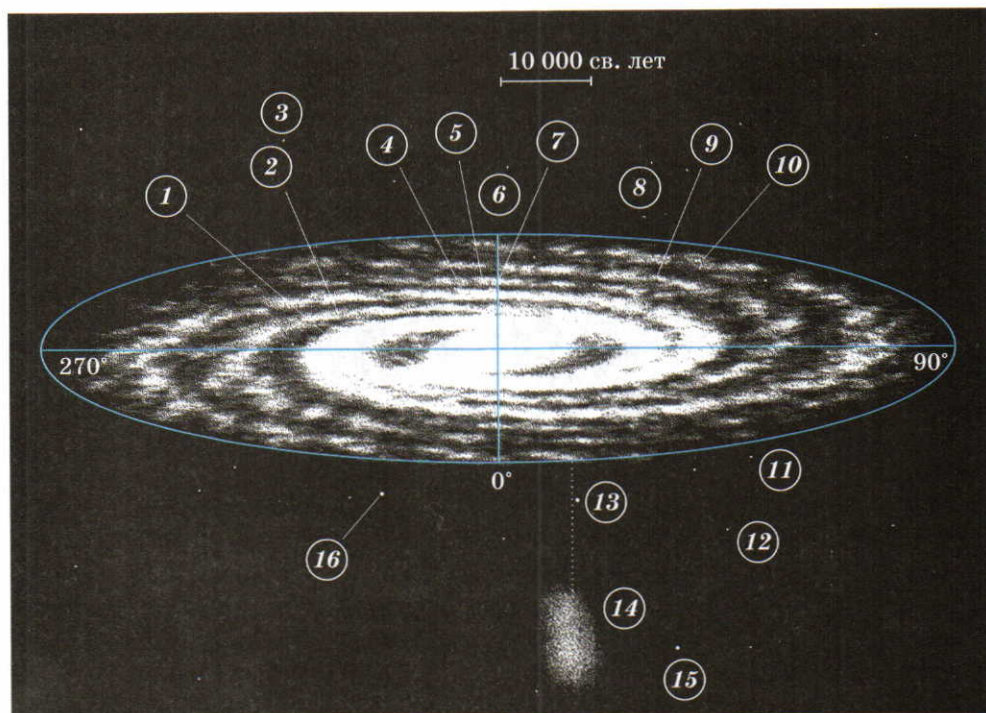




## ▲ 287

*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 —  $\alpha$  Жерввенника; 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



## ▲ 288

*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

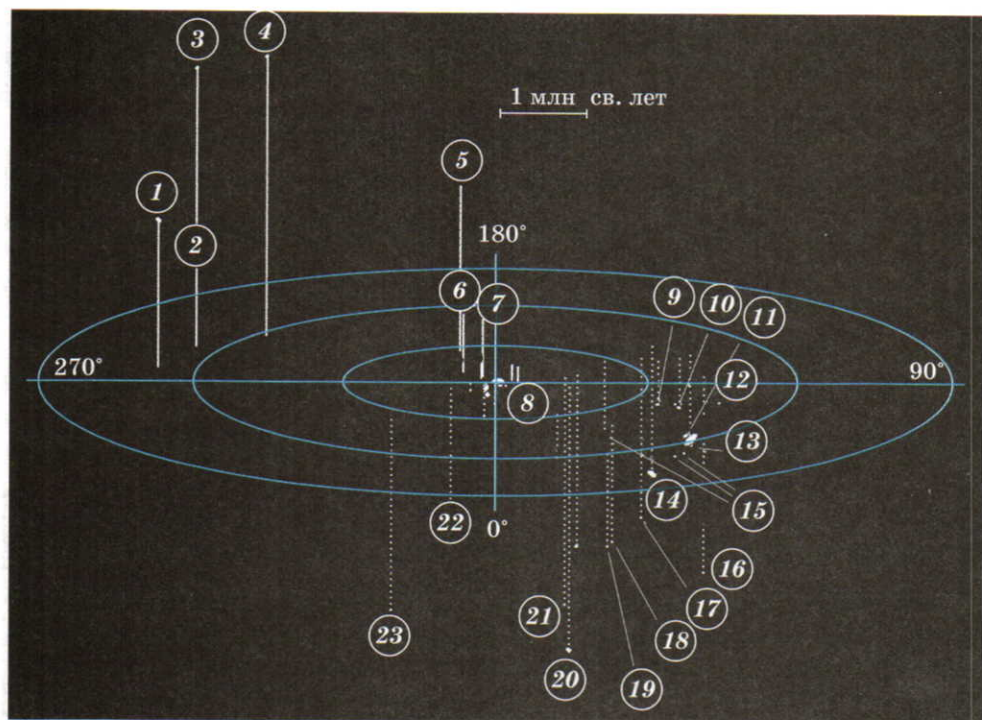
Сверхскопления галактик, наиболее удалённые от сверхскопления Девы, наблюдаются на расстоянии порядка 14 млрд св. лет (рис. 288), определяющем видимый размер Вселенной.

Таково пространственное распределение астрономических объектов во Вселенной.

**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 с помощью телескопа диаметром 2,5 м характер движения 18 галактик, получил неожиданный результат. Галактики разбегаются от Земли, и скорость  $v$





### ▲ 289

Местная группа галактик:

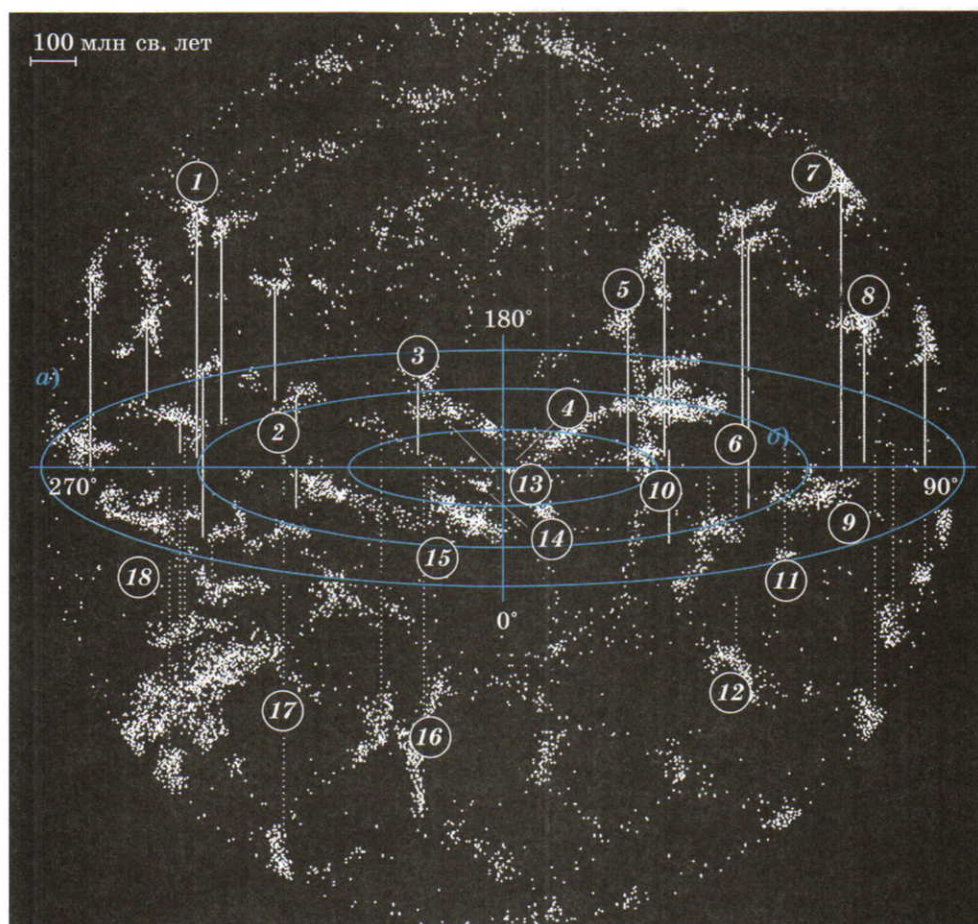
1 — NGC 3109; 2 — Насос (карликовая); 3 — Секстант А; 4 — Секстант В; 5 — А Льва; 6 — I Льва; 7 — II Льва; 8 — Млечный Путь; 9 — NGC 185; 10 — NGC 147; 11 — NGC 205; 12 — IC 10; 13 — галактика Андромеды; 14 — галактика Треугольника; 15 — I, II и III Андромеды; 16 — Пегас (карликовая); 17 — LGS 3; 18 — Водолей (карликовая); 19 — Стрелец (карликовая неправильная); 20 — WLM; 21 — Кит (карликовая); 22 — Феникс (карликовая); 23 — Тукан (карликовая)

этого убегания пропорциональна расстоянию  $r$  до них. Согласно закону Хаббла,

$$v = H_0 r, \quad (249)$$

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 пк = 3,26 св. г. =  $3,09 \cdot 10^{16} \text{ м}$ .



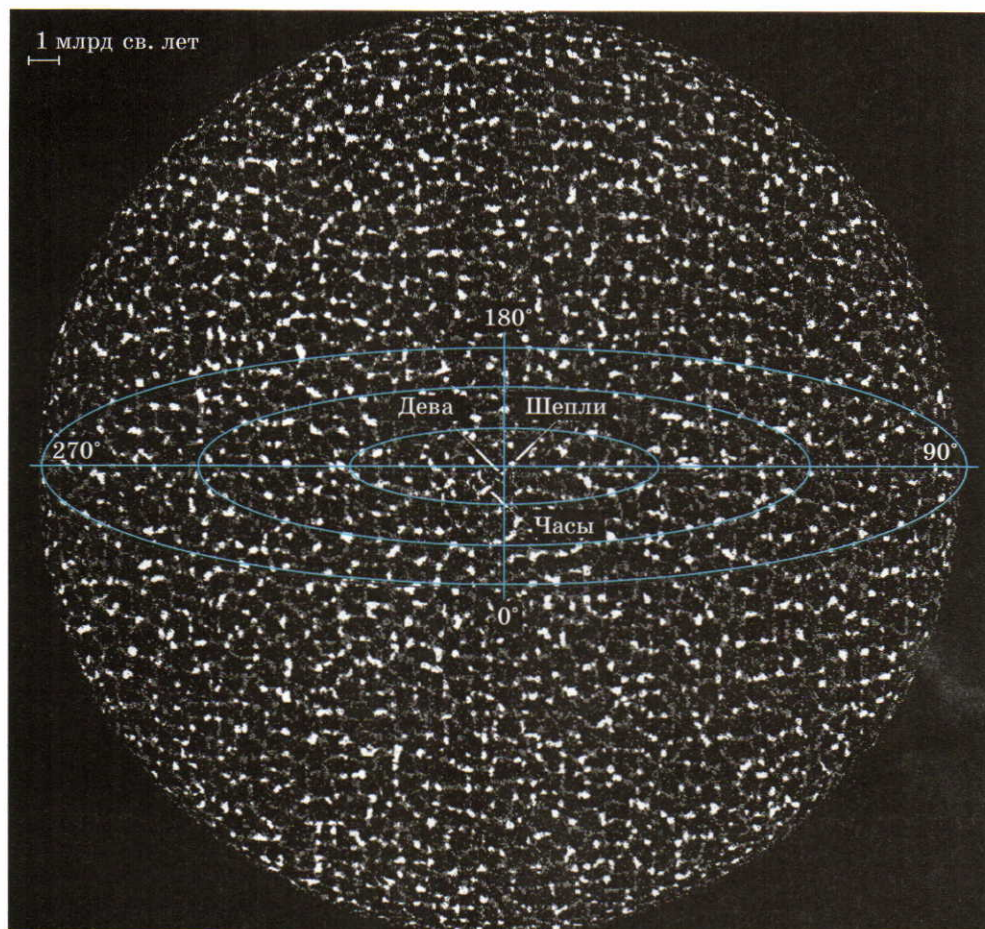
## ▲ 290

*Сверхскопления галактик в созвездиях:*

1 — Козерога; 2 — Скульптора; 3 — Павлина—Индуса; 4 — Центавра;  
 5 — Геркулеса; 6 — Шепли; 7 — Северной Короны; 8 — Волопаса; 9 — Большой Медведицы; 10 — Волосы; 11 — Льва; 12 — Секстанта; 13 — Девы; 14 — Гидры;  
 15 — Персея—Рыб; 16 — Голубя; 17 — Часов; 18 — Рыб—Кита

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. В астрофизике скорость измеряют по эффекту Доплера (см. Ф-10, § 75).





## ▲ 291

### *Видимая Вселенная*

Известная спектральная линия излучения неподвижного атома с частотой  $\nu_0$  сравнивается с частотой  $\nu$ , регистрируемой приёмником от удаляющегося со скоростью  $v$  источника. Если скорость удаления источника от приёмника много меньше скорости света (см. Ф-10, формула (216)), то

$$\nu = \nu_0 \left( 1 - \frac{v}{c} \right). \quad (250)$$

Соответственно для длины волны  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  (при этом  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ ) получаем при  $v \ll c$

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \right). \quad (251)$$

Возникает сдвиг спектра излучения в сторону больших длин волн (в красную область), называемый *красным смещением* (рис. XX на цветной вклейке, с. 385). Красное смещение спектральных линий возрастает при увеличении скорости движения источника излучения. Как видно из формулы (250), красное смещение пропорционально скорости источника относительно приёмника.

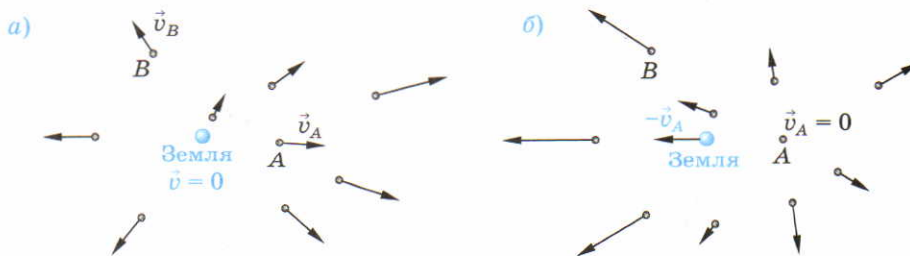
Таким образом, скорость галактики находится из формулы (251):

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (252)$$

Следствием закона Хаббла является разбегание галактик, или расширение Вселенной, наблюдаемое не только с Земли, но и из любой другой точки Вселенной. На рисунке 292, а показано движение галактик относительно Земли, а на рисунке 292, б — относительно соседней галактики А.

В данный момент времени скорости разбегания галактик пропорциональны расстоянию от наблюдателя во всех направлениях для наблюдателей в любой галактике. Это означает, что на больших масштабах (порядка 100 млн св. лет) Вселенная однородна и изотропна (рис. 293). Вселенная однородна, если в произвольных одинаковых объёмах содержится равное число галактик. Вселенная изотропна, если в разных направлениях находится одинаковое число галактик.

Если закон Хаббла, т. е. пропорциональность скорости разбегания галактик расстоянию до них, выполняется при наблюдении с Земли, то он



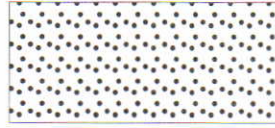
## ▲ 292

Наблюдение расширения Вселенной из любой точки пространства:  
а) из Млечного Пути; б) из любой галактики





а)



б)



в)

## ▲ 293

Двумерное пространство: а) однородное, изотропное; б) однородное, анизотропное; в) неоднородное, анизотропное

также выполняется и при наблюдении из произвольной галактики (рис. 294). Можно сказать, что закон Хаббла является следствием однородности и изотропности Вселенной.

Разлёт галактик означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению, значит, в прошлом Вселенная была не только более плотной, но и более горячей, чем теперь.

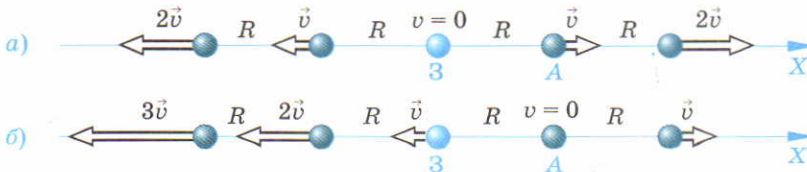
Закон Хаббла позволяет оценить время, которое прошло с момента начала расширения Вселенной:

$$t = \frac{r}{v} = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{70 \cdot \frac{10^3}{10^6 \cdot 3,26 \cdot 3 \cdot 10^8}} \approx 14 \text{ млрд лет.}$$

Это время примерно характеризует возраст Вселенной.

## В О П Р О С Ы

1. Чем обусловлен выбор единиц расстояния в астрофизике и астрономии?
2. Укажите последовательность астрономических структур в порядке возрастания их среднего размера.



## ▲ 294

Закон Хаббла как следствие однородности Вселенной: а) наблюдение с Земли; б) наблюдение из галактики А

3. Как оценить число звёзд в нашей Галактике?
4. Сформулируйте закон Хаббла. Как измеряют скорость галактик?
5. Оцените время расширения Вселенной.

## § 95. Расширяющаяся Вселенная

**Модель Фридмана.** Математическая модель, впервые (до открытия закона Хаббла) предсказавшая теоретически расширение Вселенной, была предложена в 1922 г. российским учёным **Александром Александровичем Фридманом**. В модели Фридмана отдельные галактики представляются как пробные материальные частицы, равномерно распределённые в пространстве. Вселенная рассматривается как совокупность расширяющихся сферических слоёв с центром в точке  $O$ , где находится наблюдатель (рис. 295). Закон сохранения энергии для внешней оболочки массой  $m_0$ , расширяющейся с начальной скоростью  $v$  в поле внутреннего шара массой  $M$  и радиусом  $r$ , был представлен А. Фридманом в виде  $E_k + E_p = E$ :

$$\frac{m_0 v^2}{2} - G \frac{m_0 M}{r} = E, \quad (253)$$

где  $E$  — полная механическая энергия Вселенной, за нуль отсчёта принята потенциальная энергия на бесконечности.

Эволюция Вселенной определяется балансом между её кинетической и потенциальной энергиями. Характер её расширения зависит от величины и знака полной энергии  $E$ .

1) При  $E = 0$

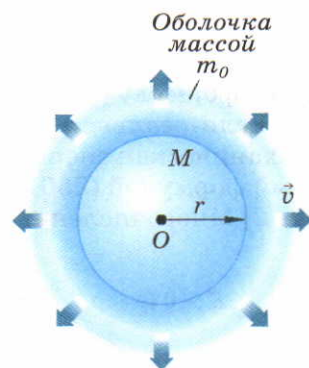
$$v^2 = 2GM/r. \quad (254)$$

Напомним, что последнее равенство определяет вторую космическую скорость  $v_{II}$  частицы, движущейся в гравитационном поле тела массой  $M$  по параболической траектории. Чтобы найти закон расширения  $r(t)$ , учтём, что  $v = r'$ . Тогда уравнение

$$(r')^2 = 2GM/r \quad (255)$$

имеет решение

$$r = At^{2/3}, \text{ где } A = (4,5GM)^{1/3}. \quad (256)$$



### ▲ 295

*Модель Фридмана. Вселенная как совокупность расширяющихся сферических оболочек*



В этом легко убедиться подстановкой (256) в (255). Видно, что радиус Вселенной возрастает с течением времени (рис. 296, кривая 1).

Для однородной и изотропной Вселенной  $v = H_0 r$ . Учитывая, что масса  $M$  Вселенной связана с её плотностью  $\rho$  ( $M = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$ ), и подставляя  $v$  и  $M$  в (254), получаем

$$H_0^2 r^2 = 2G \frac{\rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3}{r}.$$

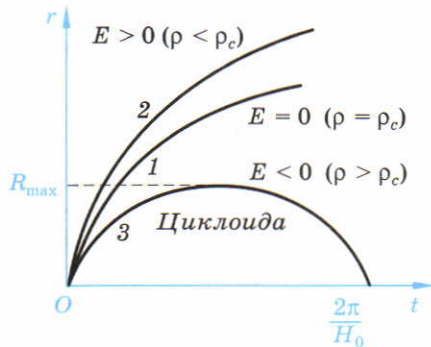
Тогда

$$\rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_c, \quad (257)$$

где  $\rho_c$  — критическая плотность Вселенной. Подстановка значений  $H_0$  и  $G$  в формулу (257) даёт  $\rho_c = 10^{-26}$  кг/м<sup>3</sup>.

Если реальная плотность  $\rho$  Вселенной равна критической  $\rho_c$ , полная механическая энергия  $E = 0$  и реализуется закон расширения, описываемый формулой (256).

2) Многочисленные оценки плотности видимого вещества во Вселенной дают величину  $\rho \approx 0,1\rho_c$ .



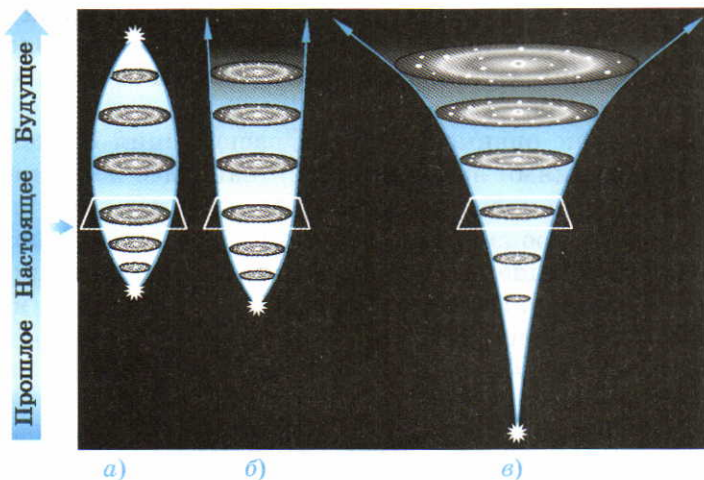
## ▲ 296

Изменение радиуса Вселенной со временем:  $E > 0$  ( $\rho < \rho_c$ ) — открытое гиперболическое пространство;  $E = 0$  ( $\rho = \rho_c$ ) — открытое плоское пространство;  $E < 0$  ( $\rho > \rho_c$ ) — замкнутое сферическое пространство

Если  $\rho < \rho_c$ , из формулы (253) следует, что  $E > 0$ , так как  $E_k > |E_p|$ . В этом случае расширение Вселенной происходит быстрее (рис. 296, кривая 2), чем в случае  $E = 0$ . Согласно механической аналогии, это означает, что частица движется в гравитационном поле по гиперболической траектории со скоростью, большей второй космической:  $v > v_{II}$ .

3) Многочисленные астрономические наблюдения показывают, что объяснение движения отдельных звёзд и звёздных скоплений оказывается невозможным без учёта дополнительной, невидимой, скрытой массы.

Физическая природа скрытой массы (тёмного вещества) пока однозначно не выяснена. Существуют предположения о барионных объектах в отдалённых сверхскоплениях галактик, ненаблю-



297

Расширение Вселенной при различных возможных плотностях:

- а)  $\rho > \rho_c$ ; б)  $\rho = \rho_c$ ;
- в)  $\rho < \rho_c$

даемых чёрных дырах, наличии массы покоя у нейтрино. От величины скрытой массы зависит сценарий дальнейшего развития Вселенной.

Если результирующая плотность  $\rho$  Вселенной превышает (с учётом скрытой массы) критическую плотность  $\rho_c$ , т. е.  $\rho > \rho_c$ , то кинетическая энергия  $E_k < |E_p|$ , а  $E < 0$ .

Подобно тому как камень, брошенный вверх, возвращается на Землю, Вселенная будет расширяться до некоторого максимального радиуса, примерно вдвое большего, чем наблюдается теперь, а затем сжиматься до первоначального состояния (рис. 296, кривая 3).

На рисунке 297 условно показаны три возможных варианта эволюции Вселенной в зависимости от её реальной плотности.

ВОПРОСЫ

1. Поясните физический смысл уравнения Фридмана.
2. Что такое критическая плотность Вселенной? Какой тип пространства соответствует случаю  $\rho = \rho_c$ ?
3. Как искривление пространства влияет на ход световых лучей?
4. Приведите пример аналогии искривлённого пространства.
5. Какое пространство возникает в случаях  $\rho > \rho_c$ ,  $\rho < \rho_c$ ?

**§ 96. Космологическая модель ранней Вселенной. Эра излучения**

**Большой взрыв.** В конце 40-х гг. XX в. американский физик русского происхождения *Георгий Антонович Гамов* предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого взрыва. Ог-



ромная температура во время взрыва и последующего расширения Вселенной способствовала термоядерному синтезу лёгких химических элементов, таких как водород и гелий. Остальные элементы были синтезированы в процессе образования звёзд.

Согласно приведённым выше оценкам времени расширения Вселенной, согласующимся с измерениями времени жизни наиболее долгоживущих изотопов, Большой взрыв произошёл около 14 млрд лет тому назад. Предполагается, что взрыв произошёл в точечном объёме, который и был всей Вселенной. Ничего больше не существовало. В ходе эволюции Вселенной увеличивался её размер. Каким же он был вначале, при каких температурах начиналось расширение Вселенной, какие плотности соответствовали начальной фазе? Откуда взялась чудовищная энергия, затраченная на образование Вселенной?

Согласно современным представлениям, в начальной фазе расширения Вселенной (в планковскую эпоху) все четыре фундаментальных взаимодействия были неразличимы и ненаблюдаемы на масштабах, больших радиуса Шварцшильда (порядка  $GM_p/c^2$ , где  $M_p$  — масса частицы — переносчицы взаимодействия (называемой *планковской массой*, см. Ф-10, § 42)). Радиус взаимодействия определяется комптоновской длиной волны  $\frac{\hbar}{M_p c}$ .

Приравнивая комптоновскую длину волны к радиусу Шварцшильда

$$\frac{\hbar}{M_p c} = \frac{GM_p}{c^2},$$

получаем *планковскую массу частицы*, квантовой чёрной дыры, имеющей размер, сопоставимый с размером Вселенной в тот момент времени:

$$M_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ кг.}$$

Характерный размер  $R_p$  минимальной области взаимодействия (планковская длина) определяется комптоновской длиной волны:

$$R_p = \frac{\hbar}{M_p c} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ м.}$$

Время распространения взаимодействия

$$t_p = \frac{R_p}{c} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

Плотность вещества в этот момент времени

$$\rho_p \approx \frac{M_p}{R_p^3} \approx 10^{97} \text{ кг/м}^3.$$

Энергия покоя  $E_p$  частицы массой  $M_p$

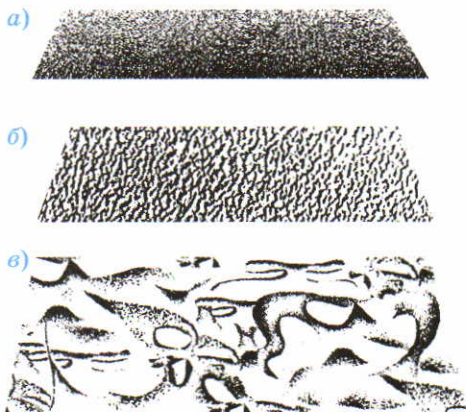
$$E_p = M_p c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 10^{19} \text{ ГэВ.}$$

Такой энергии соответствует температура ( $1 \text{ эВ} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ К}$ )  $T_p \approx 10^{32} \text{ К}$ .

**Космологическая модель Большого взрыва.** Современная космология выделяет несколько характерных периодов эволюции Вселенной (рис. XXI на цветной вклейке, с. 385). Обсудим особенности развития Вселенной в каждый из этих периодов.

*Планковская эпоха.* Сначала существовал только физический вакуум. В отличие от пустого пространства, как мы его себе представляем, в физическом вакууме постоянно присутствуют квантовые флуктуации поля. В этот период все взаимодействия неразличимы.

Существование полностью симметричного пространства возможно только при очень высоких температурах (см. табл. 19). В планковскую эпоху пространство принципиально отличалось от пространства современной эпохи. Если в масштабах, доступных современной физике, порядка  $10^{-18} \text{ м}$  (радиус действия слабого взаимодействия) пространство-время считать гладким (рис. 298, а), то уже на расстояниях порядка  $10^{-32} \text{ м}$  начинают появляться неровности — флуктуации. На плоскости, изображающей четырёхмерное пространство-время, возникает заметный рельеф (рис. 298, б). На масштабах порядка планковской длины  $10^{-35} \text{ м}$  внутренняя структура пространства-времени сильно флуктуирует (рис. 298, в). Это напоминает фотографии моря, сделанные с разной высоты. С большой высоты незаметны волны. Ниже они становятся различимыми, с ещё меньшей высоты видна их структура и форма, брызги, пена.



◀ 298

*Квантовый вакуум пространства-времени на различных масштабах: а)  $10^{-18} \text{ м}$ ; б)  $10^{-32} \text{ м}$ ; в)  $10^{-35} \text{ м}$*



Таблица 19

## Основные периоды эволюции Вселенной

<i>Период</i>	<i>Возраст Вселенной</i>	<i>Температура, К</i>
Планковская эпоха (квантовая гравитация)	$0-10^{-43}$ с	$10^{32}$
Эпоха Великого объединения	$(10^{-43}-10^{-36})$ с	$10^{32}-10^{28}$
Инфляционная фаза	$(10^{-36}-10^{-34})$ с	$10^{28}-10^{27}$
Электрослабая эпоха	$(10^{-34}-10^{-10})$ с	$10^{27}-10^{15}$
Эра кварков	$(10^{-10}-10^{-6})$ с	$10^{15}-10^{13}$
Адронная эра	$(10^{-6}-10^{-4})$ с	$10^{13}-10^{12}$
Лептонная эра	$(10^{-4}-1)$ с	$10^{12}-10^{10}$
Эра нуклеосинтеза	$(1-200)$ с	$10^{10}-10^9$
Фотонная эра	200 с — 350 000 лет	$10^9-3 \cdot 10^3$
Атомная эра	350 000 лет — 100 млн лет	$3 \cdot 10^3-200$
Образование звёзд	100 млн лет — 500 млн лет	200—3
Образование галактик	500 млн лет — 5 млрд лет	
Образование Солнечной системы	10 млрд — 11 млрд лет	
Возникновение жизни на Земле	10,7 млрд лет	

В этот период средняя энергия квантовых флуктуаций вакуума, отличная от нуля, оказывается достаточной для рождения виртуальных частиц и античастиц, например электронов и позитронов. Подобные пары частиц поляризуют вакуум, нарушая его симметрию во всех направлениях. Так, воздействие виртуальной пары частиц на электрон атома водорода оказывается вполне реальным. Оно приводит к тому, что спектр излучения атома водорода, наблюдаемый в эксперименте, отличается от спектра, предсказываемого теорией Бора.

Вначале время было неотделимо от пространства. Нарушение симметрии создало прецедент необратимости событий, приводя к разделению прошлого, настоящего, будущего. Поэтому выражение «до Большого взрыва» не имеет смысла.

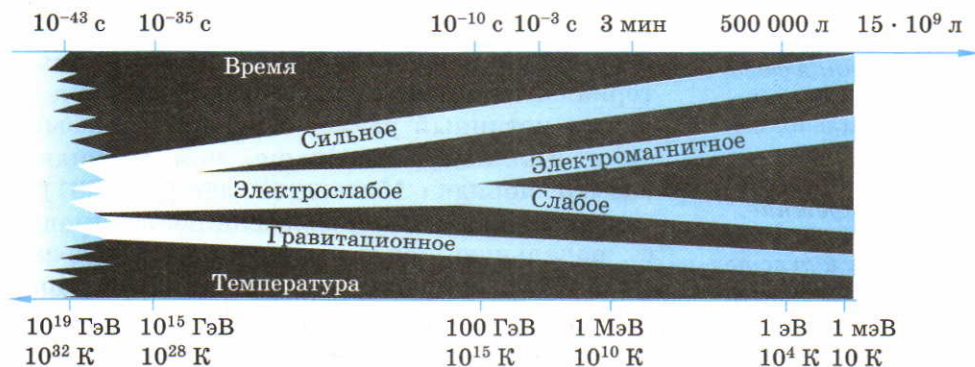
Теоретическая модель планковской эпохи в настоящее время не завершена.

*Эпоха Великого объединения.* В период времени от  $10^{-43}$  до  $10^{-36}$  с нарушается симметрия четырёх взаимодействий: гравитационное взаимодействие становится независимым от остальных в диапазоне температур от  $10^{32}$  до  $10^{28}$  К (рис. 299). Три остальных взаимодействия — сильное, слабое и электромагнитное — при этих температурах рассматриваются теорией Великого объединения как единое (сильное и электрослабое).

Физический смысл этого нарушения симметрии поможет понять аналогия с замерзанием воды. При температуре, превышающей температуру кристаллизации, вероятность обнаружить молекулы воды в любой точке внутри жидкости одна и та же. Образующиеся при понижении температуры кристаллы льда имеют неоднородную кристаллическую структуру: прежняя симметрия нарушается.

В полях высоких энергий во Вселенной постоянно рождаются и аннигилируют с излучением пары кварк — антикварк, лептон — антилептон. При таких огромных температурах различие между кварками и лептонами практически отсутствует. Среди фундаментальных частиц присутствуют также переносчики взаимодействий.

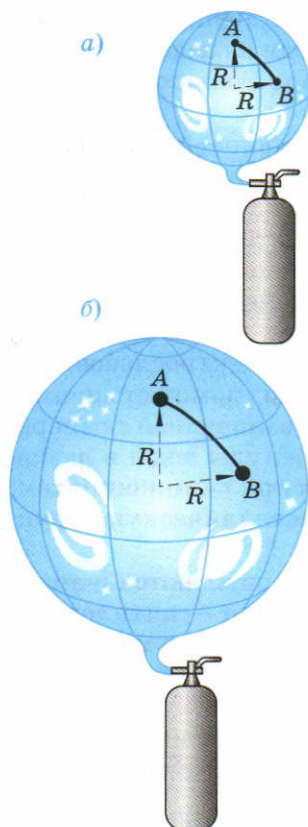
*Инфляционная фаза.* К моменту времени  $t_{\text{и}} = 10^{-36}$  с от начала Большого взрыва радиус Вселенной стал равным  $r = ct_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-28}$  м, температура Вселенной в результате расширения снизилась.



▲ 299

Разделение взаимодействий при охлаждении Вселенной. Возраст Вселенной





### 300 ▲

*Инфляционная фаза расширения Вселенной: а) начальное состояние; б) конечное состояние. Координаты точек прежние, но радиус резко возрос, так же как и расстояние между точками*

тверждает предположение о том, что плотность Вселенной близка к критической.

*Электрослабая эпоха.* В момент времени  $t = 10^{-34}$  с инфляция заканчивается, но расширение и охлаждение Вселенной продолжают

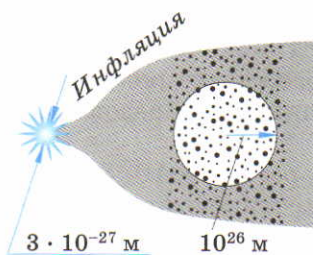
Космологические уравнения, включающие уравнение Фридмана, позволяют оценить зависимость температуры  $T$  (в К) Вселенной от времени  $t$  (в с):

$$T = \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}. \quad (258)$$

В период от  $10^{-36}$  до  $10^{-34}$  с температура Вселенной упала с  $10^{28}$  до  $10^{27}$  К. В результате спонтанного нарушения симметрии пространства-времени в этом диапазоне температур сильное взаимодействие отделяется от электрослабого (электромагнитного и слабого) (см. рис. 299). Энергия, выделяющаяся при этом, приводит к резкому экспоненциальному росту Вселенной.

Каждые  $10^{-36}$  с размер Вселенной возрастал в  $e = 2,718$  раза. Учитывая, что сто таких интервалов содержится в  $10^{-34}$  с, в период инфляции размер должен возрасти в  $e^{100}$  раз, или в  $10^{\lg e \cdot 100} = 10^{0,43 \cdot 100} = 10^{43}$  раз. Таким образом, за  $10^{-34}$  с размер Вселенной вырос до  $3 \cdot 10^{17}$  м, превысив диаметр Солнечной системы.

Расширение пространства происходило со скоростью, большей скорости света, но это не означает, что нарушаются положения специальной теории относительности. С такой скоростью расширяется пространство, а не движутся материальные объекты (рис. 300). Благодаря инфляции истинный размер Вселенной оказывается в миллион раз больше, чем её видимый размер, порядка 15 млрд св. лет (рис. 301). Гигантское инфляционное расширение уменьшает начальную кривизну пространства-времени (рис. 302), приближая окончательный вариант пространства к евклидовому. Это частично под-



### ▲ 301

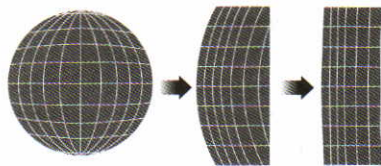
*Инфляционная фаза. Истинные размеры Вселенной значительно превышают видимый горизонт  $10^{26}$  м*

Разделение электромагнитного и слабого взаимодействий начинается при температуре  $T_c \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ К} \approx 200 \text{ ГэВ}$  и заканчивается к моменту времени  $10^{-10} \text{ с}$  (см. рис. 299). При температурах, больших критической, слабое и электромагнитное взаимодействия подобны друг другу. Например, оба подчиняются закону Кулона.

*Эра кварков.* Смесь кварков — антикварков, лептонов и антилептонов, частиц — переносчиков взаимодействий заполняет Вселенную в течение последних двух эпох: инфляционной и электрослабой (от  $10^{-36}$  до  $10^{-10} \text{ с}$ ).

Такой же состав Вселенной остаётся и от  $10^{-10}$  до  $10^{-6} \text{ с}$ , т. е. в интервале температур от  $10^{15}$  до  $10^{13} \text{ К}$ . При этом все четыре фундаментальных взаимодействия分离лись. Особенность взаимодействия кварков состоит в том, что сила их притяжения растёт с расстоянием (как сила упругости в растянутой пружине). Поэтому попытки их разделить при высоких энергиях не приводили к желаемому результату. Подобно тому, как, пытаясь неограниченно растянуть пружину, мы разрываем её на две пружины, при высоких энергиях рождается пара кварк — антикварк. В плотной ранней Вселенной кварки находились на очень малых расстояниях друг от друга и, не чувствуя сил взаимодействия со стороны друг друга, вели себя как свободные частицы.

*Адронная эра.* Каждый свободный кварк в диапазоне температур  $10^{13}$ — $10^{12} \text{ К}$  либо объединяется с антикварком (в мезон или антимезон), либо находит себе место в барионе (или антибарионе). Из-за того что Вселенная, расширяясь, продолжает охлаждаться, адроны (барионы и мезоны) не могут распасться на кварки. В этот период в состав Вселенной входят сотни разновидностей адронов (отсюда название фазы развития Все-



### ▲ 302

*Приближение реального пространства к евклидовому в результате инфляции*



ленной), их античастиц, лептоны и антилептоны, а также переносчики всех видов взаимодействий. Частицы и античастицы постоянно аннигилируют, а выделяющаяся при этом энергия способствует рождению частиц. В состоянии равновесия процессы аннигиляции и образования частиц уравнивают друг друга.

*Лептонная эра* ( $10^{-4}$ —1 с). Как отмечалось ранее (Ф-10, § 46), реакция рождения пары частица — античастица имеет пороговый характер, т. е. происходит тогда, когда энергия кванта электромагнитного излучения оказывается больше, чем энергия покоя рождённых частиц:  $h\nu \geq mc^2$ . Для Вселенной, имеющей температуру  $T$ , энергия кванта теплового излучения примерно равна  $kT$  (см. Ф-11, § 73). Это означает, что рождение пары происходит лишь при условии

$$kT \geq mc^2 = kT_a, \quad (259)$$

где через  $T_a$  мы обозначим пороговую температуру рождения пары частица — античастица.

Из-за охлаждения Вселенной при расширении рождение пары уже невозможно, если  $T < T_a$ . В то же время в результате реакции аннигиляции соответствующая пара частица — античастица исчезает.

Как видно из формулы (259), чем больше энергия покоя частицы, тем при большей температуре  $T_a$  они аннигилируют. Тяжёлые таоны  $\tau$  аннигилировали со своими античастицами  $\tau^+$  ещё в эру кварков при  $T_a \approx 2 \cdot 10^{13}$  К. Сопутствующие им нейтрино  $\nu_\tau$ ,  $\bar{\nu}_\tau$  сохранились до настоящего времени. При температуре  $1,1 \cdot 10^{13}$  К исчезают основные составляющие современного вещества во Вселенной: протоны, нейтроны (и их античастицы). Если бы число частиц в точности равнялось числу античастиц, материя во Вселенной существовала бы лишь в виде излучения.

Наличие в современном мире вещества, включающего в свой состав протоны и нейтроны, можно объяснить лишь незначительным преобладанием вещества (протонов, нейтронов, электронов) над антивеществом (антипротонами, антинейтронами, позитронами) в самой ранней фазе Большого взрыва. Относительный перевес вещества над антивеществом в ранней Вселенной можно примерно оценить. Каждая аннигиляция нуклона с антинуклоном давала два фотона, т. е. число оставшихся фотонов равно числу частиц и античастиц. Экспериментальное сравнение числа фотонов  $N_\phi$  и барионов  $N_b$  в современной Вселенной показало, что

$$\frac{N_b}{N_\phi} \approx 10^{-9}.$$

Это означает, что перевес вещества над антивеществом в ранней Вселенной составлял примерно  $10^{-7}\%$  и был вызван, по-видимому, нарушением симметрии при взаимодействиях элементарных частиц между собой, а так же нарушением закона сохранения барионного заряда.

Вблизи момента времени 100 мкс при  $T_a = 1,2 \cdot 10^{12}$  К аннигилировали мюоны  $\mu^-$ ,  $\mu^+$ , оставив во Вселенной соответствующие нейтрино  $\nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ .

Таким образом, из лептонов к концу лептонной эры помимо нейтрино сохранились лишь электроны  $e^-$  и позитроны  $e^+$ , имеющие наименьшую энергию покоя, которая соответствует температуре  $T_a = 0,6 \cdot 10^{10}$  К.

### ВОПРОСЫ

1. Оцените размер  $R_p$  Вселенной в планковскую эпоху.
2. Приведите оценку температуры  $T_p$  Вселенной в планковскую эпоху.
3. Охарактеризуйте эпоху Великого объединения. Укажите состав Вселенной в этот период.
4. Опишите инфляционную фазу эволюции Вселенной, её временной и температурный интервалы.
5. Как изменялся состав Вселенной и её температура от  $10^{-34}$  до 1 с с момента Большого взрыва?

## § 97. Нуклеосинтез в ранней Вселенной

**Доминирование излучения.** После 1 с с момента Большого взрыва температура Вселенной оказывается меньше, чем  $10^{10}$  К (1 МэВ), пороговой температуры для рождения электрон-позитронных пар. Начинается аннигиляция электронов  $e^-$  и позитронов  $e^+$  с испусканием фотонов. Таким образом, в составе Вселенной не осталось антивещества. Вещество представлено протонами, нейтронами, электронами, а излучение — фотонами и нейтрино (рис. XXI на цветной вклейке, с. 385). В этот период эволюции Вселенной энергия излучения значительно превышает энергию вещества. Покажем это. Энергия покоя протона равна 939 МэВ, что соответствует температуре  $10^{13}$  К. Тогда полная энергия  $N_p$  протонов

$$E_p \approx N_p \cdot 10^{13} \text{ К.}$$

Энергия фотона порядка  $kT \approx 10^9$  К. Число же фотонов значительно превышает число протонов. Как отмечалось выше,  $N_\phi \approx N_p \cdot 10^9$ . Тогда полная энергия фотонов

$$N_\phi \cdot E_\phi = N_p \cdot 10^{18} \text{ К} \gg E_p \approx N_p \cdot 10^{13} \text{ К.}$$

**Эра нуклеосинтеза (1—100 с).** Число протонов и нейтронов за счёт быстрого превращения протонов в нейтроны и обратно сначала было примерно одинаково.

Нейтрон рождается при столкновении протона с электроном





Энергия покоя нейтрона больше энергии покоя протона на  $\Delta E = 1,294$  МэВ. Поэтому для реакции (260) требуется дополнительная энергия, т. е. энергия электрона  $E_e$  должна превышать  $\Delta E$ , что реализуется при температурах  $T > 1,5 \cdot 10^{10}$  К.

Протон образуется при спонтанном распаде нейтрона



При расширении Вселенной её температура уменьшается по закону (258). Через три минуты от начала Большого взрыва она оказывается менее 1 млрд К, т. е. в 70 раз больше, чем в центре Солнца.

При такой температуре реакция (260) оказывается невозможной, поэтому число нейтронов не увеличивается, а за счёт реакции распада (261) даже уменьшается. На исходе 225 с с момента Большого взрыва отношение числа нейтронов к числу протонов оказывается 1 : 7. Например, на два нейтрона приходится в среднем 14 протонов.

Одновременное уменьшение числа протонов и нейтронов происходит также при их объединении в дейтрон — ядро дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  (см. Ф-10, с. 222), сопровождающемся испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией  $E_\gamma = 2,22$  МэВ:



При обратной реакции, если энергия кванта  $E_\gamma$  оказывается больше 2,22 МэВ, дейтрон под действием излучения распадается на протон и нейтрон:



В этот момент времени из-за охлаждения Вселенной энергия фотонов оказывается недостаточной для распада (диссоциации) дейтрона (263).

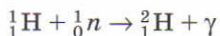
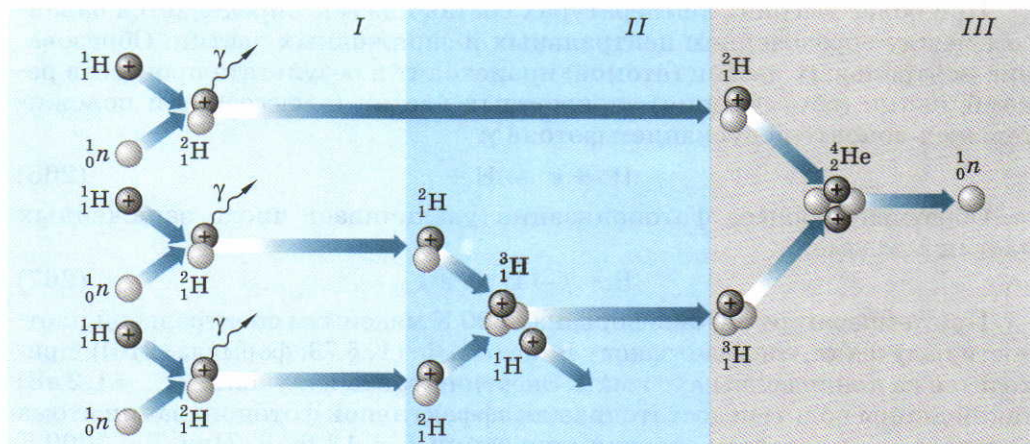
С реакции (262) начинается процесс синтеза ядер — *нуклеосинтез* (рис. 303). Второй этап — процесс взаимодействия двух дейтронов  ${}^2_1\text{H}$  с образованием трития  ${}^3_1\text{H}$  и протона  ${}^1_1\text{H}$  с выделением энергии 4,03 МэВ:



Образование ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$  происходит на третьем этапе — при взаимодействии ядер дейтерия и трития:



В результате этой реакции быстрый нейтрон уносит энергию 17,59 МэВ. При синтезе ядер гелия ( $\alpha$ -частиц) два нейтрона объединяются с двумя протонами. Свободными остаются 12 протонов (рис. 304) — ядра атомов водорода. Таким образом, через 15 мин с момента Большого взрыва вещество во Вселенной (помимо электронов) состоит на 75% по массе из ядер атома водорода и на 25% из ядер атома гелия. Свободных



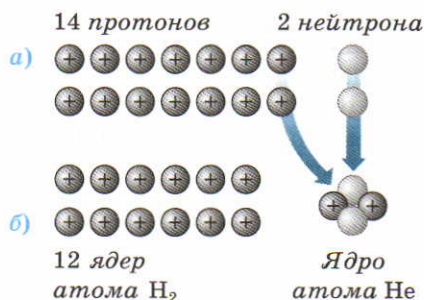
### 303

Образование гелия при нуклеосинтезе в ранней Вселенной

нейтронов для синтеза тяжёлых изотопов не остается. Изотопы с массовыми числами от 5 до 8 нестабильны и быстро распадаются. Синтез более тяжёлых изотопов требует существенно больших температур. Он станет возможным при образовании звёзд миллиарды лет спустя.

Последующее расширение вещества Вселенной, существующего в виде водородно-гелиевой плазмы, приводит к непрерывному уменьшению её температуры. Через 350 000 лет температура Вселенной оказывается порядка (см. (258)):

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{3,5 \cdot 10^5 \cdot 3,15 \cdot 10^7}} \approx 3000 \text{ К.}$$



### 304

Образование водородно-гелиевой плазмы в результате нуклеосинтеза в ранней Вселенной: а) состав плазмы в начале нуклеосинтеза ( $t_1 = 3$  мин); б) состав плазмы после нуклеосинтеза ( $t_1 = 15$  мин)



При более высоких температурах состав плазмы определяется балансом между образованием нейтральных и заряженных частиц. Образование нейтральных частиц (атомов) происходит в результате процессов рекомбинации (объединения) заряженных частиц (электронов и положительных ионов) с испусканием фотона  $\gamma$ :



Обратный процесс фотоионизации увеличивает число заряженных частиц в плазме:



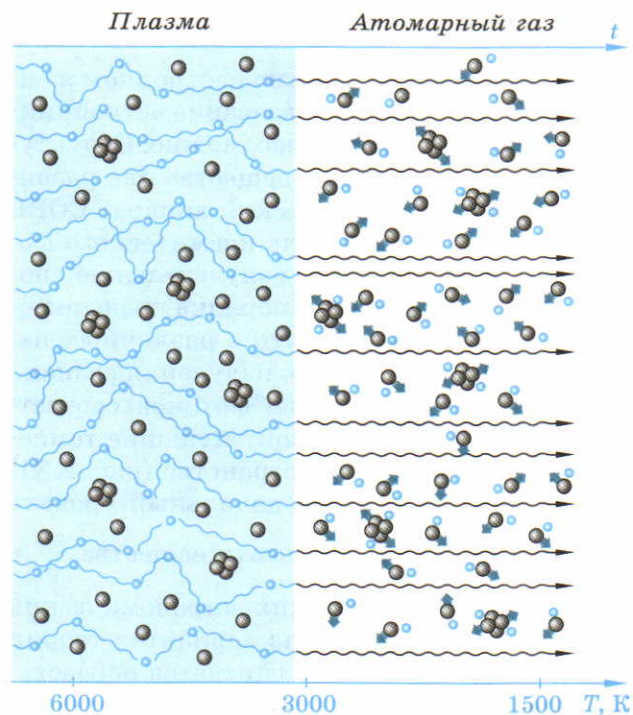
При температуре плазмы порядка 3000 К максимум спектральной плотности излучения, согласно закону Вина (см. Ф-11, § 73, формула (216)), приходится на длину волны  $\lambda \approx 1$  мкм. Энергия кванта излучения ( $E_\gamma = 1,2$  эВ) такой длины волны недостаточна для эффективной фотоионизации атома водорода, для которого энергия ионизации  $I_1 = 13,6$  эВ. При  $T = 3000$  К ионизовать нейтральный атом не в состоянии не только излучение, но и электроны при столкновении с ним.

**Эра атомов. Реликтовое излучение.** Доминирование процесса рекомбинации заряженных частиц над процессами ионизации приводит к изменению состояния вещества во Вселенной от плазменного к газовому (атомарному). В этот момент размер Вселенной составлял 0,001 её размера в настоящее время.

При  $T > 3000$  К фотоны взаимодействуют с веществом, отклоняясь и поглощаясь заряженными частицами. Длина свободного пробега фотона из-за этого мала, и вещество Вселенной не является прозрачным для излучения (подобно туманной атмосфере).

При  $T < 3000$  К свободные электроны исчезают в результате рекомбинации с ионами водорода  $\text{H}^+$ , а энергия фотона оказывается недостаточной для возбуждения атомов. Поэтому излучение перестаёт взаимодействовать с веществом, свободно (изотропно) распространяясь во всех направлениях (рис. 305). Вселенная становится прозрачной для излучения.

Модель Большого взрыва, предложенная в 1948 г. Гамовым, предсказывала, что тепловое излучение сохранилось с тех времен до настоящего времени. Поэтому часто такое излучение называют *реликтовым*. Вследствие расширения Вселенной температура реликтового излучения должна была уменьшиться примерно в 1000 раз, т. е. быть порядка 3 К. Длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения при такой температуре, равна 1 мм. Поэтому вторым экспериментальным подтверждением модели Большого взрыва (вслед за законом Хаббла) стало открытие в 1964 г. американскими астрофизиками **Арно Пензиасом** и **Робертом Уилсоном** изотропного реликтового СВЧ-излучения, приходящего извне в нашу Галактику. Измеренная интенсивность



### 305

*Взаимодействие излучения с веществом в ранней Вселенной.*

*Вещество становится прозрачным, когда температура Вселенной становится меньше 3000 К*

излучения действительно соответствовала излучению абсолютно чёрного тела, имеющего температуру 2,73 К.

Изотропность и однородность реликтового излучения дополнительно подтверждают предположения об однородности и изотропности Вселенной на больших расстояниях.

### ВОПРОСЫ

1. При какой температуре Вселенной энергия вещества становится больше, чем энергия излучения?
2. Какие термоядерные реакции определяют первичный нуклеосинтез в ранней Вселенной?
3. Почему первичный газ во Вселенной на 75% по массе состоял из атомов водорода и на 25% из атомов гелия?
4. При какой температуре и в какой момент времени от Большого взрыва вещество во Вселенной становится в основном атомарным?
5. Объясните механизм возникновения реликтового излучения. Какова его температура в настоящее время?



## § 98. Образование астрономических структур

**Анизотропия реликтового излучения.** При абсолютно изотропном и однородном распределении вещества во Вселенной образование астрономических структур (галактик, звёзд, планет) было бы невозможно. Структуры могут возникнуть лишь в результате уплотнения вещества или развития начальных флуктуаций его плотности. Космический аппарат COBE (Cosmic Background Explorer (*англ.*) — исследователь космического фона), запущенный в 1989 г., измерил спектральную излучательную способность реликтового излучения с точностью, на два порядка превышающей предыдущие измерения. Его анализ показал, что в различных направлениях от наблюдателя температура реликтового излучения разная.

Области с большей температурой (большей энергией фотонов) соответствуют повышенной плотности вещества во Вселенной. Меньшие температуры определяют менее плотное космическое пространство (рис. XXII на цветной вклейке, с. 385). Даже незначительный начальный уровень относительных флуктуаций (неоднородностей) плотности вещества  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx$

$\approx 10^{-5}$  оказывается достаточным для образования таких астрономических структур, как сверхскопления галактик. В одном из вариантов теории образования астрономических структур первичным считается образование сверхскоплений галактик, имеющих пространственный масштаб порядка 100 млн св. лет. Пространственные размеры флуктуации оказываются примерно такого порядка.

**Образование сверхскоплений галактик.** Рассмотрим динамику образования астрономических структур. Неоднородное облако водорода и гелия начинает сжиматься под действием сил гравитации. Процессу сжатия препятствует возрастание давления газа внутри облака. Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа массой  $m$   $\left( E_k = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \right)$  сравнивается с потенциальной энергией газового облака радиусом  $r$   $\left( |E_p| \approx G \frac{m^2}{r} \right)$ , т. е.

$$\frac{m}{M} RT \approx G \frac{m^2}{r}. \quad (268)$$

Для грубой оценки будем считать, что  $m \approx \rho r^3$ , т. е.  $r = \left( \frac{m}{\rho} \right)^{1/3}$ ,  $M = M_H = 10^{-3}$  кг/моль.

Как следует из формулы (268), процесс гравитационного сжатия облака начинается, только если его масса  $m$  оказывается больше некоторой

минимальной массы, называемой массой Джинса, в честь английского астрофизика *Джеймса Джинса*:

$$m \geq m_{\text{Дж}} \approx \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( \frac{RT}{GM_{\text{H}}} \right)^3}. \quad (269)$$

Через 350 000 лет с момента Большого взрыва при  $T = 3000 \text{ К}$  размер Вселенной был в 1000 раз меньше нынешнего. Это значит, что плотность газа была в  $10^9$  раз больше нынешней ( $10^{-27} \text{ кг/м}^3$ ), т. е.  $\rho = 10^{-18} \text{ кг/м}^3$ . Тогда  $m_{\text{Дж}} = 10^6 M_{\odot}$ . Подобная масса характерна для небольших галактик.

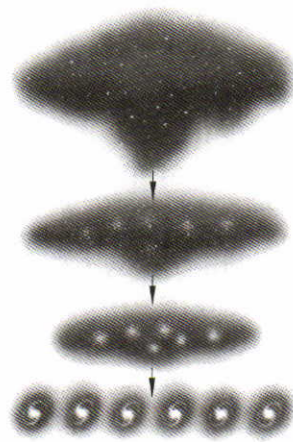
При флуктуациях плотности бóльших размеров (порядка сверхскопления галактик) сжатие первоначального облака происходит асимметрично. Наибольшее гравитационное притяжение возникает между самыми близкими частями облака в направлении минимального размера. В результате крупномасштабные структуры возникают 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. 306).

**Образование галактик.** Галактика образуется из огромного газового облака, размеры которого лишь незначительно превышают 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. XXIII на цветной вклейке, с. 385).

В отсутствие начального вращения гравитация равномерно сжимает облако. В результате образуется эллиптическая галактика с сильной концентрацией звёзд к центру (рис. XXIII, а).

В быстро вращающемся облаке гравитационное сжатие также приводит 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. XXIII, б). Образуется спиральная галактика. Спиральные галактики, к кото-



### ▲ 306

*Последовательность образования галактик. Процесс фрагментации (деления) газового облака*



рым относится наша Галактика — Млечный Путь, составляют 50% всех галактик, эллиптические — примерно 25%, линзообразные — 20%. Остальные 5% составляют так называемые неправильные галактики.

Чем больше начальная масса газового облака, тем больше гравитационное сжатие, тем быстрее образуется галактика.

**Возникновение звёзд.** По современным представлениям, звёзды зарождаются группами или скоплениями из водородно-гелиевых туманностей. Под действием сил тяготения газ сжимается и его температура повышается.

Гравитационной энергии, освобождающейся при образовании звезды, оказывается достаточно для свечения лишь в течение нескольких миллионов лет. Например, для Солнца потенциальную гравитационную энергию, освобождающуюся при сближении с бесконечно большого расстояния до расстояния  $R_{\odot} = 7 \cdot 10^8$  м его двух половин, можно оценить как

$$E_p = G \frac{(m/2) \cdot (m/2)}{R_{\odot}} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(2 \cdot 10^{30}/2) \cdot (2 \cdot 10^{30}/2)}{7 \cdot 10^8} = 10^{41} \text{ Дж.}$$

Зная мощность излучения Солнца  $P_{\text{изл}} = 4 \cdot 10^{26}$  Вт, можно оценить время  $\tau_{\text{гр}}$ , за которое будет израсходована его гравитационная энергия:

$$\tau_{\text{гр}} = \frac{E_p}{P_{\text{изл}}} = \frac{10^{41}}{7 \cdot 10^{26}} \text{ с} \approx 2,5 \cdot 10^{14} \text{ с} \approx 8 \text{ млн лет.}$$

Радиоизотопный анализ образцов грунта Луны и метеоритов показывает, что в настоящее время возраст Солнечной системы оказывается около 4,6 млрд лет. Это означает, что для свечения Солнца требуется энергия, в тысячи раз превосходящая гравитационную.

Выясним, что служит источником энергии Солнца (как типичный пример звезды) в течение этого времени. Для чего оценим температуру в его центре в результате гравитационного сжатия. Согласно формуле (268) температура в центре звезды (Солнца) зависит от её массы  $m$ :

$$T_{\text{ц}} = \frac{GM_{\odot}m_p}{rk}. \quad (270)$$

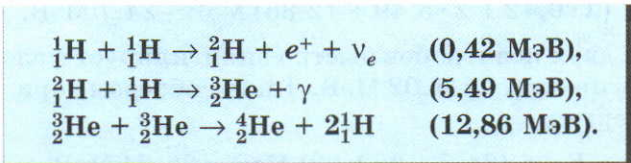
Здесь учтено, что  $M_{\text{H}} = m_p N_{\text{A}}$ ,  $R = kN_{\text{A}}$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $m = M_{\odot}$ . С учётом, что  $r = R_{\odot} = 0,7 \cdot 10^9$  м, получаем

$$T_{\text{ц}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30} \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}}{0,7 \cdot 10^9 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ К.}$$

Более точные расчёты дают  $T_{\text{ц}} \approx 12$ —15 млн К, что по порядку величины совпадает с нашей оценкой. При таких температурах водородной

плазмы становятся возможными реакции термоядерного синтеза ядер гелия из ядер водорода — протонов.

**Протон-протонный цикл.** Наиболее вероятной цепочкой реакций с превращением четырёх протонов в одно ядро гелия является *протон-протонный цикл* (рис. 307), изученный немецким физиком *Хансом Бете* в 1939 г.

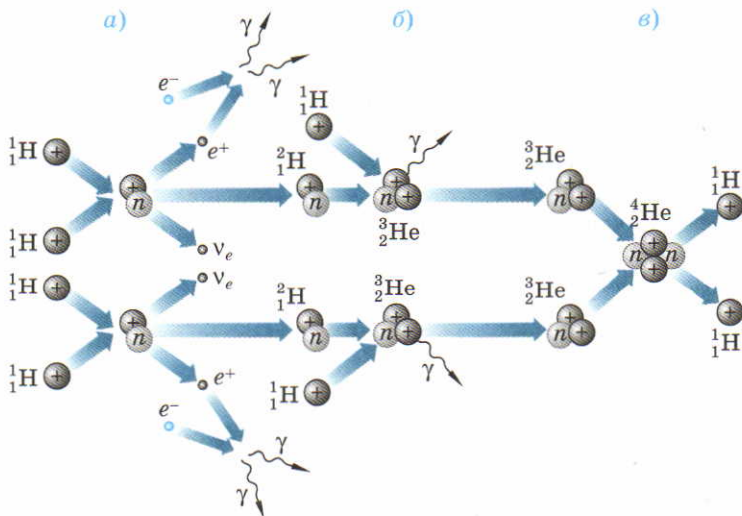


В скобках указана энергия, выделяющаяся в результате реакции.

Первая реакция — образование дейтрона  ${}^2_1\text{H}$  при столкновении двух протонов проходит с очень малой вероятностью: каждый протон вступает в эту реакцию в среднем за 10 млрд лет. Однако благодаря огромному числу протонов  $N_p = \frac{m}{m_p}$  (для Солнца  $N_{p\odot} = \frac{M_\odot}{m_p} = 2 \cdot 10^{30} / 1,6 \cdot 10^{-27} \approx \approx 10^{57}$ ) «узкое место» цикла преодолевается.

Вторая и третья реакции протекают значительно быстрее, за время 10 с и  $10^6$  лет соответственно.

Запишем результирующую реакцию цикла.



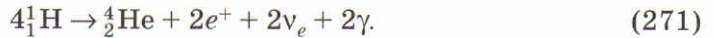
307

Протон-протонный цикл:

- а)  ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ;
- б)  ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ;
- в)  ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^1_1\text{H}$



Введём стехиометрический коэффициент 2 для первых двух реакций и, суммируя левые и правые части протон-протонного цикла, получим



Оценим энергию, выделяющуюся в результате протон-протонного цикла:

$$(2 \cdot 0,42 + 2 \cdot 5,49 + 12,86) \text{ МэВ} \approx 24,7 \text{ МэВ}.$$

Каждый из двух позитронов быстро аннигилирует с электроном с выделением энергии  $2m_e c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$ . Таким образом, при реакции (272) выделяется энергия

$$E_{p-p} = (24,7 + 2 \cdot 1,02) \text{ МэВ} = 26,74 \text{ МэВ}.$$

Тогда полная термоядерная энергия  $E_{\text{т.я}}$ , которая может выделиться на Солнце в результате синтеза ядер гелия из четырех ядер водорода, равна

$$E_{\text{т.я}} = \frac{1}{4} N_{p\odot} E_{p-p} = \frac{1}{4} \cdot 10^{57} \cdot 26,74 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \approx 10^{44} \text{ Дж}.$$

Время, за которое будет израсходована термоядерная энергия Солнца, оказывается порядка 10 млрд лет:

$$\tau_{\text{т.я}} = \frac{E_{\text{т.я}}}{P_{\text{изл}}} = \frac{10^{44}}{4 \cdot 10^{26} \cdot 3,16 \cdot 10^7} \approx 10 \text{ млрд лет}.$$

Таким образом, именно *термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звёзд*.

## ВОПРОСЫ

1. Что может характеризовать анизотропия реликтового излучения?
2. Что характеризует масса Джинса?
3. Поясните различие в формировании эллиптических и спиральных галактик.
4. Оцените температуру в центре Солнца.
5. Какие термоядерные реакции определяют протон-протонный цикл? Оцените время свечения Солнца.

## § 99. Эволюция звёзд

**Эволюция звёзд различной массы.** В результате протон-протонного цикла повышается температура и давление плазмы в центре *протозвёзды* (звезда в стадии образования), препятствуя дальнейшему гравитационному сжатию. Размер протозвёзды стабилизируется, она излучает за

счёт энергии термоядерного синтеза, превращаясь в звезду. Отметим, что водород внешних слоёв не горит из-за наружного охлаждения, поэтому термоядерный синтез добавляет лишь 4% гелия к его первоначальному составу. Срок существования звезды существенно зависит от её массы. Чем больше масса звезды, тем сильнее и быстрее её гравитационное сжатие, выше температура в центре, интенсивнее идёт термоядерный синтез, бóльшая энергия выделяется в единицу времени. Соответственно запасы водорода расходуются быстрее, скажем, за десятки миллионов лет.

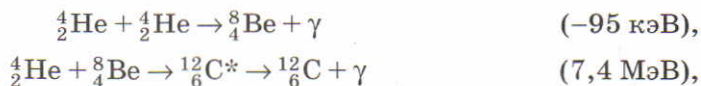
Возможная масса звезды имеет ограничения сверху  $m_{\max}$  и снизу  $m_{\min}$ . Если масса звезды в несколько десятков раз превышает массу Солнца, давление излучения разрывает звезду. Существование таких звёзд было бы сразу зафиксировано по их мощному излучению.

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  $0,5 M_{\odot}$ .

$m \approx M_{\odot}$ . Если масса звезды оказывается порядка солнечной  $M_{\odot}$ , через миллиарды лет водород в центре звезды полностью превращается в гелий. Энергия перестает выделяться, падают температура и давление, которое уже не может препятствовать сжатию под действием наружных слоёв звезды. Сжатие гелиевого ядра вместе с оболочкой окружающего его водорода приводит к резкому повышению температуры и новому термоядерному синтезу гелия из водородной оболочки. Выделение энергии вызывает значительное (стократное) расширение и охлаждение внешних периферийных слоёв звезды.

Вновь синтезируемый гелий непрерывно увеличивает массу сжимающегося гелиевого ядра, ускоряя тем самым гравитационное сжатие.

Когда температура сжимающегося гелиевого ядра возрастёт до 100 млн К (табл. 20), из гелия начинает синтезироваться углерод в результате реакций



где  ${}^{12}_6\text{C}^*$  — ядро углерода в возбуждённом состоянии.



Таблица 20

## Эволюция звёзд различной массы

Начальная масса звезды, $M_{\odot}$	0,3	1	3	10	30
Время эволюции, млрд лет	800	10	0,3	0,1	0,06
Последний синтезируемый химический элемент	He	C	O	Si	Fe
Конечный результат эволюции	Белый карлик	Белый карлик	Белый карлик	Нейтронная звезда	Чёрная дыра
Конечная масса, $M_{\odot}$	0,3	0,7	0,8	1,5	6,0
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	$10^9$	$10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{17}$

Результирующее выделение энергии 7,3 МэВ при образовании углерода  $^{12}_6\text{C}$  приводит к значительному расширению внешних слоёв звезды и охлаждению её поверхности. При этом внешняя поверхность Солнца может достигнуть орбиты Земли, а уменьшение её температуры  $T$  приведёт к изменению цвета излучения. В соответствии с законом смещения Вина (см. Ф-11, формула (216)) при уменьшении температуры увеличивается длина волны излучения, смещаясь в красную область. 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, т. е. средние расстояния между протонами оказываются порядка минимально возможного расстояния между электронами  $l = 10^{-12}$  м. Это означает, что плотность звезды в конце эволюции оказывается порядка

$$\rho \approx \frac{m_p}{l^3} \approx \frac{10^{-27}}{(10^{-12})^3} \text{ кг}/\text{м}^3 = 10^9 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Звезда становится *белым карликом*, излучающим энергию в 1000 раз меньшую, чем Солнце. Белый карлик может остывать миллиарды лет. Остатки газовой оболочки звезды, превратившейся в белый карлик, называют *планетарной туманностью*.

Чем больше масса протозвезды, тем выше температура ядра звезды и, соответственно, тем более тяжёлые химические элементы в нём синтезируются (табл. 21).

Таблица 21

## Основные термоядерные реакции в звёздах

Минимальная начальная масса звезды, $M_{\odot}$	Термоядерная реакция в ядре звезды	Последний синтезируемый химический элемент	Минимальная температура синтеза, млн К
0,1	$4({}_1^1\text{H}) \rightarrow$	${}_2^4\text{He}$	10
2	$3({}_2^4\text{He}) \rightarrow$ ${}_4^8\text{Be} + {}_2^4\text{He} \rightarrow$ ${}_6^{12}\text{C} + {}_2^4\text{He} \rightarrow$	${}_6^{12}\text{C}$ ${}_8^{16}\text{O}$	100
4	$2({}_6^{12}\text{C}) \rightarrow {}_2^4\text{He}$	${}_{10}^{20}\text{Ne}$	600
5	$2({}_6^{12}\text{C}) \rightarrow$	${}_{12}^{24}\text{Mg}$	740
8	$2({}_8^{16}\text{O}) \rightarrow {}_2^4\text{He}$	${}_{14}^{28}\text{Si}$	1500
15	$2({}_{14}^{28}\text{Si}) \rightarrow$	${}_{26}^{56}\text{Fe}$	4000
20	${}_{26}^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow$	$13({}_2^4\text{He}) + 4{}_0^1n$	6000

$m \approx 10M_{\odot}$ . Если масса звезды в 10 раз превышает массу Солнца, весь водород синтезируется в гелий за 10 млн лет. После сгорания водорода температура и давление в центре звезды уменьшаются, и звезда начинает сжиматься под действием гравитационных сил. Сжатие продолжается несколько десятков тысяч лет, при этом температура в ядре звезды становится свыше 100 млн К. При такой температуре начинаются реакции синтеза ядер углерода и кислорода из ядер гелия (см. табл. 21).

Повышение температуры ядра ведёт к разогреванию и расширению внешней оболочки звезды. Звезда становится *красным сверхгигантом*.

После выгорания гелия менее чем за миллион лет начинается новый цикл сжатия и при температуре, большей 740 млн К, начинается синтез ядер неона и магния из ядер углерода. При синтезе ядер кислорода при  $T > 1,5$  млрд К 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, быстро сжимаясь, не выдерживает огромного внешнего давления — происходит коллапс звезды.

В результате коллапса ядро звезды радиусом порядка радиуса Земли за доли секунды сжимается в шар радиусом около 10 км. При этом давле-



ние резко возрастает, так что электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны с испусканием электронного нейтрино:



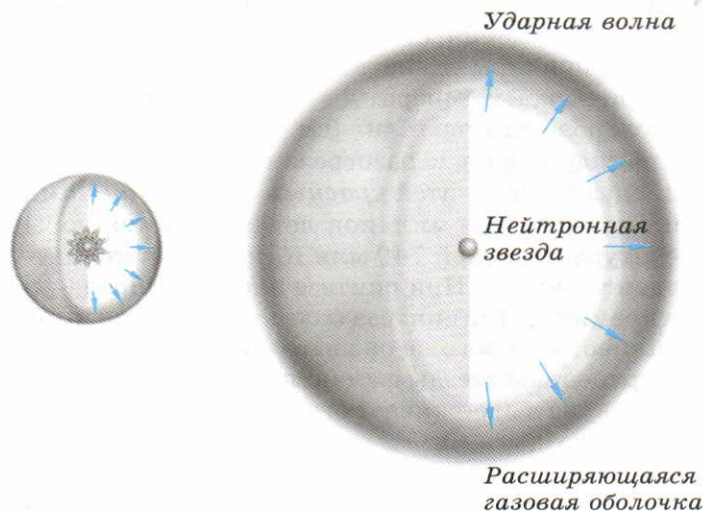
Энергия потока нейтрино существенно превышает энергию светового излучения. Такую звезду называют *нейтронной звездой*.

Оценим плотность нейтронной звезды при максимально плотной упаковке нейтронов, когда среднее расстояние  $l$  между центрами нейтронов примерно равно их диаметру  $D \approx 10^{-15}$  м. Тогда плотность нейтронной звезды

$$\rho \simeq \frac{m_n}{D^3} \simeq \frac{10^{-27}}{(10^{-15})^3} \text{ кг/м}^3 = 10^{18} \text{ кг/м}^3.$$

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. 308). 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. XXIV на цветной вклейке, с. 385).



### 308

Взрыв сверхновой  
( $m = 10 M_\odot$ )

$m = 20M_{\odot}$ . 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  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  (см. табл. 21). Ядро железа — самое тяжёлое ядро, синтез которого происходит с выделением энергии. Образование более тяжёлых ядер требует затрат энергии, поэтому их синтез в железном ядре не происходит. Масса железной сердцевины звезды менее чем за сутки достигает нескольких масс Солнца (см. табл. 20). 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. XXV на цветной вклейке, с. 385). Из-за отсутствия источника энергии железное ядро не выдерживает огромного гравитационного давления и быстро коллапсирует.

Внешние слои звезды начинают падение к центру. Резкое повышение их температуры сопровождается мощным потоком нейтронов из железного ядра (см. табл. 21) вследствие реакции



**Синтез тяжёлых химических элементов.** Последовательное присоединение нейтронов к ядрам приводит к образованию тяжёлых химических элементов.

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.

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  $m > 4 M_{\odot}$  (см. табл. 20) нейтронный газ не может скомпенсировать огромное гравитационное сжатие. В результате на месте взорвавшейся сверхновой остаётся *чёрная дыра* (см. Ф-10, § 42). Гигантские чёрные дыры обнаружены в центрах ряда галактик, включая Млечный Путь. Из-за огромного гравитационного поля чёрной дыры фотоны не могут вырваться за пределы радиуса Шварцшильда  $R_{\text{III}}$  (см. Ф-10, § 42). Поэтому мы не можем наблюдать события, происходящие внутри сферы, при  $R < R_{\text{III}}$ . За пределами радиуса Шварцшильда при  $R > R_{\text{III}}$  чёрная дыра ведёт себя подобно обыч-



ной звезде эквивалентной массы. Межзвёздное вещество, втягивающееся в чёрную дыру, ускоряется вблизи радиуса Шварцшильда до скорости, близкой к скорости света, нагреваясь до температуры 100 млн К. Нагревание вещества сопровождается рентгеновским и  $\gamma$ -излучением. Излучение удалённых от центра областей лежит в ультрафиолетовом диапазоне, который в результате красного смещения наблюдается как голубое свечение *квazarов* (квазизвездные 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.

### ВОПРОСЫ

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. Как происходит синтез тяжёлых элементов в звёздах?
5. Как образуются квазары?

## § 100. 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 составляет 99,6% видимого вещества во Вселенной (табл. 22).

Таблица 22

**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 трёхатомной 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 Солнечной системы.** 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. XXVI на цветной вклейке, с. 385).) Масса облака была порядка  $10^6 M_\odot$ . 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  $(1,5 \div 2) M_\odot$  могла образовать Солнечную систему (рис. XXVII, *a* на цветной вклейке, с. 385). Гравитационное сжатие уменьшает масштаб центральной части уплотнения в 100 000 раз (рис. XXVII, *b* на цветной вклейке, с. 385). Начальное вращение облака при уменьшении его размеров приводит к значительному увеличению скорости вращения (подобно фигуристу, увеличивающему скорость вращения приближением рук к корпусу). Вращение предотвращает полный коллапс (рис. XXVII, *c* на цветной вклейке, с. 385). В центре уплотнения оказывается прото-Солнце массой около  $0,1 M_\odot$ , принявшее сферическую форму, излучающее в красной области спектра. Остальная часть вещества образует в течение 100 000 лет диск, вращающийся вокруг прото-Солнца и состоящий на 98,5% по массе из газа и на 1,5% из пыли, взвешенной в газе.

Угловые скорости  $\omega$  вращения газа на разных расстояниях  $R$  от центра различны:  $\omega \sim R^{-3/2}$  (см. Ф-10, с. 159, зад. 3). Это приводит к тому, что



зоны диска, ближайшие к прото-Солнцу, втягиваются внутрь, пополняя массу до  $M_{\odot}$ . Внешние зоны удаляются от центра. Турбулентность 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. XXVIII на цветной вклейке, с. 385).

Температура пыли убывала с расстоянием от прото-Солнца. Существенное различие температуры пыли вблизи и вдали от прото-Солнца определило принципиальное отличие структуры нынешних планет земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) от структуры планет-гигантов (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). В районе планет земной группы  $0,8 \div 1,3$  а. е. температура менялась в пределах  $900 \div 1400$  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. XXVII, в на цветной вклейке, с. 385). 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). Скорость появления зёрен зависит от сил взаимодействия частиц и от остаточной турбулентности (неупорядоченного движения) газа. В отсутствие турбулентности сгустки размером порядка километров могли бы образоваться за несколько лет (десятилетий) только за счёт гравитационного притяжения. Наличие турбулентности замедляет этот процесс от 1000 до 100 000 лет. Тем не менее во временных масштабах формирование Солнечной системы — это очень короткий процесс. Через 10 000 лет в плоскости протопланетного диска образовалось около 100 млрд объектов неправильной формы размером от 1 до 10 км — *планетеземали* (зародыши планет) (рис. XXVII, г на цветной вклейке, с. 385). 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 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, поясом Койпера.

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, пример-

но в 20 раз большую, чем теперь. Нынешний вид оно приобрело спустя 20—30 млн лет.

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 *протопланета* (планета в стадии образования).

### ВОПРОСЫ

1. Какой 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. Охарактеризуйте пояс Койпера в Солнечной системе.

## § 101. Эволюция Солнечной системы

**Планеты 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 планетеземальями, либо к разрушению планетеземалей в результате последующих столкновений друг с другом (см. рис. XXVII, *г* на цветной вклейке, с. 385). Скорость планетеземалей при столкновении с протопланетой, например Землёй, подобна второй космической скорости  $v_{II} \sim R_{\oplus}$ . Количество тепла, выделяющееся при таком абсолютно неупругом ударе,  $Q \sim R_{\oplus}^2$ . Соответственно 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 в результате медленного радиоактивного распада



тяжёлых элементов (типа урана), образовавшихся в результате взрывов сверхновых и входящих в состав межзвёздной пыли.

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. В мантии Марса заметны также примеси оксида железа.

В таблице 23 приведены массы планет земной группы и Луны, выраженные в массах Земли, процентное соотношение массы их ядра  $m_{\text{я}}$  и мантии  $m_{\text{м}}$  по отношению к массе планеты.

Таблица 23

**Соотношение массы ядра и мантии планет земной группы и Луны**

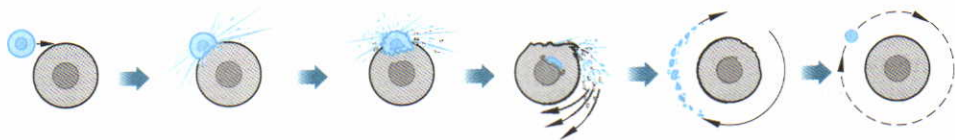
Планета	$m^*/M_{\oplus}$	$m_{\text{я}}/m$ , %	$m_{\text{м}}/m$ , %
Меркурий	0,053	60,4	39,6
Венера	0,715	39,9	60,1
Земля	1,0	38,0	62,0
Марс	0,107	26,2	73,8
Луна	0,012	0	100

Практическое отсутствие железного ядра у Луны и аномально большое содержание железа у Меркурия связано с возможным процессом образования Луны и последним крупным столкновением, которое предположительно претерпел Меркурий.

Согласно одной из современных гипотез, Луна могла возникнуть при нецентральной столкновении Земли с протопланетой размера Марса (рис. 309), 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

\*  $m$  — масса планеты.



### ▲ 309

*Процесс образования Луны в результате нецентрального столкновения Земли с протопланетой размером с Марс (50 млн лет после образования Солнечной системы)*

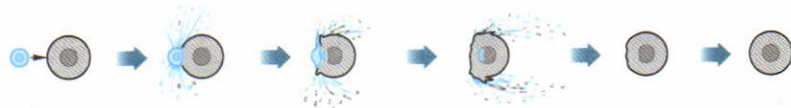
удаляться от неё. Это удаление продолжается и в настоящее время со скоростью 4 см/год. Изотопный анализ образцов старейших лунных пород показал, что Луна возникла примерно через 50 млн лет после начала формирования Солнечной системы.

Меркурий, согласно одной из гипотез, испытал центральный удар со стороны протопланеты, имеющей значительную скорость. В результате этого столкновения значительная часть мантии была рассеяна в окружающем пространстве (рис. 310). Объединение железных ядер эффективно увеличило относительную массу ядра Меркурия.

Через 200 млн лет от начала образования Солнечной системы бомбардировка планет земной группы крупными планетеземлями практически прекратилась, хотя столкновения с нерегулярными объектами радиусом от 1 до 20 км продолжались. Через 500 млн лет значительно ослабили бомбардировки Земли *кометами*, принёсшими на Землю массу воды, примерно в 10 раз превышающую массу воды в Мировом океане.

**Комета — планетеземаль диаметром от 5 до 500 км, покрытая льдом.**

Масса газа, доставленная на Землю кометами, во много раз превышает массу её атмосферы. Кометы доставили на Землю около  $10^{18}$  т простейших органических молекул, необходимых для последующего синтеза нуклеиновых кислот, в виде микроскопических частиц, распыленных в океанах.



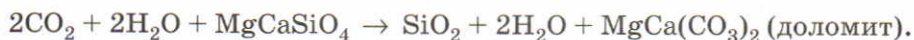
### ▲ 310

*Увеличение относительной массы ядра Меркурия в результате центрального столкновения с протопланетой*



Вода, приносимая на Землю кометами, превращалась в пар, который затем конденсировался при температуре кипения воды 230 °С (при давлении 20 атм).

Практическое прекращение бомбардировок Земли кометами через 500 млн лет после начала образования Солнечной системы привело к снижению температуры океанов до 100—120 °С. Давление атмосферы, состоящей из углекислого газа CO<sub>2</sub> (80%), метана CH<sub>4</sub> (10%), угарного газа СО (5%), азота N<sub>2</sub> (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  $T = 300 \text{ К}$ , 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.) В результате горячих дождей произошло существенное уменьшение процентного содержания углекислого газа в атмосфере. При взаимодействии углекислого газа с силикатами и водой образуются карбонаты (кальцит, доломит и др.).



Связывание углерода в горных породах привело к тому, что парциальное давление углекислого газа CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли упало ниже парциального давления азота N<sub>2</sub>, ставшего основным газом в атмосфере. Последующие процессы фотосинтеза сначала увеличили, а затем стабилизировали процент кислорода O<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Это связано со значительным содержанием углерода в коре этих планет в виде карбонатов. Энергия, выделяющаяся при столкновениях с кометами, легко расщепляет карбонаты с выделением CO<sub>2</sub>. Углекислый газ выделяется и при вулканических извержениях.

Массы Меркурия и Луны недостаточны для удержания существенной атмосферы.

**Планеты-гиганты.** Параллельно с образованием планет земной группы на расстояниях от Солнца, бóльших чем 5 а. е., возникали планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Плутон является самым крупным объектом в группе тел, составляющих пояс Койпера. На рас-

стояниях 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 планетеземалями 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 у Юпитера не менее 20 000 К.

Образование Сатурна происходило аналогично, но более медленно: около 2 млн лет. Сатурн аккумулировал атмосферу массой около  $80 M_{\oplus}$  (табл. 24). 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 60 000 км, а толщина не более 20 м.

Таблица 24

#### Соотношение массы ядра и газовой оболочки планет-гигантов

Планета	$m^*/M_{\oplus}$	$m_{\text{я}}/m$ , %	$m_{\text{о}}/m$ , %
Юпитер	317	9,0	91
Сатурн	94	20	80
Уран	14,6	89	11
Нептун	17,3	89	11

\*  $m$  — масса планеты.

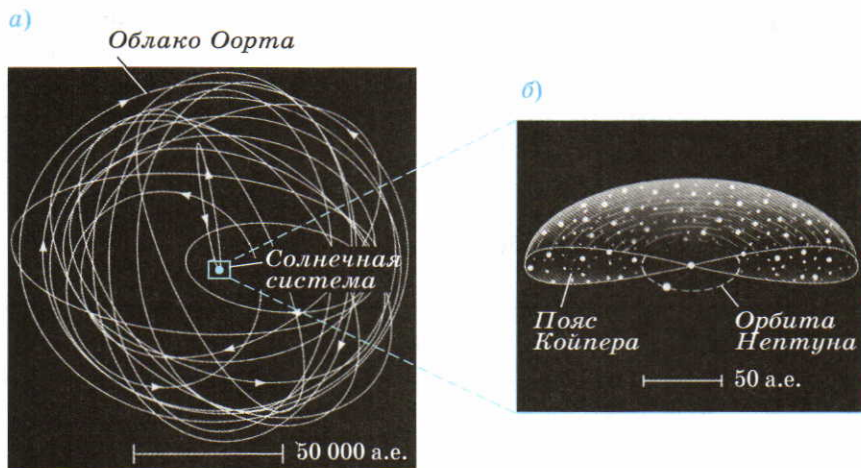


Образование Урана и Нептуна происходило заметно медленнее, пропорционально их периодам вращения вокруг Солнца. Меньшие массы ядер планет не позволили аккумулировать значительные атмосферы.

**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 расстояние около 50 000 а. е. В этом огромном облаке *Оорта*, предсказанном голландским астрономом **Яном Оортом** в 1950 г., по-видимому, находится большинство наблюдаемых комет (рис. 311). 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.



### ▲ 311

Области локализации комет в Солнечной системе:

а) облако Оорта (комета с большим периодом обращения в сферическом слое);

б) пояс Койпера (комета с малым периодом обращения в плоскости эклиптики)

Когда расстояние кометы от Солнца становится меньшим 5 а. е., поверхность твёрдого ядра кометы нагревается настолько, что начинается испарение замёрзших 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 25.

Таблица 25

### Примерная хронология образования Солнечной системы

<i>Этап</i>	<i>Время с начала образования Солнечной системы, лет</i>
Образование газопылевого диска в плоскости эклиптики	0
Образование планетеземалей размером 10 км; размером 50 ÷ 500 км	1 тыс. 100 тыс.
Образование протопланет размером Луна — Марс в области планет земной группы	1 млн
Формирование ядра Юпитера (массой $12M_{\oplus}$ )	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



## ВОПРОСЫ

1. В чём особенности образования планет земной группы?
2. Каков примерный состав вещества планет, их атмосфер?
3. В чём особенности образования планет-гигантов?
4. Какова структура планет-гигантов?
5. Какова примерная хронология образования Солнечной системы?

## § 102. Органическая жизнь во Вселенной

**Возникновение органической жизни на Земле.** Наиболее ранние следы органической жизни возрастом около 3,8 млрд лет были обнаружены в скалах Гренландии. В осадочных породах австралийских скал были обнаружены 11 различных видов остатков бактерий возрастом 3,46 млрд лет. Разнообразие форм этих бактерий свидетельствует об их длительной эволюции. Чем отличались первичные бактерии от их неживого окружения?

Прежде всего живой организм — система, которая не только *репродуцируется*, но и *эволюционирует* (изменяется).

*Репродукция* — процесс копирования, который позволяет бактерии произвести идентичную себе бактерию. В этом процессе необходимая информация определяет течение соответствующих химических процессов. Однако процесс репродукции — лишь необходимое, но недостаточное условие жизни. Например, кристалл, погружённый в насыщенный раствор соли, растёт и воспроизводит кристаллическую структуру соседних атомов. Живой же организм эволюционирует в процессе репродукции.

*Эволюция* форм жизни — исключительно медленное изменение информации, осуществляемое в процессе копирования.

Для выяснения происхождения сложных органических соединений, необходимых для возникновения жизни, американские химики **Харольд Ури** и **Стэнли Миллер** в 1953 г. поставили эксперимент, воспроизводивший физические условия в первичной атмосфере Земли. Смесь водорода  $H_2$ , метана  $CH_4$ , аммиака  $NH_3$  и водяного пара  $H_2O$  подвергли действию электрического разряда, имитирующего молнии в атмосфере. В результате этого воздействия в смеси возникали аминокислоты, образующие белки живых организмов, и основания, входящие в состав РНК и ДНК.

Многочисленные модификации опыта Ури—Миллера, когда изменялся начальный состав смеси и разряд заменялся на ультрафиолетовое облучение, приводили к получению всё новых длинных молекул аминокислот, необходимых для возникновения органической жизни.

Для возникновения органической жизни требуются благоприятные внешние условия.

Во-первых, для возникновения определённого многообразия форм органической жизни требуется достаточно длительный период её эволюции, порядка 4 млрд лет. Обеспечить необходимый режим в течение такого времени может лишь звезда, масса которой лежит в определённых пределах. Например, для этого не подходит звезда массой  $3M_{\odot}$ , превращающаяся в красный гигант уже через 300 млн лет.

Во вторых, необходимо условие возникновения органической жизни — наличие воды в жидком состоянии. Вода подобно клею склеивает сложные длинные органические молекулы (процесс поликонденсации). Для поликонденсации температура воды должна меняться в пределах от 0 (точка замерзания воды) до  $140^{\circ}\text{C}$  (температура разрушения важных органических молекул). Хотя вода и является наиболее распространённой трёхатомной молекулой во Вселенной, однако в жидком состоянии она встречается крайне редко.

Требуемый температурный диапазон может быть обеспечен на планете, находящейся в определённом интервале возможных расстояний от центральной звезды и при наличии у планеты достаточно сильного гравитационного поля для удержания планетой достаточно плотной атмосферы. (При давлении 3 атм вода закипает при температуре  $144^{\circ}\text{C}$ .)

**Можно сформулировать три необходимых условия для возникновения органической жизни на планете:**

- масса центральной звезды — от 0,7 до  $1,2M_{\odot}$ ;
- расстояние от центральной звезды — от 0,8 до 1,6 а. е.;
- масса планеты — от 0,8 до  $4m_{\oplus}$ .

**Жизнь в Солнечной системе.** Применительно к Солнечной системе именно условия на Земле являются предпочтительными для возникновения органической жизни. Поиски следов жизни на других небесных телах продолжаются. В составе комет обнаружены те же химические элементы, которые определяют состав бактерий и животных. Интерес исследователей вызывает спутник Юпитера Европа, на котором под ледяной поверхностью возможно существование жидкой воды.

В 1996 г. во льдах Антарктиды были найдены два метеорита, прилетевшие с Марса, содержащие органическое вещество. Химический и изотопный анализ показал идентичность состава их вещества с пробами марсианского грунта, взятыми космическими аппаратами «Викинг». Газовые включения в вещество метеоритов также оказались аналогичными составу марсианской атмосферы. Метеорит, вылетевший с поверхности Марса при ударе кометного ядра 16 млн лет назад, приземлился в Антарктиде около 14 000 лет назад. Органическое вещество метеорита (в основном



полиароматические гидрокарбонаты) было произведено в результате биологической активности бактерий 3,6 млрд лет назад.

Данные находки можно интерпретировать как существование примитивной внеземной жизни на раннем Марсе.

**Жизнь во Вселенной.** Если Земля — единственное место существования жизни в Солнечной системе, следует отметить, что Земля — лишь одна из планет в ней, а Солнце — лишь рядовая звезда в нашей Галактике и Вселенной.

В настоящее время обнаружено около сотни планетных систем у ближайших к Солнцу звёзд. Это доказывает, что существование планетных систем, подобных Солнечной, не исключительное явление.

Существуют ли при этом другие цивилизации?

В 60-х гг. XX в. американский астроном *Фрэнсис Дрэйк* попытался оценить число  $N$  высокоразвитых цивилизаций, существующих во Вселенной, с целью обнаружить их искусственные сигналы с помощью радиотелескопа.

В межзвёздной среде существует «окно прозрачности» для радиосигналов на длинах волн от 18 до 21 см. Обозначая через  $r_1$  ежегодный прирост высокоразвитых цивилизаций, а через  $L$  длительность их существования, получаем

$$N = r_1 L. \quad (272)$$

Например, при ежегодном возникновении 10 цивилизаций с продолжительностью существования 1000 лет в настоящее время мы могли бы обмениваться радиосигналами с 10 000 цивилизаций.

Дрэйк предложил оценивать ежегодный прирост высокоразвитых цивилизаций по формуле

$$r_1 = S_1 P N B T, \quad (273)$$

где  $S_1$  — число звёзд, образующихся ежегодно, учитывая, что  $10^{11}$  звёзд нашей Галактики образовались примерно за  $10^{10}$  лет,  $S_1 \approx 10$  звёзд/год,  $P$  — доля звёзд, имеющих планетную систему,  $N$  — число планет в системе,  $B$  — доля планет, где существует органическая жизнь,  $T$  — доля планет (среди планет с органической жизнью), имеющих высокоразвитую цивилизацию.

Величины  $P$ ,  $B$ ,  $T$  могут принимать значения от 0,01 до 1. В среднем Дрэйк полагал, что число высокоразвитых цивилизаций можно оценить по формуле (272) с учётом (273):

$$N \approx 10^{-4} L. \quad (274)$$

Если считать, что для обмена радиосигналами высокоразвитая цивилизация должна существовать как минимум примерно 10 000 лет, получается пессимистический прогноз:

$$N = 1,$$

т. е. мы одни во Вселенной и связь с другими цивилизациями невозможна.

Однако если исключить варианты саморазрушения высокоразвитых цивилизаций в среднем через 10 000 лет и предположить, что они в состоянии выжить больший период  $L = 10$  млн лет (как выживают наиболее приспособившиеся виды животных в процессе земной эволюции), то согласно формуле (274)

$$N = 1000.$$

В 1967 г. радиоастрономами были зарегистрированы регулярные радиосигналы с периодичностью от миллисекунды до секунды, стабильность которых превосходила точность лучших атомных часов. Эти сигналы исходили от нейтронных звезд — *пульсаров*, оставшихся от взрыва сверхновых. Пульсары напоминают вращающиеся магниты. Интенсивность излучения пульсара периодически изменяется из-за его вращения.

Маловероятный, но закономерный процесс возникновения жизни во Вселенной образно охарактеризовал известный геолог *Престо Клауд*: «Звёзды умерли, чтобы дать жизнь нам».

## ВОПРОСЫ

1. Назовите наиболее ранние свидетельства возникновения жизни на Земле.
2. Каковы необходимые условия для возникновения органической жизни на планете?
3. Есть ли аргументы в пользу существования жизни в Солнечной системе (вне Земли)?
4. Приведите оценки Дрэйка числа высокоразвитых цивилизаций во Вселенной.
5. Поясните причину периодичности излучения пульсаров.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

■ **Световой год** — расстояние, проходимое световым лучом за один год ( $1 \text{ св. г.} = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ м} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м} \approx 10^{16} \text{ м}$ ).

■ **Астрофизика** — раздел астрономии, изучающий физические свойства астрономических объектов.

■ **Закон Хаббла**: скорость разбегания галактик прямо пропорциональна расстоянию до них:

$$v = H_0 r,$$

где  $H_0 = 70 \text{ км/с/Мпк}$  — постоянная Хаббла.

■ **Планковская длина**

$$R_p = \frac{\hbar}{M_p c} = \sqrt{\frac{C\hbar}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ м.}$$

■ **Планковское время**

$$t_p = \frac{R_p}{c} = \sqrt{\frac{C\hbar}{c^5}} \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

■ **Температура в планковскую эпоху**

$$T_p \approx 10^{32} \text{ К.}$$



- **Зависимость температуры  $T$  (в К) Вселенной от времени  $t$  (в с):**

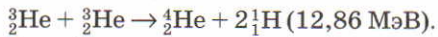
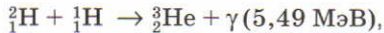
$$T = \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}.$$

- **Реакции нуклеосинтеза в ранней Вселенной:**



- **Реликтовое излучение** — излучение, не взаимодействующее с веществом в расширяющейся Вселенной, имеющее в настоящее время температуру около 3 К. Анизотропия реликтового излучения подтверждает теоретические представления об образовании астрономических структур.

- **Протон-протонный цикл** — наиболее вероятная цепочка реакций с превращением четырёх протонов в одно ядро гелия:



В скобках указана энергия, выделяющаяся в результате реакции. *Термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звёзд.*

- **Эволюция звезды зависит от её массы:**

$m < 10M_{\odot}$  → белый карлик,

$10M_{\odot} < m < 30M_{\odot}$  → нейтронная звезда,

$m > 30M_{\odot}$  → 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.

- **Комета** — планетеземаль диаметром от 5 до 500 км, покрытая льдом. Большинство наблюдаемых комет находится в облаке Оорта на расстоянии около 50 000 а. е. от Солнца.

- Три необходимых условия для возникновения органической жизни на планете:

масса планеты — от 0,8 до  $4M_{\odot}$ ;

масса центральной звезды — от 0,7 до  $1,2M_{\odot}$ ;

расстояние планеты от центральной звезды — от 0,8 до 1,6 а. е.

- **Пульсар** — вращающаяся нейтронная звезда, интенсивность излучения которой периодически изменяется.

# Предметно-именной указатель<sup>1</sup>

- А**бсолютно чёрное тело 290  
Абсолютный показатель преломления 210  
Адроны 380  
Активность радиоактивного вещества 349  
Акцепторы 155  
Альфа-распад 343  
Альфа-частицы 308  
Ампер А. 68  
Амперметр 42  
Андерсон К. 375  
Анизотропия реликтового излучения 414  
Аннигиляция 376  
Антикварк 383  
Антинейтрино 378  
Античастицы 374  
Астероиды 432  
Астрономические структуры 389  
Астрофизика 389  
Атом водорода 310  
— теория Бора 310  
— энергетический спектр 312  
Атомная бомба 364
- Б**ардин Дж. 24  
Барионы 380  
Басов Н. Г. 320  
Белый карлик 420  
Беккерель (единица активности радиоактивного вещества) 349  
Бета-распад 345  
Бете Х. 417  
Биберман Л. М. 303  
Бипризма Френеля 275  
Большой взрыв 401  
Бозоны 374  
— промежуточные 379  
Бор Н. 310
- В**авилов С. И. 317  
Вакуумный диод 329  
— триод 329  
Ван дер Меер С. 379  
Вебер (единица магнитного потока) 91  
Вектор магнитной индукции 64  
— модуль 71  
Векторные диаграммы 129  
Взаимодействие сильное 334  
— слабое 379  
Вибратор Герца 169  
Виллар П. 188  
Внутреннее сопротивление источника тока 36  
Водородная бомба 365  
Волновой фронт 174  
Вольта А. 8  
Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода 159  
— — фотоэффекта 296  
Вольтметр 43  
Время релаксации 118  
Вспышка сверхновой 422  
Выпрямление однополупериодное 160  
— двухполупериодное 160
- Г**азопылевой диск 426  
Гальвакс В. 295  
Гальванический элемент 8  
Гальванопластика 57  
Гальваностегия 57  
Гамма-лучи 188  
Гамов Г. 401  
Генератор на транзисторе 165  
Генератор переменного электрического тока 123

<sup>1</sup> Номер страницы указан по первому упоминанию термина.



- Генри Дж. 116  
 Генри (единица индуктивности) 94  
 Герц Г. 169  
 Гильберт У. 62  
 Гипероны 381  
 Главное квантовое число 310  
 Глэшоу Ш. 379  
 Глюоны 386  
 Грэй (доза поглощённого излучения) 367  
 Гюйгенс Х. 202
- Д**ействующее значение силы переменного тока (напряжения) 135  
 Декарт Р. 62  
 Деление ядер 352  
 Детектирование сигнала 196  
 Дефекты зрения 254  
 Джинс Д. 415  
 Джоуль Дж. 47  
 Диод полупроводниковый 159  
 Дисперсия света 215  
 Дифракция света 277  
 — на щели 278  
 — на решётке 284  
 Дифракция отдельных фотонов 300  
 Длина волны де Бройля 302  
 Добавочное сопротивление 44  
 Дрэйк Ф. 436  
 Дырка 21
- Е**стественный радиационный фон 368
- З**ависимость удельного сопротивления от температуры 18  
 — для полупроводников 20  
 — для проводников 18  
 Закон Ампера 71  
 — Джоуля—Ленца 47  
 — Ома 15  
 — — для замкнутой цепи 36  
 — — — с последовательно соединёнными источниками тока 38  
 — для однородного проводника 13
- Закон отражения света 203  
 — преломления света 208  
 — радиоактивного распада 347  
 — смещения Вина 293  
 — сохранения барионного заряда 382  
 — — лептонного заряда 378  
 — Стефана—Больцмана 294  
 — Фарадея (для электролиза) 55  
 — Фарадея—Максвелла 111  
 — Хаббла 393  
 Запирающий контактный слой 157  
 Зарядка и разрядка конденсатора 136  
 Зарядовая симметрия сильного взаимодействия 336  
 Зарядовое число 334  
 Земной магнетизм 86  
 Зельдович Я. Б. 415  
 Зиверт (единица эквивалентной дозы поглощённого излучения) 368  
 Зоны Френеля 280
- И**злучение вынужденное (индуцированное) 319  
 — инфракрасное 185  
 — лазерное 321  
 — радиоактивное 367  
 — спонтанное 319  
 — тепловое 290  
 — ультрафиолетовое 186  
 Изображение предмета в плоском зеркале 205  
 — при преломлении света 217  
 — в собирающей линзе 230  
 — в рассеивающей линзе 244  
 Изотопический эффект в сверхпроводимости 23  
 Инверсная населённость 321  
 Индуктивность контура 94  
 Индукционный ток 110  
 Интегральная светимость 293  
 Интерференция волн 265  
 — света 273

- Инфляционная фаза 405  
Источник тока 8
- К**амерлинг Оннес Х. 22  
Карлейл А. 55  
Катодолюминесценция 317  
Квазар 424  
Квант излучения 292  
Кварки 381  
Кварк-лептонная симметрия 385  
Клауд П. 437  
Когерентность 266  
Койпер Д. 426  
Кометы 429  
Комптон А. 336  
Комптоновская длина волны 336  
Контур колебательный 145  
— — вынужденные колебания 149  
— — резонанс 152  
— — свободные колебания 145  
— — частота и период собственных колебаний 147  
Корпускулярно-волновой дуализм 299  
Космология 389  
Коэрцитивная сила 102  
Коэффициент размножения нейтронов 355  
Красное смещение 397  
Красный гигант 420  
Кривая намагничивания 101  
Критическая масса 355  
Критическая плотность Вселенной 400  
Критическая температура 22  
Купер Л. 24  
Кюри П. 103
- Л**азер 318  
Ленц Э. Х. 112  
Лептоны 377  
Либби Ф. 350  
Линза 222  
— рассеивающая 224  
— собирающая 223  
— тонкая 224
- Линии магнитной индукции 67  
Лоренц Х. 80  
Лупа 256  
Люминесценция 317
- М**агнитная проницаемость среды 97  
Магнитный поток 91  
Магнитоэлектрическая индукция 140  
Максвелл Дж. 169  
Маркони Г. 192  
Масса Джинса 415  
Массовое число 338  
Масс-спектрограф 83  
Мезоны 380  
Мейман Т. 320  
Миллер С. 434  
Млечный Путь 390  
Модель Фридмана 399  
Модуляция 193  
— амплитудная 193  
— частотная 197  
Мостик Уитстона 32  
Мощность электрического тока 48
- Н**апряжение зажигания 325  
Нейтрино 346  
— мюонное 378  
— таонное 378  
— электронное 378  
Нейтрон 333  
Нейтронная звезда 422  
Никольсон У. 55  
Нормальные электродные потенциалы 9  
Носители тока 3  
Нуклеосинтез 409  
Нуклоны 334
- Облако** Оорта 432  
Объектив 257  
Образование галактик 415  
— звёзд 416  
— сверхскоплений галактик 414  
— Солнечной системы 424



- Обратная связь 166  
 Однородное магнитное поле 74  
 Ом Г. 14  
 Ом (единица сопротивления) 14  
 Оорт Я. 432  
 Оптика волоконная 213  
 — волновая 265  
 — геометрическая 201  
 Оптическая сила линзы 227  
 Оптический микроскоп 257  
 — телескоп-рефрактор 259  
 Опыт Генри 116  
 — Герца 169  
 — Резерфорда 308  
 — Столетова 295  
 — Фарадея (с катушками) 113  
 — Эрстеда 63  
 — Юнга 273  
 Органическая жизнь во Вселенной 434  
 — в Солнечной системе 435  
 — на Земле 434  
 Отражение волн 203
- П**арамагнетизм 98  
 Парамагнетики 96  
 Парсек 394  
 Пары куперовские 24  
 Паули В. 346  
 Пензиас А. 412  
 Перегрин П. 61  
 Переменный ток 123  
 Период полураспада 347  
 Периоды эволюции Вселенной 403  
 Петля гистерезиса 102  
 Плазменный экран 328  
 Планетарная туманность 422  
 Планетеземали 426  
 Планеты-гиганты 430  
 — земной группы 427  
 Планковская длина 402  
 — масса 402  
 — плотность 403  
 — энергия 403
- Планковское время 402  
 Плоскость поляризации 174  
 Поглощение света 314  
 Позитрон 376  
 Поле магнитное 63  
 — вихревое 68  
 Полное внутреннее отражение 212  
 Полупроводники 154  
 — дырочные (*p*-типа) 155  
 — собственные 154  
 — примесные 155  
 — электронные (*n*-типа) 156  
 Полюсы магнита 61  
 Поперечное увеличение линзы 233  
 Попов А. С. 192  
 Постоянная Планка 292  
 — Стефана—Больцмана 294  
 — Фарадея 56  
 — Хаббла 394  
 Постулаты Бора  
 — первый 310  
 — второй 315  
 Поток жидкости 90  
 Пояс Койпера 426  
 Правило буравчика (правого винта) 65  
 — для витка с током 67  
 — для прямого тока 65  
 — левой руки 71  
 — Ленца 112  
 — правой руки 65  
 Преломление света 208  
 Призма полного внутреннего отражения 221  
 Примеси в полупроводниках 155  
 — акцепторные 155  
 — донорные 155  
 Принцип Гюйгенса 201  
 — Гюйгенса—Френеля 280  
 — Паули 374  
 — суперпозиции 66  
 Проводимость  
 — дырочная 21  
 — собственная 21

- Проводимость электрическая 29  
— электронная 155  
Просветление оптики 275  
Протозвезда 418  
Протон-протонный цикл 417  
Протон 333  
Протонно-нейтронная модель ядра 334  
Прохоров А. М. 320  
Пуассон С. Д. 277  
Пульсар 437
- Работа выхода электрона из металла** 297  
— электрического тока 45  
Радиационные пояса Земли 86  
Радиоактивность естественная 343  
— искусственная 352  
Радиоактивные серии 350  
Радиовещание 193  
Радиолокация 192  
Радиосвязь 190  
Радиотелефонная связь 193  
Радиус атомного ядра 338  
— боровской орбиты 311  
Разность хода волн 270  
Разрешающая способность дифракционной решётки 286  
Рафинирование металлов 57  
Реакция ядерная самоподдерживающаяся 355  
— — синтез 361  
— — цепная 354  
Резерфорд Э. 308  
Резистор 17  
— в цепи переменного тока 133  
Реликтовое излучение 412  
Рентген В. 187  
Риги А. 295  
Риттер И. 186  
Руббин А. К. 379
- Самоиндукция** 116  
Сахаров А. Д. 363
- Сверхпроводимость 22  
— высокотемпературная 25  
— низкотемпературная 22  
Свет видимый 185  
— линейно поляризованный 175  
Световод 213  
Световой год 389  
Серия Бальмера 315  
— Брэггата 316  
— Лаймана 316  
— Пашена 316  
— Пфунда 316  
Сила Ампера 71  
— тока 5  
— Лоренца 79  
Синтез тяжёлых элементов 423  
Собственная индукция 74  
Соединение проводников 26  
— параллельное 28  
— последовательное 26  
Соотношения неопределённостей Гейзенберга 303  
Сопротивление проводника 14  
— активное 136  
— ёмкостное 140  
— индуктивное 142  
— реактивное 141  
— удельное 16  
Спектр атома водорода 312  
— линейчатый 315  
— поглощения 316  
— сплошной 317  
— электромагнитных волн 183  
Спектральная плотность энергетической светимости 291  
Спектральный анализ 317  
Спин кварка 381  
— нуклона 374  
— электрона 98  
Степень диссоциации 54  
Столетов А. Г. 295  
Сторонние силы 11  
Сушкин Н. Г. 303



- Т**амм И. Е. 363  
 Таунс Ч. 320  
 Тейлор Дж. 300  
 Температура Кюри 103  
 Температурный коэффициент сопротивления 19  
 Термоядерный синтез 363  
 Тесла (единица магнитной индукции) 72  
 Ток замыкания 117  
 — размыкания 117  
 — проводимости 138  
 — смещения 139  
 — электрический 4  
 Томсон У. 147  
 Транзистор 162  
 Трансформатор 119  
 — повышающий 120  
 — понижающий 121  
**У**гол отражения 205  
 — падения 204  
 — полного внутреннего отражения 213  
 — преломления 209  
 Уилсон Р. 412  
 Ультрафиолетовая катастрофа 291  
 Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта 297  
 Ури Х. 434  
 Усилитель на транзисторе 164  
 Условие интерференционного максимума 269  
 — минимума 270  
 — когерентности волн 266  
 Условия возникновения жизни 435  
**Ф**абрикант В. А. 303  
 Фейнман Р. 336  
 Фарадей М. 110  
 Фермионы 374  
 Ферромагнетики 97  
 — магнито-жесткие 102  
 — магнито-мягкие 102  
 Флуоресценция 317  
 Фокальная плоскость линзы 228  
 Фокус, фокусное расстояние линзы 225  
 Формула линзы 236  
 — Планка 292  
 Фосфоресценция 317  
 Фотон 294  
 Фотоэффект 295  
 — опыты Столетова 295  
 — законы 296  
 — красная граница 298  
 Фридман А. А. 399  
 Фундаментальные частицы 374  
**Х**аббл Э. 393  
 Химический состав межзвёздного вещества 424  
 Хронология образования Солнечной системы 433  
**Ц**вевой заряд кварков 384  
 Циклотрон 84  
**Ш**вингер Дж. 379  
 Ширина канала связи 195  
 Шриффер Дж. 24  
 Шунт 42  
**Ч**едвик Дж. 333  
 Человеческий глаз строение 250  
 — — аккомодация 252  
 — — ближняя точка 253  
 — — дальняя точка 253  
 Чёрная дыра 423  
**Э**волюция звёзд 418  
 Эйнштейн А. 297  
 Электрический пробой газа при высоком давлении 324  
 — — разреженного газа 326  
 Электрический разряд в газах дуговой 327  
 — — искровой 328  
 — — коронный 328  
 — — несамостоятельный 323  
 — — самостоятельный 324  
 — — тлеющий 327

- Электрический ток в вакууме 329  
Электрическая лавина 325  
— лампа 329  
Электродвижущая сила 12  
— — в проводнике, движущемся в магнитном поле 107  
— — индукции 108  
— — самоиндукции 116  
Электролиз 54  
Электролит 53  
Электролитическая диссоциация 53  
Электромагнитная волна 169  
— — давление 181  
— — импульс 182  
— — интенсивность 178  
— — луч 176  
— — поляризация 174  
— — фронт 174  
— — энергия 177  
— индукция 110  
Электрометаллургия 57  
Электрон 3  
Электрон-вольт 363  
Энергия ионизации 314  
— связи нуклонов в ядре (удельная) 339  
Эпоха планковская 403  
— электрослабая 406  
Эра адронная 407  
— атомов 412  
— излучения 409  
— кварков 407  
— лептонная 408  
— нуклеосинтеза 409  
Эрстед Х. 63  
**Юнг Т.** 273  
**Явление насыщения в ферромагнетике** 101  
Ядерный реактор 357  
— радиационная защита 358  
Ядра магические 337  
— дважды магические 338



# Оглавление

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

### 1. Постоянный электрический ток

§ 1. Электрический ток . . . . .	3
§ 2. Сила тока . . . . .	5
§ 3. Источник тока . . . . .	7
§ 4. Источник тока в электрической цепи . . . . .	10
§ 5. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи) . . . . .	13
§ 6. Сопротивление проводника . . . . .	16
§ 7. Зависимость удельного сопротивления проводников и полупроводников от температуры . . . . .	18
§ 8. Сверхпроводимость . . . . .	22
§ 9. Соединения проводников . . . . .	26
§ 10. Расчёт сопротивления электрических цепей . . . . .	30
§ 11. Закон Ома для замкнутой цепи . . . . .	34
§ 12. Расчёт силы тока и напряжения в электрических цепях . . . . .	39
§ 13. Измерение силы тока и напряжения . . . . .	42
§ 14. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля—Ленца . . . . .	45
§ 15. Передача мощности электрического тока от источника к потребителю . . . . .	49
§ 16. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов . . . . .	52

### 2. Магнетизм

§ 17. Магнитное взаимодействие . . . . .	61
§ 18. Магнитное поле электрического тока . . . . .	63
§ 19. Магнитное поле . . . . .	67
§ 20. Действие магнитного поля на проводник с током . . . . .	70
§ 21. Рамка с током в однородном магнитном поле . . . . .	73
§ 22. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы . . . . .	79
§ 23. Масс-спектрограф и циклотрон . . . . .	83
§ 24. Пространственные траектории заряженных частиц в магнитном поле . . . . .	85
§ 25. Взаимодействие электрических токов . . . . .	87
§ 26. Магнитный поток . . . . .	90
§ 27. Энергия магнитного поля тока . . . . .	92
§ 28. Магнитное поле в веществе . . . . .	95
§ 29. Ферромагнетизм . . . . .	99

### 3. Электромагнетизм

§ 30. ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле . . . . .	107
§ 31. Электромагнитная индукция . . . . .	110
§ 32. Способы получения индукционного тока . . . . .	113
§ 33. Опыты Генри . . . . .	116
§ 34. Использование электромагнитной индукции . . . . .	119
§ 35. Генерирование переменного электрического тока . . . . .	123
§ 36. Передача электроэнергии на расстояние . . . . .	126

#### 4. Цепи переменного тока

§ 37. Векторные диаграммы для описания переменных токов и напряжений	130
§ 38. Резистор в цепи переменного тока	133
§ 39. Конденсатор в цепи переменного тока	136
§ 40. Катушка индуктивности в цепи переменного тока	142
§ 41. Свободные гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре	145
§ 42. Колебательный контур в цепи переменного тока	149
§ 43. Примесный полупроводник — составная часть элементов схем	154
§ 44. Полупроводниковый диод	157
§ 45. Транзистор	162

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

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

§ 46. Электромагнитные волны	169
§ 47. Распространение электромагнитных волн	172
§ 48. Энергия, переносимая электромагнитными волнами	177
§ 49. Давление и импульс электромагнитных волн	181
§ 50. Спектр электромагнитных волн	183
§ 51. Радио- и СВЧ-волны в средствах связи	189
§ 52. Радиотелефонная связь, радиовещание	193

#### 6. Геометрическая оптика

§ 53. Принцип Гюйгенса	201
§ 54. Отражение волн	203
§ 55. Преломление волн	208
§ 56. Дисперсия света	215
§ 57. Построение изображений и хода лучей при преломлении света	217
§ 58. Линзы	222
§ 59. Собирающие линзы	225
§ 60. Изображение предмета в собирающей линзе	230
§ 61. Формула тонкой собирающей линзы	236
§ 62. Рассеивающие линзы	240
§ 63. Изображение предмета в рассеивающей линзе	244
§ 64. Фокусное расстояние и оптическая сила системы из двух линз	247
§ 65. Человеческий глаз как оптическая система	250
§ 66. Оптические приборы, увеличивающие угол зрения	256

#### 7. Волновая оптика

§ 67. Интерференция волн	265
§ 68. Взаимное усиление и ослабление волн в пространстве	268
§ 69. Интерференция света	273
§ 70. Дифракция света	277
§ 71. Дифракционная решётка	284



<b>8. Квантовая теория электромагнитного излучения вещества</b>	
§ 72. Тепловое излучение	290
§ 73. Фотоэффект	295
§ 74. Корпускулярно-волновой дуализм	299
§ 75. Волновые свойства частиц	302
§ 76. Строение атома	307
§ 77. Теория атома водорода	310
§ 78. Поглощение и излучение света атомом	314
§ 79. Лазер	318
§ 80. Электрический разряд в газах	323

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

<b>9. Физика атомного ядра</b>	
§ 81. Состав атомного ядра	333
§ 82. Энергия связи нуклонов в ядре	339
§ 83. Естественная радиоактивность	343
§ 84. Закон радиоактивного распада	347
§ 85. Искусственная радиоактивность	352
§ 86. Использование энергии деления ядер. Ядерная энергетика	357
§ 87. Термоядерный синтез	361
§ 88. Ядерное оружие	364
§ 89. Биологическое действие радиоактивных излучений	366

## 10. Элементарные частицы

§ 90. Классификация элементарных частиц	373
§ 91. Лептоны как фундаментальные частицы	377
§ 92. Классификация и структура адронов	380
§ 93. Взаимодействие кварков	384

## ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОФИЗИКИ

### 11. Эволюция Вселенной

§ 94. Структура Вселенной, её расширение	389
§ 95. <b>Расширяющаяся Вселенная</b>	399
§ 96. Космологическая модель ранней Вселенной. Эра излучения	401
§ 97. Нуклеосинтез в ранней Вселенной	409
§ 98. Образование астрономических структур	414
§ 99. Эволюция звёзд	418
§ 100. Образование Солнечной системы	424
§ 101. Эволюция Солнечной системы	427
§ 102. <b>Органическая жизнь во Вселенной</b>	434

Предметно-именной указатель	439
-----------------------------	-----

## ЕДИНИЦЫ

ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

ЕДИНИЦА

ОСНОВНЫЕ	наименование	обозначение	наименование	обозначение
	Длина	$l$	метр	м
	Время	$t$	секунда	с
	Масса	$m$	килограмм	кг
	Количество вещества	$\nu$	моль	моль
	Термодинамическая температура	$T$	кельвин	К
	Сила электрического тока	$I$	ампер	А
	Сила света	$I_e$	кандела	кд

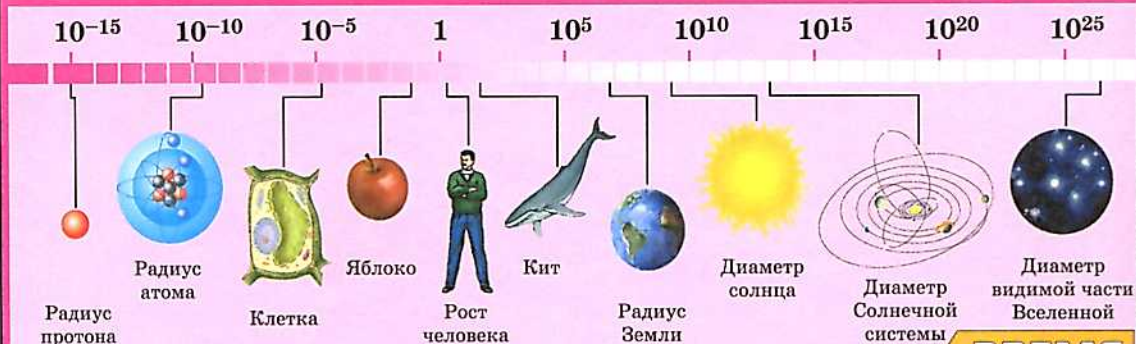
ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

ЕДИНИЦА

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ	наименование	обозначение	наименование	обозначение
	Плоский угол	$\alpha$	радиан	рад
	Телесный угол	$\Omega$	стерадиан	ср

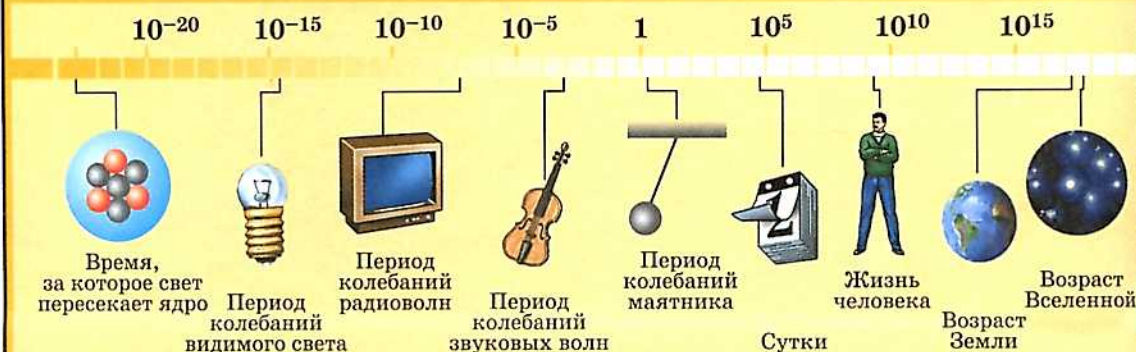
## ДЛИНА

метр



## ВРЕМЯ

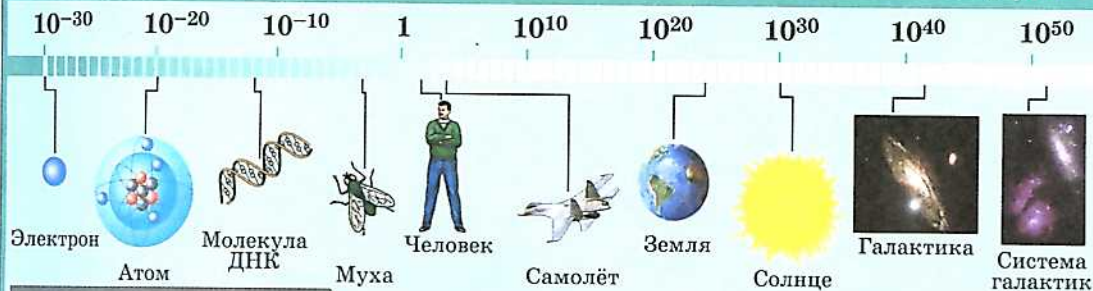
секунда





## МАССА

килограмм



## ТЕМПЕРАТУРА

Кельвин



## ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ

Плотности газов приведены при нормальных условиях:  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па,  $t = 0^\circ\text{C}$

Водород	0,09	Дёготь	$1,02 \cdot 10^3$	Алмаз	$(3,0 \div 3,5) \cdot 10^3$
Воздух	1,29	Морская вода	$1,025 \cdot 10^3$	Железо	$7,9 \cdot 10^3$
Пенопласт	30	Кровь	$1,05 \cdot 10^3$	Никель	$8,8 \cdot 10^3$
Бальзовое дерево	$0,12 \cdot 10^3$	Резина	$1,2 \cdot 10^3$	Медь	$8,9 \cdot 10^3$
Пробка	$(0,2 \div 0,3) \cdot 10^3$	Кирпич	$(1,4 \div 2,2) \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Сосна	$(0,4 \div 0,6) \cdot 10^3$	Сахар	$1,6 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Дуб	$(0,6 \div 0,9) \cdot 10^3$	Магний	$1,7 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$
Эфир	$0,74 \cdot 10^3$	Кость	$(1,5 \div 2,0) \cdot 10^3$	Уран	$18,7 \cdot 10^3$
Этиловый спирт	$0,79 \cdot 10^3$	Слоновая кость	$(1,8 \div 1,9) \cdot 10^3$	Золото	$19,3 \cdot 10^3$
Бензин	$0,88 \cdot 10^3$	Глина	$(1,8 \div 2,6) \cdot 10^3$	Вольфрам	$19,3 \cdot 10^3$
Масло	$0,9 \cdot 10^3$	Стекло	$(2,4 \div 2,8) \cdot 10^3$	Платина	$21,5 \cdot 10^3$
Лёд	$0,92 \cdot 10^3$	Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$	Осмий	$22,5 \cdot 10^3$
Вода ( $3,98^\circ\text{C}$ )	$1,00 \cdot 10^3$	Цемент	$(2,7 \div 3,0) \cdot 10^3$		

# МЕХАНИКА

# ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. С

## ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Длина	$l$	метр	м	м
Площадь	$S$	квадратный метр	$m^2$	$m^2$
Объём	$V$	кубический метр	$m^3$	$m^3$
Время	$t$	секунда	с	с
Скорость	$v$	метр в секунду	м/с	м/с
Ускорение	$a$	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>
Частота	$\nu$	герц	Гц	1/с
Угловая скорость	$\omega$	радиан в секунду	рад/с	рад/с
Масса	$m$	килограмм	кг	кг
Плотность	$\rho$	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
Сила	$F$	ньютон	Н	кг·м/с <sup>2</sup>
Импульс	$p$	килограмм-метр в секунду	кг·м/с	кг·м/с
Давление	$p$	паскаль	Па	кг/(м·с <sup>2</sup> )
Работа	$A$	джоуль	Дж	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Мощность	$P$	ватт	Вт	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>3</sup>
Момент силы	$M$	ньютон-метр	Н·м	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>

константа	обозначение	значение
Гравитационная постоянная	$G$	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Масса электрона	$m_e$	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса протона	$m_p$	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса нейтрона	$m_n$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

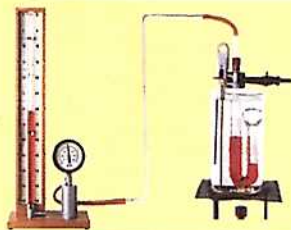


# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## ВЕЛИЧИНА

## ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Количество теплоты	$Q$	джоуль	Дж	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Внутренняя энергия	$U$	джоуль	Дж	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Удельная теплоёмкость	$c$	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	м <sup>2</sup> /(с <sup>2</sup> ·К)
Удельная теплота плавления	$\lambda$	джоуль на килограмм	Дж/кг	м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Удельная теплота парообразования	$r$	джоуль на килограмм	Дж/кг	м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Поверхностное натяжение	$\sigma$	ньютон на метр	Н/м	кг/с <sup>2</sup>



константа	обозначение	значение
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R$	$8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$



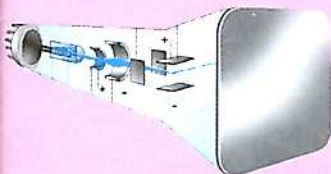
# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ

## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### ВЕЛИЧИНА

### ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение
Электрический заряд	$Q$	кулон	Кл А · с
Поверхностная плотность заряда	$\sigma$	кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup> А · с/м <sup>2</sup>
Объёмная плотность заряда	$\rho$	кулон на кубический метр	Кл/м <sup>3</sup> А · с/м <sup>3</sup>
Напряжённость электростатического поля	$E$	ньютон на кулон вольт на метр	Н/Кл кг · м/(А · с <sup>3</sup> ) В/м
Потенциал	$\phi$	вольт	В кг · м <sup>2</sup> /(А · с <sup>3</sup> )
Электрическая ёмкость	$C$	фарад	Ф А <sup>2</sup> · с <sup>4</sup> /(кг · м <sup>2</sup> )
Объёмная плотность энергии электростатического поля	$w$	джоуль на кубический метр	Дж/м <sup>3</sup> кг/(м · с <sup>2</sup> )



константа	обозначение	значение
Заряд электрона	$e$	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12}$ Кл <sup>2</sup> /(Н · м <sup>2</sup> )
Постоянная Фарадея	$F$	$9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль
Магнитная проницаемость вакуума	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Вб/(А · м)

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА

### ВЕЛИЧИНА

### ЕДИНИЦА

наименование	обозначение	наименование	обозначение
Электрическое сопротивление	$R$	ом	Ом кг · м <sup>2</sup> /(А <sup>2</sup> · с <sup>3</sup> )
Удельное сопротивление	$\rho$	ом-метр	Ом · м кг · м <sup>3</sup> /(А <sup>2</sup> · с <sup>3</sup> )
Плотность электрического тока	$j$	ампер на квадратный метр	А/м <sup>2</sup> А/м <sup>2</sup>
Магнитная индукция	$B$	тесла	Тл кг/(А · с <sup>2</sup> )
Магнитный поток	$\Phi$	вебер	Вб кг · м <sup>2</sup> /(А · с <sup>2</sup> )
Индуктивность	$L$	генри	Гн кг · м <sup>2</sup> /(А <sup>2</sup> · с <sup>2</sup> )
Взаимная индуктивность	$M$	генри	Гн кг · м <sup>2</sup> /(А <sup>2</sup> · с <sup>2</sup> )
Оптическая сила	$D$	диоптрия	дптр м <sup>-1</sup>

константа	обозначение	значение
Скорость света в вакууме	$c$	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

