

ИННОВАЦИОННАЯ  
ШКОЛА

ФГОС

ИННОВАЦИОННАЯ  
ШКОЛА

ФГОС

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ  
И ВОЛНЫ

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ



«РУССКОЕ СЛОВО»

Э.Т. ИЗЕРГИН

ФИЗИКА

11

# Э.Т. ИЗЕРГИН ФИЗИКА

11

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ



«РУССКОЕ СЛОВО»



ФГОС  
ИННОВАЦИОННАЯ ШКОЛА

**Э.Т. ИЗЕРГИН**  
**ФИЗИКА**

**Учебник для 11 класса  
общеобразовательных организаций**

Базовый уровень

*Допущено Министерством просвещения  
Российской Федерации*

*Соответствует  
Федеральному государственному  
образовательному стандарту*

Москва  
«Русское слово»  
2021



УДК 373.167.1:53\*11(075.3)

ББК 22.3я721

ИЗ2

Учебник включён в Федеральный перечень учебников в соответствии с приказом Министерства просвещения Российской Федерации от 23 декабря 2020 года № 766.

Эксперты:

*Атепалихин М.С., Величко А.Н., Шeverдин И.В., Дмитришина Е.В.*

Под научной редакцией:

*Алевтины Алексеевны Фадеевой*, доктора педагогических наук, профессора;  
*Альфиса Суфияновича Гаязова*, доктора педагогических наук, профессора, члена-корреспондента РАО, президента Академии наук Республики Башкортостан

**Изергин Э.Т.**

ИЗ2 Физика: учебник для 11 класса общеобразовательных организаций. Базовый уровень / Э.Т. Изергин. — М.: ООО «Русское слово — учебник», 2021. — 224 с.: ил. — (ФГОС. Инновационная школа).

ISBN 978-5-533-02003-9

В учебнике изложены основные физические теории в объёме курса физики 10—11 классов базового уровня. Учебник знакомит школьников с основными разделами физики, методами физического познания и математического описания физических явлений.

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования, Примерной основной образовательной программе и входит в систему «Инновационная школа».



УДК 373.167.1:53\*11 (075.3)

ББК 22.3я721

ISBN 978-5-533-02003-9

© Э.Т. Изергин, 2021

© ООО «Русское слово — учебник», 2021

*Учебное издание*

**ФГОС**

**Инновационная школа**

**Изергин Эдуард Тимофеевич**

**ФИЗИКА**

**Учебник для 11 класса общеобразовательных организаций**

**Базовый уровень**

Руководитель центра естественно-научных дисциплин *С.В. Банников*

Редактор *И.А. Мецержакова*

Обложка и серийное оформление *Н.В. Кануриной*

Художники *А.С. Побезинский, Н.В. Канурина*

Корректор *Л.Н. Федосеева*

Вёрстка *Е.А. Бреславского*

Подписано в печать 27.05.21. Формат 70×90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 16,38. Тираж 1000 экз. Изд. № 24017\_20. Заказ № 142-06/21.

ООО «Русское слово — учебник».

ISBN 978-5-533-02003-9

115035, Москва, Овчинниковская наб., д. 20, стр. 2.

Тел.: (495) 969-24-54, (499) 689-02-65

(отдел реализации и интернет-магазин).

Вы можете приобрести книги в интернет-магазине:

[www.russkoe-slovo.ru](http://www.russkoe-slovo.ru) e-mail: [zakaz@russlo.ru](mailto:zakaz@russlo.ru).

Отпечатано в ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга».

Тел.: (495) 252-75-10.

<http://www.raduga-print.ru>



9 785533 020039



# Введение

## Дорогие друзья!

Этот учебник завершает изучение курса физики на базовом уровне. Начинается учебник с продолжения раздела «Электродинамика». Далее следуют разделы «Оптика и атомная физика» и «Элементы астрономии». Учебник знакомит с современными теориями: теорией относительности и элементами квантовой механики.

Сложные вопросы современной физики рассматриваются в основном на качественном уровне. Ряд понятий, знакомство с которыми осуществлялось в 7—9 классах, расширяется и углубляется.

После каждого параграфа предлагаются вопросы, задания и задачи разного уровня сложности. В конце каждой главы предлагаются лабораторные работы, тестовые задания для проверки уровня усвоения темы, задачи повышенной сложности и таблица с основными изученными в данной главе понятиями, формулами и законами.

Параграфы и материалы, отмеченные звёздочкой (\*), предназначены для самостоятельного изучения теми обучающимися, которые готовятся к экзамену по физике.

В учебнике приняты следующие условные обозначения:

**Повторяем** изученный материал.

**Изучаем** новую тему.

**Отвечаем** на вопросы, выполняем задания.

**Решаем** задачи.

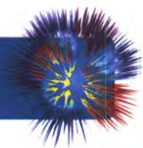




# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

(Продолжение)

## Глава I. Электромагнетизм



### § 1. Магнитное поле тока. Индукция магнитного поля



1. Кем и когда была на опыте показана связь между электрическими и магнитными явлениями?

2. Какой вывод можно сделать из опыта Эрстеда?

3. Чем отличаются линии напряжённости электрического поля от линий магнитной индукции магнитного поля?

4. Каково направление линий индукции магнитного поля постоянного магнита?

1. Датским физиком Х.Х. Эрстедом в 1820 г. (рис. 1).

2. Электрический ток является источником магнитного поля.

3. Линии **напряжённости** начинаются на положительных электрических зарядах и оканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. Линии **магнитной индукции** всегда замкнуты. Магнитное поле является **вихревым**.

4. Они выходят из северного полюса магнита, входят в южный и замыкаются внутри магнита.



О постоянных магнитах и магнитном поле вы многое знаете из курса физики 7—9 классов. Постоянный магнит имеет два полюса: **северный** и **южный**. Одноимённые полюсы магнита отталкиваются, а разноимённые — притягиваются.

Вокруг постоянного магнита, а также вокруг проводников с током существует магнитное поле. Это поле не действует на органы чувств человека, но действует на некоторые металлы (железо, сталь, кобальт), на магнитную стрелку, на проводники с током.





Силовой характеристикой магнитного поля является **вектор магнитной индукции** ( $\vec{B}$ ). Магнитное поле изображается посредством **линий магнитной индукции**.

Повторим некоторые известные вам факты.

#### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. Птицы на юг улетают, / Гуси, грачи, журавли. / Вот уж последняя стая / Крыльями машет вдали (М. Ивенсен) (рис. 2).

2. Одноимённые полюсы двух магнитных стрелок **отталкиваются**, разноимённые (северный и южный) — **притягиваются**. Взаимодействие стрелок происходит на расстоянии.

3. Два параллельных проводника с током взаимодействуют: токи одного направления **притягиваются**, противоположных направлений — **отталкиваются** (опыты Ампера). Сила взаимодействия зависит от **силы тока** в каждом из проводников и от **расстояния** между проводниками.

4. На самочувствие людей оказывают влияние магнитные бури.

**Наша гипотеза:** взаимодействие постоянных магнитов, а также взаимодействие проводников с током осуществляются посредством особой материальной среды: магнитного поля.

**Проблема:** ввести средства изучения: основные физические величины, мнемонические правила.

На проводник, по которому идёт ток, в магнитном поле действует сила, называемая **силой Ампера** ( $\vec{F}_A$ ). Если два проводника с током расположены близко друг к другу (пример 3), то в магнитном поле, созданном током в первом проводнике, в соответствии с высказанной нами гипотезой на **второй** проводник действует сила Ампера. В магнитном поле, созданном током во втором проводнике, сила Ампера действует на **первый** проводник. Другими словами, проводники с током взаимодействуют посредством магнитного поля. Уточним понятие магнитного поля.



Рис. 1. Опыт Эрстеда

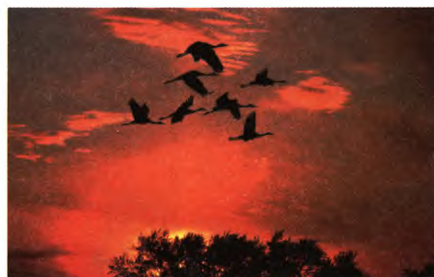
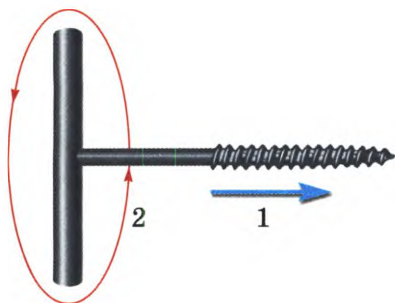


Рис. 2. Птицы ориентируются в магнитном поле Земли





**Магнитное поле — это особый вид материи, осуществляющий взаимодействие движущихся зарядов.**



**Рис. 3.** Правило буравчика

Вспомним приёмы определения направления индукции магнитного поля тока и направления силы Ампера.

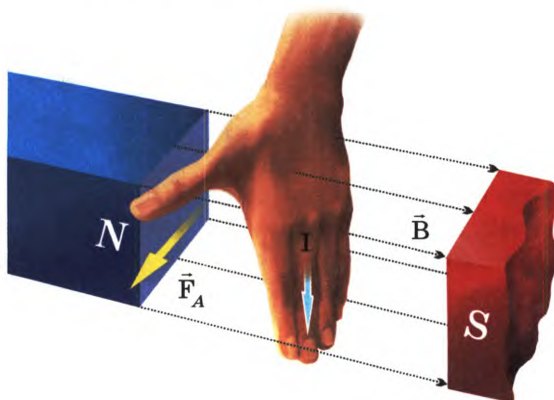
Направление прямого и кругового тока и направление линий магнитной индукции связаны **правилом буравчика**:

Если направление ввинчивания буравчика совместить с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции будет совпадать с направлением вращения ручки буравчика (рис. 3).

Если направление вращения ручки буравчика совместить с направлением кругового тока, то направление ввинчивания буравчика совпадёт с направлением линии магнитной индукции.

Направление силы Ампера можно определить по правилу левой руки.

Если расположить левую руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре пальца показывали направление тока в проводнике, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Ампера (рис. 4).



**Рис. 4.** Правило левой руки



Пусть в магнитном поле уравновешен проводник. Пропустим по проводнику ток (рис. 5): равновесие нарушится, потому что действующая на проводник сила Ампера направлена вертикально вниз.

Модуль этой силы зависит от силы тока в проводнике, от длины той части проводника, которая находится в магнитном поле (активной части), и магнитного поля (вектора магнитной индукции). Однако отношение силы, действующей на проводник с током (силы Ампера), к длине активной части проводника и силе тока в нём зависит только от магнитного поля.

Найти модуль вектора магнитной индукции или магнитную индукцию можно по формуле:

$$B = \frac{F_{\text{макс.}}}{IL}$$

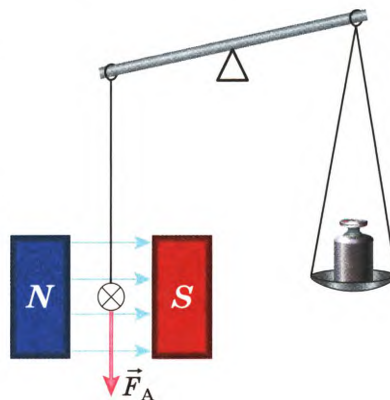


Рис. 5. Проводник уравновешен в магнитном поле

**Индукцией магнитного поля называется векторная физическая величина, равная отношению максимальной силы Ампера к длине проводника и силе тока в нём.**

Единица индукции магнитного поля — 1 Тл (тесла). Она названа в честь сербского физика и изобретателя **Николы Теслы**.

За 1 Тл принимается индукция такого магнитного поля, в котором на проводник длиной 1 м, расположенный перпендикулярно к линиям магнитной индукции, действует сила 1 Н при силе тока в проводнике 1 А.

**Линия индукции магнитного поля — это линия, в каждой точке которой вектор индукции направлен по касательной.**

Магнитное поле, в каждой точке которого индукция магнитного поля одинакова по модулю и по направлению, называется **однородным**. Линии индукции такого поля параллельны друг другу и расположены на одинаковых расстояниях друг от друга (рис. 6).

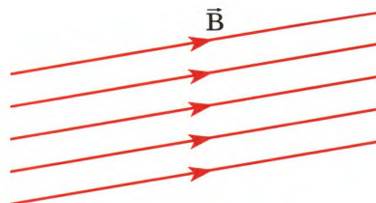


Рис. 6. Линии индукции однородного магнитного поля





Пользуясь определением индукции магнитного поля, получим формулу для расчёта силы Ампера, то есть силы, действующей на проводник с током в магнитном поле:

$$F_A = BIL$$

Эта формула верна для случая, когда проводник расположен перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля. В случае произвольного расположения проводника в магнитном поле:

$$F_A = BIL \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  и направлением силы тока  $I$  в проводнике.

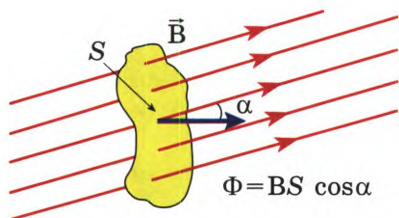


Рис. 7. Магнитный поток через контур S

Из формулы видно, что максимальная сила действует на проводник, перпендикулярный вектору магнитной индукции.

Если проводник с током расположен параллельно вектору  $\vec{B}$ , то сила Ампера равна нулю.

Замкнутый проводник называют **контуром**.

Магнитным потоком  $\Phi$  через площадь, ограниченную контуром  $S$ , называют физическую величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  на площадь  $S$  и на косинус угла между

вектором  $\vec{B}$  и нормалью к контуру (рис. 7).

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Единица магнитного потока — вебер (1 Вб).

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2 = [\text{Вб}].$$

Чтобы изменить магнитный поток, пронизывающий контур, надо либо изменить индукцию магнитного поля, либо изменить площадь контура, либо изменить ориентацию контура в магнитном поле (повернуть контур вокруг оси, перпендикулярной к линиям индукции).

Действие силы Ампера находит большое применение в электродвигателях, громкоговорителях, электроизмерительных приборах.



Простейший электрический двигатель постоянного тока представляет собой рамку, которая может вращаться в магнитном поле. Концы рамки соединены с полукольцами, к которым с помощью щёток подводится электрический ток (рис. 8).

По правилу левой руки определяем, что действующая на часть рамки  $a-b$  сила Ампера направлена от чертежа к нам. На часть рамки  $c-d$  сила Ампера действует в направлении от нас за чертёж. Под действием пары сил рамка  $abcd$  повернётся на  $90^\circ$ . В этот момент коллектор (полукольца и щётки) отключает ток. Вследствие инертности рамка продолжает движение, и цепь рамки снова замыкается, но ток теперь течёт от  $d$  к  $c$ , затем от  $b$  к  $a$ , и рамка продолжает движение в том же направлении.

Таким образом, коллектор автоматически в нужные моменты времени отключает ток, а затем включает ток противоположного направления, и это происходит через каждую половину оборота рамки.

Чтобы рамка двигалась не толчками, а по возможности плавно, используются не одна рамка, а две, три и более, а коллектор состоит не из двух полуколец, а из четырёх, шести и более частей целого кольца. Вместо постоянного магнита используется электромагнит, питаемый от того же источника тока, что и рамка. Подвижную часть электродвигателя (рамка с коллектором) называют **ротором**, а неподвижную (корпус и электромагниты) — **статором**.

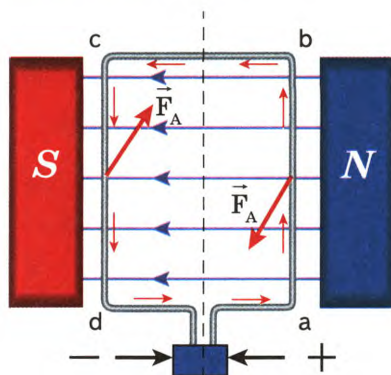


Рис. 8. Электрический двигатель постоянного тока

1. Перескажите содержание параграфа по плану: опытные факты и наблюдаемые явления; наша гипотеза; средства описания; практическое использование.
2. Назовите основные признаки однородного магнитного поля. Изобразите однородное и неоднородное магнитные поля.
3. Что иллюстрирует рисунок 5?
4. Опишите устройство и принцип действия двигателя постоянного тока.
5. Как можно определить направление линий индукции магнитного поля:
  - а) постоянного магнита;
  - б) прямого проводника с током;
  - в) кругового тока в контуре?







6. Определите направление линий индукции магнитного поля (рис. 9):

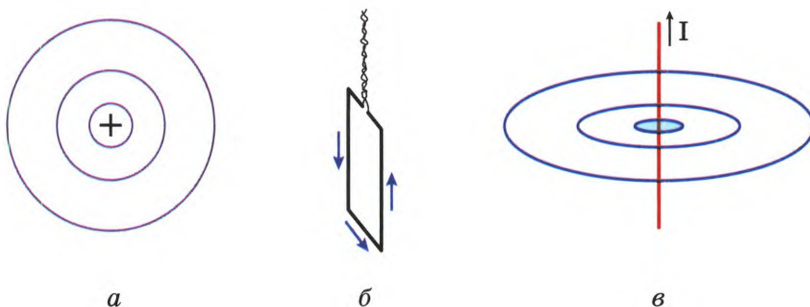


Рис. 9. Схематичные изображения к заданию 6

7. Изобразите вектор магнитной индукции в точках 1, 2 и 3 (рис. 10).

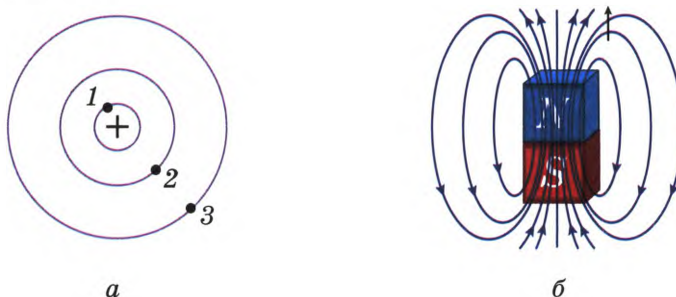


Рис. 10. Схематичные изображения к заданию 7

8. Укажите направление силы Ампера, действующей на проводник с током (рис. 11).

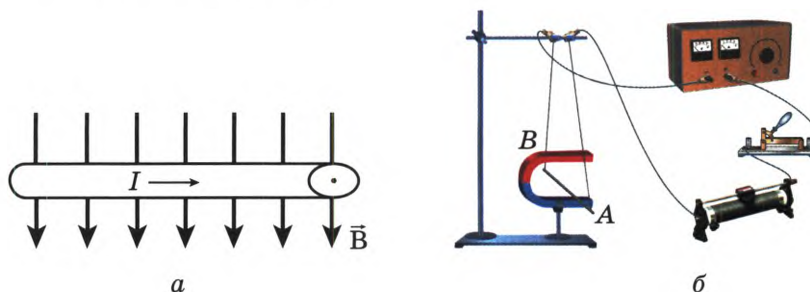


Рис. 11. Схематичные изображения к заданию 8



9. На рисунке 12, *а* укажите направление силы Ампера, на рисунке 12, *б* обозначьте полюсы магнита, на рисунке 12, *в* укажите направление тока в проводнике.

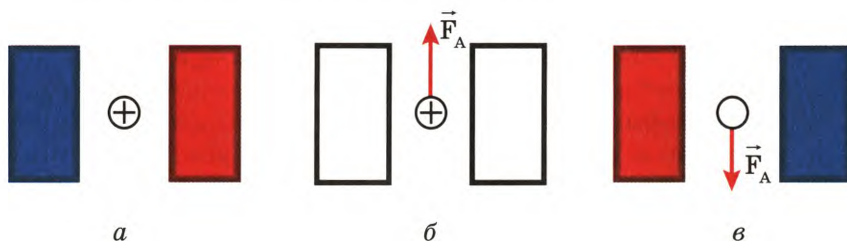


Рис. 12. Схематичные изображения к заданию 9

10. Проволочный квадрат с током находится в однородном магнитном поле. Плоскость квадрата перпендикулярна линиям индукции магнитного поля (рис. 13). Определите угол между силами Ампера, действующими на противоположные стороны квадрата.
11. Найдите в Интернете информацию о магнитном поле Земли. Нарисуйте на альбомном листе линии магнитной индукции магнитного поля Земли. Дайте его краткое описание.
12. Используя Интернет, найдите ответы на вопросы.
- Кто создал первый в мире практически пригодный электродвигатель? Где он использовался?
  - Где сейчас используются двигатели постоянного тока?
  - Что такое магнитная буря?

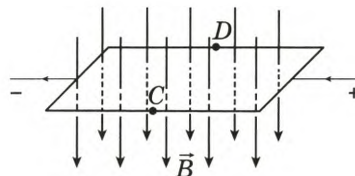


Рис. 13. Схематичное изображение к заданию 10

- 13 (I). С какой силой магнитное поле действует на проводник длиной 10 см, помещённый в магнитное поле индукцией 10 мТл, если сила тока в проводнике 10 А? Рассмотрите случаи, когда линии индукции поля и проводник с током: а) перпендикулярны; б) параллельны; в) образуют угол  $30^\circ$ .
- 14 (I). Найдите магнитный поток, пронизывающий рамку с током площадью  $50 \text{ см}^2$  при индукции магнитного поля 0,4 Тл, если рамка: а) перпендикулярна вектору индукции поля; б) расположена под углом  $30^\circ$  к вектору индукции поля; в) расположена параллельно вектору индукции поля.







- 15 (II). Магнитный поток, пронизывающий контур площадью  $60 \text{ см}^2$ , равен  $0,3 \text{ мВб}$ . Найдите индукцию магнитного поля. Плоскость контура перпендикулярна линиям индукции. **(50 мТл)**
- 16 (II). Прямой проводник, по которому течёт ток  $50 \text{ А}$ , расположен в магнитном поле под углом  $30^\circ$  к линиям индукции. Под действием магнитного поля проводник переместился на  $0,5 \text{ м}$ , при этом была совершена работа  $10 \text{ Дж}$ . Определите длину проводника. Индукция магнитного поля равна  $2 \text{ Тл}$ . **(0,4 м)**
- 17 (III). В однородном магнитном поле с индукцией  $0,5 \text{ Тл}$  на двух тонких нитях висит горизонтальный проводник длиной  $15 \text{ см}$  и массой  $20 \text{ г}$ . На какой угол отклонится проводник, если по нему течёт ток  $3 \text{ А}$ ? Силовые линии магнитного поля направлены вниз. **(48°)**
- 18 (III). По горизонтально расположенному проводнику длиной  $20 \text{ см}$  и массой  $4 \text{ г}$  течёт ток  $10 \text{ А}$ . Найдите индукцию (модуль и направление) магнитного поля, в которое нужно поместить проводник, чтобы сила тяжести уравнивалась силой Ампера ( $I \perp \vec{B}$ ). **(20 мТл)**

## § 2. Сила Лоренца



1. Как можно рассчитать силу Ампера?

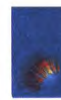
2. Если на проводник с током в магнитном поле действует сила, то действует ли сила на каждую отдельную заряженную частицу, движущуюся направленно в проводнике под действием электрического поля?

3. Как можно выразить силу тока в металлическом проводнике через заряд электрона и концентрацию свободных электронов?

1. По формуле:  $F_A = BIl \sin \alpha$ .

2. Очевидно, действует.

3.  $I = envS$ . Здесь  $e$  — элементарный заряд,  $n$  — концентрация свободных электронов,  $v$  — средняя скорость направленного движения электронов,  $S$  — площадь поперечного сечения проводника.



### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. В северных областях Земли можно наблюдать **полярные сияния** (рис. 14).

2. В опытах Э. Резерфорда по исследованию физической природы радиоактивного излучения это излучение помещалось в магнитное поле. В результате  $\alpha$ -частицы, обладающие положительным зарядом, отклонялись в одну сторону, а  $\beta$ -частицы (электроны), имеющие отрицательный заряд, — в противоположную сторону.

3. Если через металлическую пластинку, помещённую в магнитное поле, пропускать электрический ток, то между боковыми сторонами пластинки возникает разность потенциалов (эффект Холла) (рис. 15).

**Наша гипотеза:** на каждую заряженную частицу, движущуюся с некоторой скоростью в магнитном поле, действует сила, модуль и направление которой зависят от модуля и знака заряда частицы, вектора скорости и вектора индукции магнитного поля.



Рис. 14. Полярное сияние

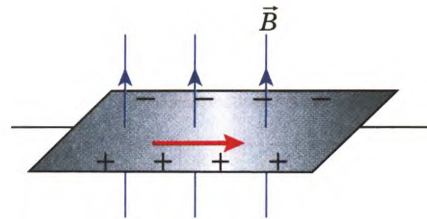


Рис. 15. Эффект Холла

Опираясь на выдвинутую нами гипотезу, можно объяснить все три приведённых выше примера.

1. Солнце испускает огромное число **заряженных частиц**. Под действием магнитного поля Земли эти частицы отклоняются к полюсам Земли и, входя в разреженную атмосферу, возбуждают атомы и молекулы входящих в состав атмосферы газов, заставляя их излучать свет, воспринимаемый нами как полярное сияние.

2. На движущиеся с большой скоростью  $\alpha$ -частицы и  $\beta$ -частицы в магнитном поле действует сила. Так как знаки зарядов этих частиц противоположны, направления действующих на них сил тоже противоположны.

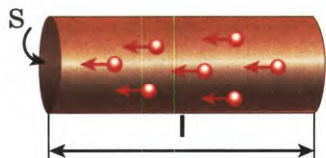
3. Электрический ток в металлах представляет собой направленное перемещение **свободных электронов**. Поскольку на каждый электрон согласно нашей гипотезе действует сила, на одной из боковых сторон пластинки оказывается избыток электронов,







**Х.А. Лоренц**  
(1853–1928)



**Рис. 16.** Проводник с током  
в однородном магнитном поле

на другой — недостаток. Возникает разность потенциалов между боковыми стенками пластинки.

Голландский физик **Х. Лоренц** в 1892 г. получил математическую формулу для расчёта силы, действующей на имеющую электрический заряд  $q$  частицу, движущуюся в магнитном поле со скоростью  $v$ . Эту силу стали называть **силой Лоренца**.

**Сила Ампера** (макроскопическое проявление силы Лоренца) — результат действия магнитного поля на заряженные частицы, создающие ток в проводнике.

Рассмотрим проводник, помещённый в однородное магнитное поле с индукцией  $B$  (рис. 16). Чтобы вывести формулу для расчёта силы Лоренца, надо силу Ампера разделить на число заряженных частиц, создающих в проводнике электрический ток. Это число равно произведению концентрации частиц  $n$  и объёма, в котором они находятся:  $N = nV = nLS$ .

$$F_A = BIL \sin \alpha; I = envS; F_A = BenvSL \sin \alpha.$$

Разделим силу Ампера на число частиц, создающих ток:

$$F_{\text{л}} = \frac{F_A}{N}; F_{\text{л}} = \frac{BenvSL \sin \alpha}{nLS} = eBv \sin \alpha$$

В общем случае заряд частицы не обязательно элементарный, в магнитном поле могут двигаться  $\alpha$ -частицы, ионы и другие частицы с зарядом  $q$ . Тогда:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

**Сила Лоренца пропорциональна заряду частицы, скорости её движения и индукции магнитного поля.**

Направление силы Лоренца, как и направление силы Ампера, определяется по правилу левой руки.

**Если левую руку расположить так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением скорости положительного заряда, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца.**



Если заряд частицы отрицательный, то четыре пальца надо располагать противоположно направлению вектора скорости.

Действие силы Лоренца можно обнаружить, если поднести постоянный магнит к электронно-лучевой трубке, например слева северным полюсом. Тогда на каждый электрон в электронном пучке начнёт действовать сила Лоренца, и весь пучок будет попадать уже не в центр трубки, а сместится вниз (рис. 17).

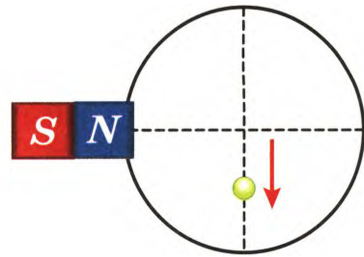


Рис. 17. Смещение электрона под действием силы Лоренца в осциллографе

Если свободная заряженная частица движется в магнитном поле, то, поскольку сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости, работа не совершается. Кинетическая энергия частицы сохраняется.

Сила Лоренца используется для управления электронным пучком в осциллографах и кинескопах телевизоров, в циклических ускорителях, для удержания горячей плазмы в некоторой области пространства. Рассмотрим подробнее одно из применений силы Лоренца: **в магнитно-гидродинамических (МГД) генераторах.**

В МГД-генераторах происходит непосредственное преобразование внутренней энергии топлива в электрическую энергию (рис. 18).

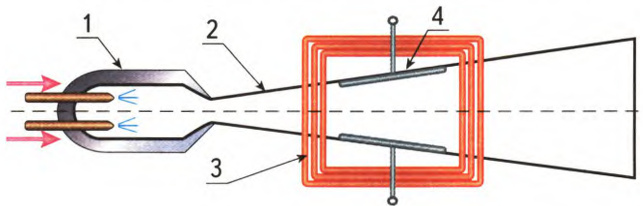


Рис. 18. Схема работы МГД-генератора

В обычных условиях электрическое сопротивление газов очень велико. При сильном увеличении температуры газа происходит его ионизация, при дальнейшем повышении температуры достигается состояние вещества, при котором большая часть его молекул или атомов ионизирована, — **плазма**. Плазму можно получить, например, сжигая в кислороде или воздухе распылённое жидкое топливо.

При движении плазмы поперёк магнитного поля на каждую заряженную частицу (ион или электрон) действует сила Лоренца: на положительные ионы — в одном направлении, на электроны



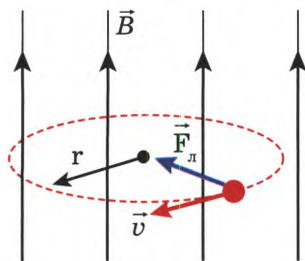


и отрицательные ионы — в противоположном. Возникают противоположно направленные потоки электронов и положительных ионов\*.

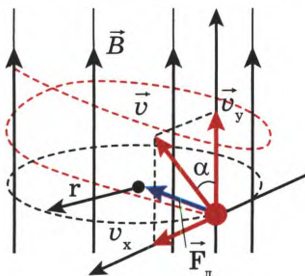
МГД-генератор состоит из камеры сгорания (1), канала для движения плазмы (2), электромагнита (3), создающего магнитное поле, и пластин (электродов) (4), на которых накапливаются носители зарядов. Пластины (4) соединены с электрической подстанцией.

В МГД-генераторе осуществляется преобразование энергии движущейся плазмы непосредственно в электроэнергию без промежуточных преобразований, потому что в МГД-генераторе нет движущихся механических узлов и деталей — в этом его основное преимущество. Начальная температура плазмы может быть очень высокой, что обеспечивает высокий КПД генератора.

Первый МГД-генератор был построен в США в 1959 г. В нашей стране первый МГД-генератор появился в 1965 г. В 1971 г. был запущен МГД-генератор мощностью 25 МВт.



**Рис. 19.** Частица влетает перпендикулярно линиям индукции магнитного поля



**Рис. 20.** Частица влетает под углом к вектору магнитной индукции

\* Рассмотрим два случая движения свободной заряженной частицы в однородном магнитном поле.

1. Частица влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции магнитного поля (рис. 19). В этом случае она движется по окружности, так как центростремительное ускорение частицы вызывается силой Лоренца:

$$\frac{mv^2}{R} = qvB. \text{ Радиус окружности: } R = \frac{mv}{qB}.$$

2. Частица влетает под углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции (рис. 20). В этом случае проекция скорости на ось  $OX$  вызывает движение частицы по окружности (случай 1), а проекция скорости на ось  $OY$  остаётся постоянной по модулю и направлению. В результате траекторией движения частицы оказывается винтовая линия. Рассчитаем шаг этой винтовой линии. Время одного оборота (период) равно:  $T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}$ .

Частица переместится вдоль оси  $OY$  на расстояние

$$h = v \cos \alpha \cdot T, \quad R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}. \text{ Следовательно,}$$

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}.$$



1. Перескажите параграф по плану: опытные факты и наблюдаемые явления; наша гипотеза; вывод формулы для расчёта силы Лоренца; практическое использование силы Лоренца.
2. Рассмотрим два утверждения: а) на проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера; б) на заряженные частицы, которые движутся направленно внутри проводника при прохождении тока, в магнитном поле действует сила Лоренца. Какое из этих утверждений является причиной, а какое — следствием?
3. Что общего у силы Ампера и силы Лоренца?
4. Почему сила Лоренца при движении свободной частицы в магнитном поле не совершает работу?
5. Какова траектория частицы, влетевшей в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции магнитного поля?
6. Какова траектория частицы, влетевшей в однородное магнитное поле под углом к линиям индукции магнитного поля?
7. Определите направление силы Лоренца (рис. 21, а) и знак заряда частицы (рис. 21, б, в).

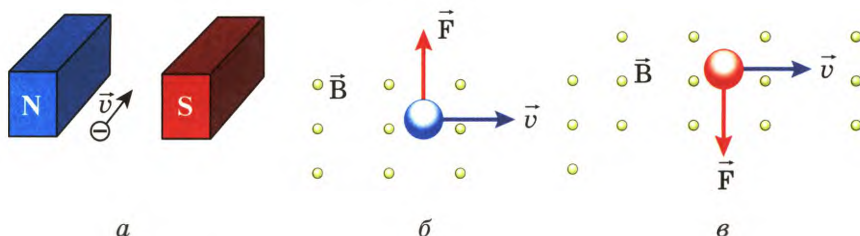


Рис. 21. Схематичные изображения к заданию 7

8. Используя Интернет, подготовьте презентацию по одной из тем: «Движение заряженных частиц в магнитном поле Земли. Полярные сияния», «Циклотрон», «Управление пучком электронов в электронно-лучевой трубке», «Масс-спектрограф».
- 9 (I). Какая сила действует на электрон, движущийся со скоростью 1 Мм/с в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл перпендикулярно линиям индукции?
- 10 (II). Протон в магнитном поле с индукцией 10 мТл описал окружность радиусом 10 см. Найдите скорость протона. Массу и заряд протона возьмите из справочника. (96 км/с)
- 11 (II). Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 4 мТл. Найдите период обращения электрона. Массу и заряд электрона возьмите из справочника. Считать, что траектория движения электрона — окружность. (8,9 нс)







- 12 (III). Пройдя ускоряющую разность потенциалов 3520 В, электрон попал в однородное магнитное поле с индукцией 0,002 Тл, перпендикулярное скорости электрона. Найдите радиус окружности, по которой движется электрон ( $qv = \frac{mv^2}{2}$ ).  
Массу и заряд электрона возьмите из справочника. (0,1 м)
- 13 (III). Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0,015 Тл со скоростью  $10^8$  км/с под углом  $30^\circ$  к направлению вектора магнитной индукции. Определите шаг винтовой линии, по которой будет двигаться электрон. (2 мм)
- 14 (III). Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов 200 В, влетев в область однородного магнитного поля с индукцией 0,004 Тл, описывает окружность диаметром 1 м. Найдите отношение заряда частицы к её массе, если плоскость окружности перпендикулярна линиям магнитной индукции поля. ( $10^8$  Кл/кг)

### § 3. Электромагнитная индукция



1. Какое открытие сделал Х.Х. Эрстед в 1820 г.?

1. Он на опыте установил связь между электричеством и магнетизмом. Источником магнитного поля является электрический ток.

2. Какие открытия сделал А.М. Ампер после опыта Эрстеда?

2. Ампер открыл взаимодействие двух проводников с током; показал, что катушка, по которой течёт ток, подобна постоянному магниту; вывел формулу для расчёта силы, действующей в магнитном поле на проводник с током.

3. По какой формуле можно рассчитать магнитный поток через контур?

3. По формуле:  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

4. В каких случаях изменяется магнитный поток через контур?

4. При изменении модуля магнитной индукции, при изменении площади контура и при изменении положения контура в магнитном поле.



### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. Если в катушку, соединённую с гальванометром, вводить постоянный магнит, стрелка гальванометра отклоняется, показывая наличие тока.

2. На концах крыльев самолёта, летящего в магнитном поле Земли, возникает разность потенциалов.

3. На электростанциях мощные генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую.

4. Если катушку с большим числом витков замкнуть на чувствительный светодиод, то при прохождении через катушку свободно падающий постоянный магнит немного тормозится, а светодиод на мгновение вспыхивает.

**Наша гипотеза:** источником электрического поля в перечисленных примерах является изменяющееся (нарастающее или убывающее) магнитное поле.

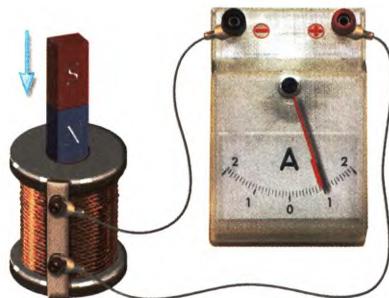


**М. Фарадей**  
(1791–1867)

Опыт, осуществлённый датским физиком Х.Х. Эрстедом, послужил толчком для дальнейшего быстрого развития электродинамики. Ведь если электрический ток является источником магнитного поля, то нельзя ли найти способ получить электрический ток посредством магнитного поля? «Превратить магнетизм в электричество» — так сформулировал английский учёный **Майкл Фарадей** в своём дневнике в 1921 г. поставленную им проблему. Этой нелёгкой цели в результате упорного труда ему удалось добиться в 1831 г. Известна даже точная дата открытия М. Фарадея — 29 августа.



Сейчас опыты Фарадея можно воспроизвести в любой школьной лаборатории. Установка для этих опытов представляет собой катушку с большим числом витков, соединённую с гальванометром (рис. 22). Если в катушку вводить магнит, стрелка гальванометра отклоняется на некоторый угол, показывая наличие в цепи катушки тока. Полученный таким образом электрический ток Фарадей назвал **наведённым** или **индукционным**. Если убирать магнит из катушки, стрелка гальванометра отклоняется в противоположную сторо-



**Рис. 22.** Опыты Фарадея





ну, то есть направление индукционного тока изменяется на противоположное. При остановке магнита ток исчезает.

Можно магнит закрепить неподвижно, а перемещать относительно магнита катушку. И в этом случае в течение всего времени изменения относительного положения магнита и катушки в цепи гальванометра существует индукционный ток. Как только магнит относительно катушки или катушка относительно магнита перестают перемещаться, индукционный ток пропадает.

Можно несколько видоизменить опыт: вместо магнита вводить в катушку или убирать из катушки электромагнит. И в этом случае результат оказывается прежним: индукционный ток возникает лишь при перемещении электромагнита относительно катушки.

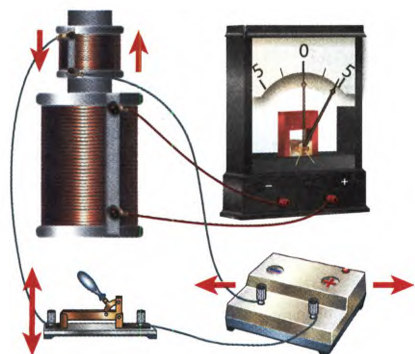


Рис. 23. Получение индукционного тока

Если оставить электромагнит внутри катушки, а затем замыкать или размыкать цепь электромагнита (рис. 23), то при замыкании цепи возникает индукционный ток одного направления, при размыкании — противоположного направления. Индукционный ток возникает и при движении вправо или влево ползунка реостата, то есть при изменении силы тока в цепи электромагнита.

Проведём ещё один опыт. Между полюсами постоянного магнита или электромагнита разместим гибкую катушку, соединённую с гальванометром. При изменении площади поперечного сечения этой гибкой катушки, например при её сжатии, опять возникает индукционный ток. Он возникает и при повороте плоскости катушки в магнитном поле.

**Индукционный ток возникает во всех случаях изменения магнитного потока через катушку.**

**Явление возникновения тока в замкнутом контуре при всяком изменении магнитного потока через этот контур назвали электромагнитной индукцией.**



Э.Х. Ленц  
(1804–1865)

Вопрос о направлении индукционного тока был решён российским академиком Э.Х. Ленцем.



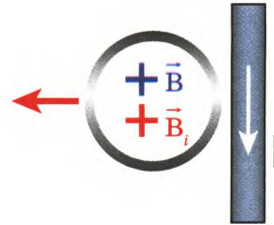


**Индукционный ток всегда имеет такое направление, что своим магнитным полем стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которое вызвало этот ток.**

Рассмотрим конкретный пример. По проводнику (рис. 24) сверху вниз течёт ток. От проводника отводим металлическое кольцо. При этом магнитный поток, пронизывающий ограниченную кольцом площадь, изменяется. В кольце возникает индукционный ток.

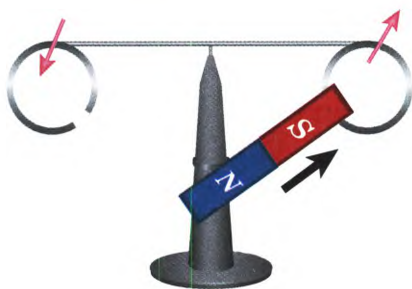
Каково направление этого тока?

Порядок действий (алгоритм) при определении направления индукционного тока следующий



**Рис. 24.** Взаимодействие кольца и проводника с током

1. Определить направление вектора индукции магнитного поля $\vec{B}$ , в котором находится интересующий нас проводник (кольцо)	1. По правилу буравчика, вектор $\vec{B}$ в центре кольца направлен от нас за чертёж (синий крестик)
2. Определить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через контур	2. Так как кольцо отдаляем от проводника, магнитный поток через кольцо уменьшается
3. Определить, как направлен вектор $\vec{B}_i$ магнитной индукции индукционного тока. По правилу Ленца, если магнитный поток через контур увеличивается, то вектор $\vec{B}_i$ , стремясь компенсировать увеличение магнитного потока, направлен противоположно вектору $\vec{B}$ . Если магнитный поток уменьшается, то вектор $\vec{B}_i$ сонаправлен с вектором $\vec{B}$	3. Вектор $\vec{B}_i$ сонаправлен с вектором $\vec{B}$ (красный крестик)
4. По правилу буравчика определяем направление индукционного тока	4. Ток обтекает кольцо, глядя от нас, по часовой стрелке

**Рис. 25.** Опыт Ленца

Правило Ленца обычно демонстрируется с помощью прибора Ленца, представляющего собой лёгкое коромысло, установленное с помощью стеклянного подшипника на острие. На концах коромысла закреплены кольца: одно сплошное, без разреза, а другое с разрезом (рис. 25). Если подносить постоянный магнит любым полюсом к сплошному кольцу, то кольцо отталкивается от магнита. Если убирать магнит от кольца, кольцо притягивается к магниту. Если вводить магнит

в кольцо с разрезом или выводить магнит из этого кольца, то индукционный ток не возникает и кольцо с магнитом не взаимодействует.

Правило Ленца является частным случаем закона сохранения и превращения энергии. Индукционный ток обладает энергией. Чтобы он возник, необходимо совершить некоторую работу по преодолению сил отталкивания магнита от кольца или притяжения магнита к кольцу.

Магнит можно вводить в катушку очень медленно (см. рис. 22). Тогда скорость изменения магнитного потока через катушку  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  будет мала, и стрелка гальванометра отклонится всего на 1—2 деления.

Если же вводить магнит в катушку очень быстро, стрелка гальванометра отклонится сильнее. Сила индукционного тока зависит от скорости изменения магнитного потока. Но сила тока, по закону Ома, пропорциональна возникающей в контуре ЭДС индукции, следовательно,

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Сформулируем закон электромагнитной индукции:

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

Знак «минус» выражает собой правило Ленца.

Если контур, в который вводят магнит, состоит из  $N$  витков, то ЭДС индукции возникает в каждом витке, следовательно:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



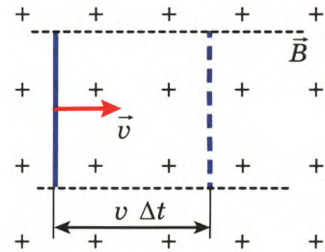


Индукционный ток\* возникает под действием индукционного электрического поля. Это поле имеет несколько отличий от электростатического поля, создаваемого неподвижными зарядами, и от стационарного электрического поля, создаваемого в проводниках источником тока. Основное отличие состоит в том, что линии напряжённости индукционного поля всегда замкнуты, поле не является потенциальным, так как работа по переносу заряда по замкнутому пути отлична от нуля. Величина, равная работе по переносу единичного заряда по замкнутой цепи, равна ЭДС индукции.

Электромагнитная индукция играет огромную роль в производстве электрической энергии. Кроме того, это явление используется в динамических микрофонах, в трансформаторах. Электромагнитная индукция используется для получения искры в карбюраторных двигателях внутреннего сгорания и в других технических устройствах. Практическому использованию явления электромагнитной индукции будет посвящено несколько последующих параграфов.

\* Если в магнитном поле движется прямолинейный проводник, то индукционный ток не возникает — цепь не замкнута. Но разность потенциалов на концах такого проводника возникает, ведь вместе с проводником движутся все находящиеся в нём свободные электроны, на каждый из которых действует сила Лоренца, направленная перпендикулярно скорости проводника.

На рисунке 26 магнитное поле направлено от нас за чертёж, проводник в магнитном поле движется вправо. За время  $\Delta t$  проводник проходит расстояние  $a = v\Delta t$ , так как проводник движется с постоянной скоростью, и «заметает» площадь  $S = Lv\Delta t$ , где  $L$  — длина проводника. Изменение магнитного потока за это время  $\Delta\Phi = BS$ ;  $\Delta\Phi = BLv\Delta t$ . Тогда ЭДС индукции в проводнике равна:  $\varepsilon_i = BLv$ . В общем случае, если проводник движется не перпендикулярно линиям индукции магнитного поля:



**Рис. 26.** Движение проводника с током в магнитном поле

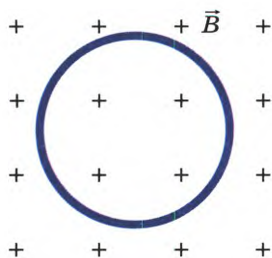
$$\varepsilon_i = BvL \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .





1. Назовите 5—6 способов изменения магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур.
2. Продолжите фразу: «Электромагнитная индукция — это...»
3. Сформулируйте правило Ленца.
4. Опишите и объясните опыт Ленца.
5. Запишите закон электромагнитной индукции. На что указывает знак «-»?
6. Докажите, что правило Ленца является частным случаем закона сохранения и превращения энергии.
7. Выведите формулу для ЭДС индукции, возникающей в прямом проводнике, движущемся в магнитном поле перпендикулярно линиям индукции.
8. Укажите причину возникновения индукционного тока в следующих случаях:
  - а) контур передвигают относительно неподвижного полосового магнита;
  - б) магнит вводят в неподвижный контур и выводят из него.
9. Сравните индукционное электрическое поле и электростатическое.
10. Три одинаковых полосовых магнита падают вертикально одновременно с одной высоты. Первый падает свободно, второй во время падения проходит сквозь незамкнутый соленоид, третий — сквозь замкнутый соленоид. Сравните время падения магнитов. Ответ обоснуйте.
11. Почему колебания стрелки компаса быстрее затухают, если корпус прибора латунный, и медленнее затухают, если корпус прибора пластмассовый?



**Рис. 27.** Схематичное изображение к заданиям 12, 13

12. Магнитное поле направлено от наблюдателя за лист (рис. 27). Как будет направлен индукционный ток в кольце (по часовой стрелке или против часовой стрелки) при исчезновении магнитного поля?
13. Будет ли возникать индукционный ток в круговом витке (рис. 27), находящемся в однородном магнитном поле, если: а) перемещать виток поступательно; б) вращать виток вокруг оси, проходящей через центр витка перпендикулярно плоскости витка; в) вращать виток вокруг оси, лежащей в его плоскости?
14. Разделите текст на смысловые части и составьте план параграфа.



15. Используя Интернет, подготовьте презентацию по одной из тем: «Устройство электродинамического микрофона», «Токи Фуко: польза и вред», «Детектор металла», «Индукционные печи».
- 16 (I). За 5 мс в соленоиде, содержащем 500 витков провода, магнитный поток равномерно убывает от 7 до 3 мВб. Найдите ЭДС индукции в соленоиде.
- 17 (I). Найдите скорость изменения магнитного потока в соленоиде из 1000 витков при возбуждении в нём ЭДС индукции 120 В.
- 18 (I). Проводник длиной 2 м движется со скоростью 10 м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля. Определите модуль индукции магнитного поля, если на концах проводника возникает разность потенциалов 0,02 В.
- 19 (III). В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл находится рамка площадью 10 см<sup>2</sup>, расположенная перпендикулярно линиям индукции. Сопротивление рамки 2 Ом. Какой заряд протечёт по рамке при её повороте на 180°? (0,1 мКл)
- 20 (III). Горизонтальный металлический стержень длиной 0,5 м равномерно вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов, с частотой 5 с<sup>-1</sup>. Определите разность потенциалов между концами стержня, если вертикальная составляющая магнитного поля Земли равна  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл. (2 мВ)



## § 4. Самоиндукция

1. В каком случае в контуре возникает индукционный ток?

1. В контуре возникает индукционный ток при всяком изменении магнитного потока через этот контур.



2. Как магнитный поток, создаваемый током в катушке, зависит от силы тока в контуре?

2. Магнитный поток пропорционален силе тока:  $\Phi \sim I$ .

Если расположить рядом две катушки, одна из которых соединена с источником тока, а другая — с гальванометром, то при замыкании цепи первой катушки гальванометр показывает наличие





кратковременного тока во второй катушке (рис. 28). При размыкании цепи катушки 1 гальванометр показывает наличие в катушке 2 кратковременного тока противоположного направления.

Это явление легко объяснить: при замыкании цепи сила тока в первой катушке увеличивается от нуля до некоторого значения, увеличивается также создаваемый током магнитный поток. Нарастающий магнитный поток пронизывает витки второй катушки, поэтому во второй катушке возникает ЭДС индукции.

Но нарастающий магнитный поток пронизывает витки и первой катушки, и в первой катушке тоже возникает ЭДС индукции, которую в данном случае называют ЭДС самоиндукции.

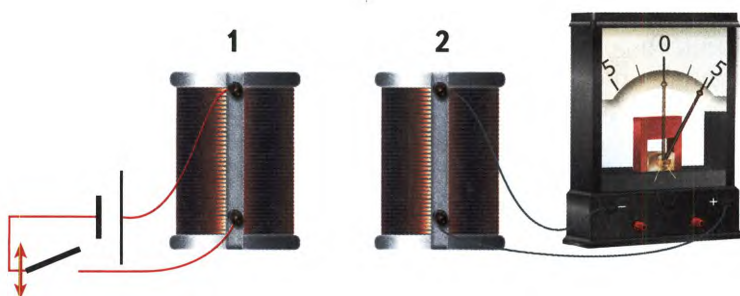


Рис. 28. Явление самоиндукции

**Самоиндукция — это явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока.**

Если форма контура неизменна, то магнитный поток через него изменяется только за счёт изменения силы тока. Тогда  $\Delta\Phi = L\Delta I$ .

ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, а скорость изменения магнитного потока пропорциональна скорости изменения силы тока, поэтому  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , следовательно, ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока в проводнике.

$$\epsilon_{\text{si}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  между скоростью изменения силы тока в проводнике и возникающей при этом ЭДС самоиндукции зависит от размеров и формы проводника и называется **индуктивностью** проводника.





Единицей индуктивности является генри (Гн).

$$[L] = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = [\text{Гн}].$$

За 1 Гн принимается индуктивность такого проводника, изменение силы тока в котором на 1 А за 1 с приводит к появлению ЭДС самоиндукции 1 В.

Если взять прямой гибкий проводник длиной около 1 м, то его индуктивность будет очень мала. Если этот проводник намотать на картонную трубочку, индуктивность возрастёт в десятки раз. А если в трубочку вставить железный сердечник, индуктивность увеличится ещё в сотни раз.

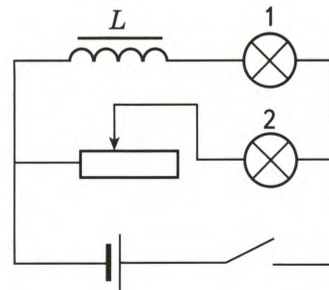
Явление самоиндукции можно продемонстрировать на простых опытах.

#### 1. Самоиндукция при замыкании цепи.

Соберём электрическую цепь, состоящую из двух параллельных ветвей. В одну ветвь последовательно с лампочкой включим катушку с железным сердечником (дроссель), а в другую ветвь — лампочку последовательно с реостатом. Сопротивление реостата подберём таким, чтобы оно было равно сопротивлению катушки (рис. 29).

При замыкании цепи лампочка 2 загорится практически сразу, а лампочка 1 — спустя некоторое время. Это происходит потому, что при нарастании тока в катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции, направленная, по правилу Ленца, против ЭДС источника. На рисунке 30 показаны зависимости  $I(t)$  для лампочек 1 и 2 при замыкании цепи.

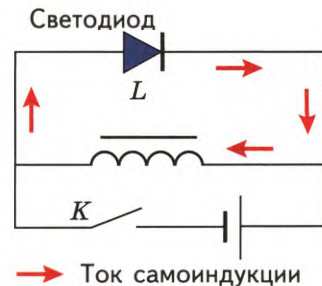
**2. Самоиндукция при размыкании цепи.** Соберём электрическую цепь, показанную на рисунке 31. Параллельно катушке с железным сердечником включим светодиод (полупроводниковый элемент с



**Рис. 29.** Схема цепи для наблюдения явления самоиндукции при замыкании цепи



**Рис. 30.** Зависимость силы тока от времени при замыкании цепи



**Рис. 31.** Схема цепи для наблюдения явления самоиндукции при размыкании цепи



односторонней проводимостью, при прохождении по нему тока светится) так, чтобы ток через него при включённой цепи не проходил. При размыкании цепи светодиод ярко вспыхивает. Это происходит потому, что при убывании магнитного потока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, и ток самоиндукции в катушке протекает в том же направлении, что и ток источника.

Данный опыт является доказательством того, что магнитное поле катушки с током обладает энергией. При протекании тока самоиндукции энергия магнитного поля катушки переходит в другие виды энергии, в данном случае во внутреннюю энергию проводников.

Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Чем больше масса тела, тем больше его противодействие изменению скорости. Чем больше индуктивность проводника, тем больше его противодействие изменению силы тока. Если скорость тела в механике аналогична силе тока в электродинамике, а масса тела аналогична индуктивности проводника, то, следуя аналогии, кинетической энергии тела мы можем привести в соответствие энергию магнитного поля катушки с током:

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

Магнитное поле зависит от свойств среды. Как уже было сказано, введение в катушку железного сердечника увеличивает индукцию магнитного поля во много раз. Вещества, которые усиливают магнитное поле во много раз, называются **ферромагнетиками**. К ним относятся железо, сталь, никель, кобальт, некоторые сплавы.

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция  $\vec{B}$  магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции  $\vec{B}_0$  магнитного поля в вакууме, называется **магнитной проницаемостью**  $\mu$ .

Для ферромагнетиков  $\mu$  составляет несколько сотен, а иногда и несколько тысяч единиц.

Следовательно, индуктивность катушки зависит от её формы, числа витков и магнитной проницаемости сердечника.

Вещества, магнитная проницаемость которых немного больше единицы, называются **парамагнетиками**. К ним относятся, например, алюминий, платина, жидкий кислород.

Вещества, магнитная проницаемость которых немного меньше единицы, называются **диамагнетиками** (висмут, серебро, свинец).

В ферромагнетиках имеются области спонтанной (самопроизвольной) намагниченности — **домены**. При отсутствии внешнего



магнитного поля домены ориентируются беспорядочно. При наличии поля домены ориентируются по полю и усиливают его (рис. 32).

Ферромагнетики используются в электромагнитах, трансформаторах, для изготовления роторов и статоров генераторов и электродвигателей. Ферромагнитный порошок, нанесённый на гибкую ленту, используется для записи и воспроизведения информации.

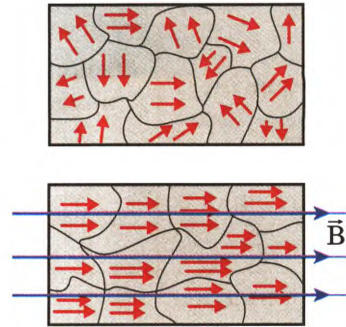


Рис. 32. Доменная структура ферромагнетиков

1. Какие новые понятия и физические величины вы встретили в тексте? Что они означают?
2. От чего зависит модуль ЭДС самоиндукции?
3. Как на опыте продемонстрировать явление самоиндукции при замыкании цепи? при размыкании цепи?
4. Как рассчитать энергию магнитного поля катушки с током?
5. Почему работающий электродвигатель выключают, плавно уменьшая силу тока в цепи реостатом?
6. Заполните в тетради таблицу 1, отнеся новые понятия из § 1–3 к соответствующей группе.



Таблица 1

Понятие	Физическое явление	Физическая величина	Физическое тело	Средство описания
Магнит				
Индукция магнитного поля				
Линия индукции магнитного поля				
Магнитный поток				





Окончание табл. 1

Понятие	Физическое явление	Физическая величина	Физическое тело	Средство описания
Правило буравчика				
Контур				
ЭДС индукции				
Электромагнитная индукция				
Правило Ленца				
Индуктивность				
Домен				
Ферромагнетик				
МГД-генератор				
Сила Лоренца				
Магнитная проницаемость				

7. Где применяются ферромагнетики?
8. От чего зависит индуктивность катушки?
9. Если нагревать постоянный магнит, то при некоторой температуре, называемой точкой Кюри, магнит теряет свои свойства. Что происходит с доменами ферромагнетика, когда температура образца достигает точки Кюри?
- 10 (I). Определите индуктивность провода, в котором возбуждается ЭДС самоиндукции 36 мВ, когда сила тока равномерно изменяется на 6 А за 0,3 с. (1,8 мГн)





- 11 (II). Найдите энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока 10 А возникает магнитный поток 0,5 Вб. (2,5 Дж)
- 12 (III). Определите индуктивность цепи, если при изменении силы тока по закону  $I = 1 - 0,2t$  в ней возникает ЭДС самоиндукции 20 мВ. (0,1 Гн)

## § 5. Переменный ток

1. Какой электрический ток называется переменным?

2. Какие действия оказывает переменный ток?

3. В чём преимущества переменного тока перед постоянным?

4. Как рассчитать работу и мощность постоянного тока?

5. Как рассчитать магнитный поток через контур?

6. Как рассчитать ЭДС индукции?

1. Переменным называется ток, направление и величина которого периодически изменяются.

2. Тепловое и магнитное.

3. Его можно с меньшими потерями передавать на большое расстояние. Генераторы и электродвигатели переменного тока проще, чем постоянного.

4.  $A = IUt$ ;  $P = IU$ .

5. По формуле:  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

6.  $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .



Для получения переменного тока используется вращение рамки в однородном магнитном поле (рис. 33). Пусть рамка, концы которой с помощью колец и щёток соединены с гальванометром, вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле, индукция которого  $B$ . В некоторый момент времени магнитный поток через рамку равен:

$$\Phi = BS \cos \varphi, \text{ где } \varphi = \omega t. \text{ Тогда } \Phi = BS \cos \omega t.$$

В рамке возникает ЭДС индукции, равная производной магнитного потока по времени, взятой с обратным знаком:  $e_i = -BS\omega \sin \omega t$ ,





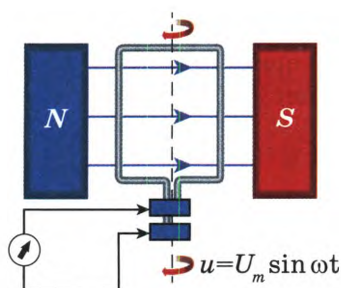


Рис. 33. Вращение рамки в магнитном поле

где  $BS\omega$  — это максимальное значение ЭДС. Частота снимаемого с рамки переменного тока тоже пропорциональна частоте вращения рамки. Тогда мгновенное значение ЭДС в цепи:

$$e = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

Соответственно напряжение в цепи переменного тока тоже изменяется по гармоническому закону:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Если единственным результатом прохождения тока по проводнику является его нагревание, то говорят, что проводник обладает **активным сопротивлением**. Активным сопротивлением обладают резисторы, электролампы, обмотки электродвигателей, трансформаторов и т.д.

Если электрическая цепь содержит элементы только с активным сопротивлением, то сила тока в ней тоже изменяется по гармоническому закону и по фазе в любой момент времени совпадает с напряжением:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Графики зависимости напряжения и силы тока от времени при активной нагрузке показаны на рисунке 34.

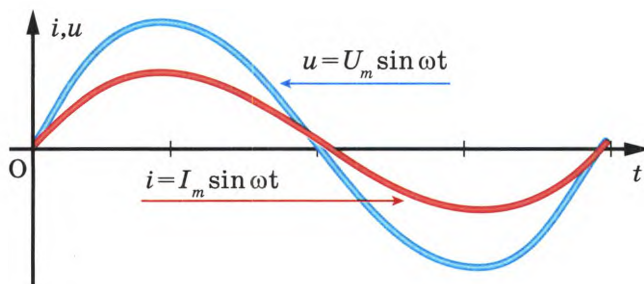


Рис. 34. Графики зависимости  $i(t)$ ,  $u(t)$

Как объяснить возникновение ЭДС индукции при вращении рамки в магнитном поле? На движущиеся вместе с рамкой свободные электроны в магнитном поле действует сила Лоренца. Эта сила вызывает перемещение электронов вдоль проводников, то есть сила Лоренца в данном случае является **сторонней силой**.



При замыкании цепи через гальванометр идёт переменный ток, стрелка гальванометра совершает колебания около положения равновесия.

В промышленных генераторах рамка, с которой снимается напряжение, неподвижно уложена в пазах статора. Во вращение приводится ротор — электромагнит, ток для питания которого подводится с помощью колец и щёток.

В генераторе, показанном на рисунке 35, цифрами обозначены: 1 — корпус, 2 — электромагнит, 3 — коллектор для подвода тока к электромагниту; 4 — рамка, с которой снимается генерируемое переменное напряжение.

В генераторах, приводимых во вращение гидротурбиной или паровой турбиной, механическая энергия преобразуется в электрическую энергию.

Частота переменного тока в России и во многих других странах принята 50 Гц. В США принята частота 60 Гц.

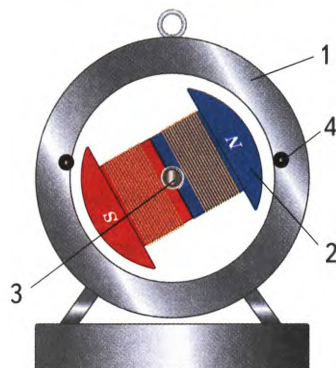
Какое напряжение переменного тока мы имеем в виду, когда говорим, что напряжение в сети, например, 220 В? Ведь в каждый момент времени напряжение разное? Известно, что и постоянный, и переменный токи обладают тепловым действием. Если пропускать через один резистор постоянный ток, а через другой такой же резистор — переменный ток и за одинаковое время в обоих резисторах выделится одинаковое количество теплоты, то это будет означать, что сила переменного тока равна силе постоянного тока и напряжение переменного тока равно напряжению постоянного. Эти значения силы тока и напряжения называют **эффективными** или **действующими значениями** силы тока и напряжения.

**Действующим значением переменного тока называют силу такого постоянного тока, который на одинаковом сопротивлении цепи за одинаковое время выделяет такое же количество теплоты, что и переменный ток.**

Рассчитаем, во сколько раз действующее значение силы переменного тока меньше максимального значения.

Количество теплоты, выделяемое за время  $t$  в цепи постоянного тока:

$$Q_1 = I^2 R t.$$



**Рис. 35.** Генератор переменного тока





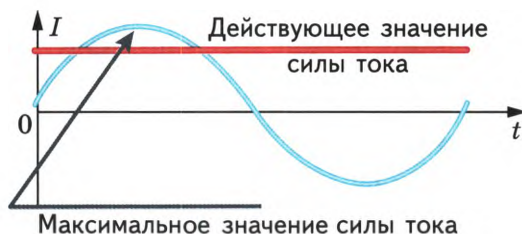
Количество теплоты, выделяемое за это время в цепи переменного тока:

$$Q_2 = (I_m \sin \omega t)^2 \cdot R t.$$

Так как  $Q_1 = Q_2$ , то  $I^2 = I_m^2 \sin^2 \omega t$ . Среднее значение квадрата синуса за период равно  $1/2$ , поэтому  $I^2 = \frac{1}{2} I_m^2$ ,  $I_m = I\sqrt{2}$ ;  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ . Соответственно

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

**Действующее значение силы переменного тока и напряжения переменного тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше максимального (рис. 36).**



**Рис. 36.** Действующее значение силы переменного тока

Так, если действующее значение напряжения в городской осветительной сети равно 220 В, то максимальное (амплитудное) значение равно приблизительно 311 В.



1. Какой ток называется переменным?
2. Как устроен простейший генератор переменного тока?
3. Чем промышленный генератор отличается от простейшего?
4. Как частота переменного тока, вырабатываемого генератором, зависит от частоты вращения ротора?
5. Как напряжение, снимаемое с генератора, зависит от частоты вращения ротора?
6. При каком условии сила переменного тока в электрической цепи в любой момент времени по фазе совпадает с напряжением?
7. Какое значение силы переменного тока называется действующим?
8. Как соотносятся действующее и максимальное (амплитудное) значения напряжения переменного тока?



9. Почему переменный ток получил такое большое распространение?
- 10 (I). По графику (рис. 37) найдите амплитудное значение переменной ЭДС, её период и частоту. Запишите формулу изменения ЭДС со временем.  
(50 В; 0,4 с; 2,5 Гц;  $e = 50 \cos 5\pi t$ )
- 11 (I). На какое напряжение надо рассчитывать изоляторы линии передачи, если действующее напряжение 430 кВ?  
(610 кВ)
- 12 (II). Сколько витков имеет рамка площадью 500 см<sup>2</sup>, если при её вращении с частотой 20 с<sup>-1</sup> в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл амплитудное значение ЭДС равно 63 В? (100)

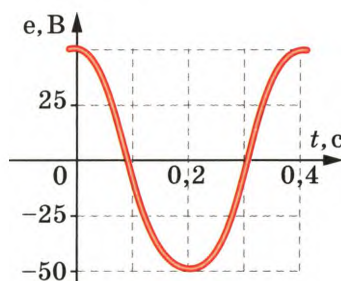


Рис. 37. Схематичное изображение к заданию 10

## § 6\*. Индуктивное и ёмкостное сопротивления. Электрический резонанс

1. Как рассчитывается ЭДС самоиндукции?

2. Как найти мгновенное значение силы тока, если известен закон изменения заряда со временем?

3. Как рассчитать заряд конденсатора?

1. По формуле:  $\varepsilon_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

2. Сила тока равна производной заряда по времени:  $i = q'(t)$ .

3.  $q = CU$ .



### Индуктивность в цепи переменного тока

Соберём электрическую цепь, состоящую из источника переменного тока, источника постоянного тока, катушки с большой индуктивностью, лампочки и перекидного ключа (рис. 38). Напряжение, снимаемое с источника постоянного тока, возьмём равным эффективному значению напряжения переменного тока.

Если поставить ключ в положение 1, лампочка будет светить. Если перевести ключ в положение 2, то лампочка либо совсем не





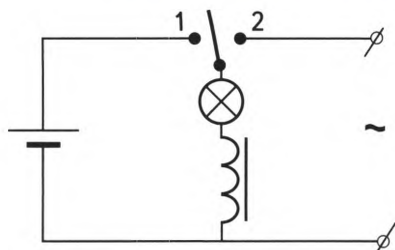


Рис. 38. Цепь с индуктивностью

будет светить, либо будет светить очень слабо. Следовательно, катушка индуктивности создаёт в цепи переменного тока дополнительное сопротивление, которое называют **индуктивным сопротивлением**  $X_L$ .

Причиной индуктивного сопротивления является возникающая в катушке ЭДС самоиндукции, направленная, по закону Ленца, против ЭДС источника переменного тока.

Пренебрегая падением напряжения на малом активном сопротивлении, будем считать, что напряжение на клеммах катушки уравнивается ЭДС самоиндукции:  $u = -\varepsilon_{si}$ . Пусть  $i = I_m \sin \omega t$ ;

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}.$$

$$\text{Тогда } u = LI_m \omega \cos \omega t; u = LI_m \omega \sin \omega t \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

**Сила тока отстаёт по фазе от напряжения на четверть периода.**

Так как амплитуда приложенного напряжения равна:  $U_m = I_m L \omega$ , величина  $L \omega$  играет роль сопротивления и является индуктивным сопротивлением:

$$X_L = L \omega$$

**Индуктивное сопротивление пропорционально циклической частоте и индуктивности.**

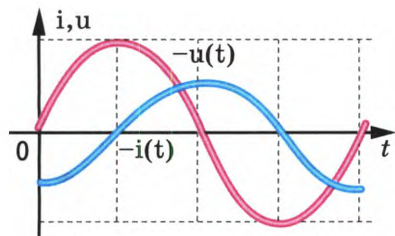


Рис. 39. Графики зависимости  $i(t)$  и  $u(t)$  в цепи переменного тока с индуктивностью

Сила тока и напряжение в цепи с индуктивной нагрузкой не совпадают по фазе.

Вследствие явления самоиндукции на индуктивном сопротивлении сила тока отстаёт по фазе от напряжения на четверть периода.

Зависимость напряжения и силы тока от времени при чисто индуктивной нагрузке показана на рисунке 39.

Построим векторную диаграмму тока и напряжения в цепи с чисто индуктив-



ной нагрузкой ( $R \rightarrow 0$ ). По горизонтали будем откладывать напряжение, вращение векторов будем производить по часовой стрелке (рис. 40).

### Ёмкость в цепи переменного тока

Если в цепи постоянного тока последовательно с лампочкой включить конденсатор, тока в цепи не будет, лампочка не загорится. Если последовательно с лампочкой включить конденсатор и подключить этот участок к выходным клеммам звукового генератора, лампочка загорится (рис. 41). Через лампочку проходит ток периодической зарядки и разрядки конденсатора. Изменяя частоту подаваемого на этот участок напряжения, можно убедиться, что чем больше частота переменного тока, тем ярче горит лампочка.

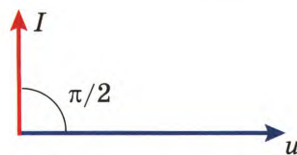


Рис. 40. Векторная диаграмма цепи с индуктивностью

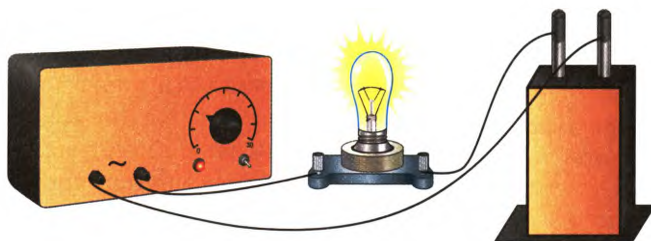


Рис. 41. Электрическая цепь, включающая конденсатор

Если взять конденсаторы разной ёмкости, можно увидеть, что чем больше ёмкость конденсатора, тем ярче горит лампочка.

Сопротивление конденсатора прохождению переменного тока называют **ёмкостным сопротивлением**  $X_C$ .

Проведённое исследование позволяет сделать вывод: ёмкостное сопротивление уменьшается при увеличении частоты переменного тока и ёмкости конденсатора.

Заряд конденсатора изменяется по гармоническому закону:

$$q = q_m \sin \omega t; u = U_m \sin \omega t.$$

Сила тока в любой момент времени равна производной заряда по времени:  $i = CU_m \omega \cos \omega t; i = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ .

**Сила тока опережает по фазе напряжение на четверть периода.**



Рис. 42. Векторная диаграмма цепи с ёмкостью

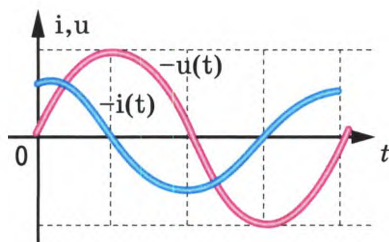


Рис. 43.  $i(t)$  и  $U(t)$  в цепи с чисто ёмкостной нагрузкой

Почему это происходит? При зарядке конденсатора в первый момент сила тока максимальна, потом она уменьшается, а напряжение на пластинах, создаваемое зарядами, увеличивается. Когда ток уменьшится до нуля, напряжение на пластинах оказывается максимальным.

Так как  $I_m = \omega C U_m \left( I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I} \right)$ , ёмкостное сопротивление равно

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

**Ёмкостное сопротивление обратно пропорционально циклической частоте и ёмкости конденсатора.**

На рисунке 42 показана векторная диаграмма напряжения и силы тока в цепи с ёмкостным сопротивлением, а на рисунке 43 — график зависимости напряжения и силы тока от времени при чисто ёмкостной нагрузке.

### Цепь переменного тока с активным, ёмкостным и индуктивным сопротивлениями

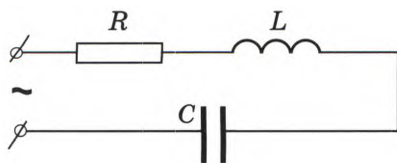


Рис. 44. Цепь переменного тока с  $R, C, L$

Соберём электрическую цепь с соединёнными последовательно резистором, конденсатором и катушкой индуктивности (рис. 44) и подключим к источнику переменного тока. Рассчитаем полное сопротивление  $Z$  данной цепи.

В любой момент времени напряжение  $u$ , создаваемое генератором, равно сумме напряжений на последовательных участках:

$$u = u_R + u_L + u_C.$$

Построим диаграмму напряжений для данного случая (рис. 45). Векторная сумма векторов  $\vec{U}_R$ ,  $\vec{U}_L$  и  $\vec{U}_C$  равна напряжению генератора. Так как напряжение пропорционально сопротивлению, из рисунка 45 можно записать:  $Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$ .





$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Минимальным сопротивление цепи со смешанной нагрузкой окажется в том случае, когда индуктивное сопротивление будет равно ёмкостному сопротивлению. Тогда полное сопротивление будем определять только активным сопротивлением:  $Z = R$ . Сила тока в цепи будет максимальной. Этот случай носит название **электрического резонанса**.

Резонансную частоту можно найти по формуле:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

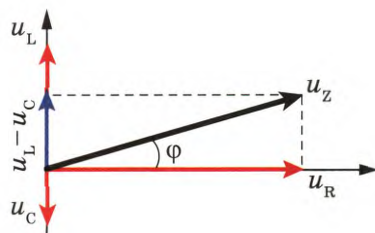


Рис. 45. Диаграмма напряжений в цепи с  $R, L, C$

1. Какова зависимость индуктивного сопротивления от частоты переменного тока и индуктивности катушки?
2. Какова зависимость ёмкостного сопротивления от частоты переменного тока и ёмкости конденсатора?
3. Как изменится накал сетевой лампы, если в соленоид, включённый последовательно с ней, ввести железный сердечник?
4. В каком случае возникает электрический резонанс?
- 5 (I). Каково индуктивное сопротивление катушки с индуктивностью 0,2 Гн при частоте тока 50 Гц? 400 Гц? **(63 Ом; 500 Ом)**
- 6 (I). Катушка с ничтожно малым активным сопротивлением включена в цепь переменного тока с частотой 50 Гц. При напряжении 125 В сила тока равна 2,5 А. Какова индуктивность катушки? **(0,16 Гн)**
- 7 (I). Каково сопротивление конденсатора ёмкостью 4 мкФ в сетях с частотой 50 и 400 Гц? **(800 Ом; 100 Ом)**
- 8 (I). Конденсатор включён в сеть переменного тока стандартной частоты и напряжением 220 В. Сила тока в цепи этого конденсатора равна 2,5 А. Какова ёмкость конденсатора? **(36 мкФ)**
- 9 (II). В сеть переменного тока стандартной частоты напряжением 200 В последовательно включены резистор сопротивлением 150 Ом и конденсатор ёмкостью 16 мкФ. Найдите полное сопротивление цепи, силу тока в ней, напряжение на зажимах резистора. **(250 Ом; 0,8 А; 120 В)**





- 10 (II). Проводник имеет активное сопротивление 15 Ом и индуктивность 63 мГн. Найдите полное сопротивление проводника в сети переменного тока стандартной частоты. (25 Ом)

## § 7. Трансформатор. Производство и передача электроэнергии



1. Что такое самоиндукция?

1. Явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока.

2. В чём заключается правило Ленца?

2. Индукционный ток имеет такое направление, что своим магнитным полем стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которое вызвало этот ток, строго говоря, препятствует изменению магнитного потока, который его вызвал.

3. Какое направление имеет ток самоиндукции?

3. Ток самоиндукции всегда направлен против тока источника.



### Устройство трансформатора

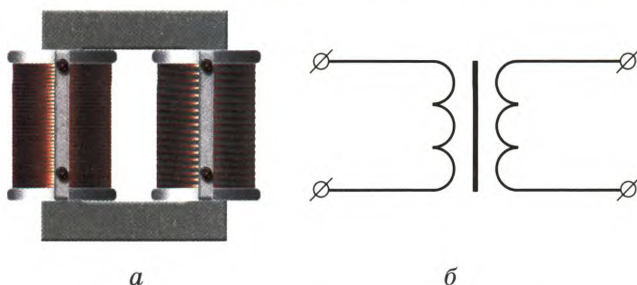
При практическом использовании переменного тока часто приходится изменять его напряжение: повышать или понижать. С этой целью используется трансформатор (рис. 46).

Трансформатор (рис. 47) представляет собой две катушки (обмотки), надетые на замкнутый железный сердечник. Сердечник набирается из отдельных пластин мягкой (трансформаторной) стали для борьбы с вихревыми токами, которые в сплошном сердечнике могут достигать больших значений и приводить к ненужному нагреву.

Первичная обмотка соединяется с источником переменного тока, например генератором. Клеммы вторичной обмотки подключаются к нагрузке, например к лампочке (рис. 48). Пусть первичная обмотка содержит  $N_1$  витков проволоки, а вторичная —  $N_2$  витков.

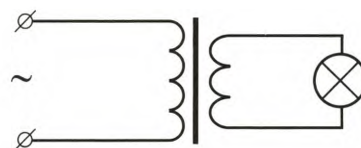


Рис. 46. Трансформатор



**Рис. 47:** а — внешний вид трансформатора; б — изображение трансформатора на схеме

Переменный ток  $i_1$ , протекающий в первичной обмотке, создаёт в сердечнике переменное магнитное поле, замкнутые линии которого сконцентрированы внутри сердечника. Магнитный поток во вторичной обмотке оказывается таким же, как и в первичной. При этом в каждой обмотке возникает ЭДС индукции:  $\varepsilon_1 = e N_1$  и  $\varepsilon_2 = e N_2$ , где  $e$  — ЭДС индукции в одном витке.



**Рис. 48.** Нагруженный трансформатор

Отношение ЭДС индукции в обмотках:  $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$ .

Если сопротивлением обмоток пренебречь, то ЭДС индукции в них окажутся равны напряжению на их клеммах, и можно записать отношение

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

где  $k$  — коэффициент трансформации. Если  $k > 1$ , то есть вторичная обмотка содержит больше витков, чем первичная, трансформатор **повышает напряжение**. Если  $k < 1$ , то есть вторичная обмотка содержит меньше витков, чем первичная, трансформатор **понижает напряжение**.

Например, если первичная обмотка содержит 1000 витков, а вторичная только 100 витков, это означает, что трансформатор понижающий. Он понижает напряжение в 10 раз.

Если не учитывать потери энергии на нагревание обмоток и на перемagnetивание сердечника, которые составляют 2—3% от мощности источника в первичной обмотке, то можно записать:  $P_1 = P_2$ ,  $I_1 U_1 = I_2 U_2$ . Отсюда следует:



**Силы токов в обмотках нагруженного трансформатора  
обратно пропорциональны напряжениям на концах обмоток.**

Поэтому обмотка, рассчитанная на более низкое напряжение, выполняется из проволоки с большим поперечным сечением.

КПД современных трансформаторов достигает 98—99%, а определяется он по формуле  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$ .

Если на первичную обмотку подано напряжение, а цепь вторичной обмотки разомкнута, то трансформатор работает на **холостом ходу** ( $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ ). В этом режиме трансформатор энергию практически не потребляет.

**Производство и передача электроэнергии**

Электрическая энергия производится на электростанциях. Если ротор генератора переменного тока установлен на одном валу с гидротурбиной, генератор называется **гидрогенератором** (ГЭС). Если генератор объединён с паровой турбиной, он называется **турбогенератором** (ТЭС). Всё большую роль в энергетике играют АЭС.

Электроэнергия удобна тем, что может передаваться по проводам на большие расстояния. Однако при этом часть энергии неизбежно расходуется на нагревание проводов, то есть происходят потери электроэнергии.

По закону Джоуля—Ленца  $Q = I^2 Rt$ . Чтобы уменьшить потери энергии, надо либо уменьшить активное сопротивление проводов, либо уменьшить силу тока в проводах. Уменьшить сопротивление можно за счёт увеличения площади поперечного сечения провода, но это экономически невыгодно. Провода станут слишком тяжёлыми, и потребуется большое количество ценных цветных металлов.

Чтобы уменьшить силу тока при одной и той же передаваемой мощности, можно увеличить напряжение. Увеличение напряжения, например, в 10 раз приведёт к уменьшению силы тока в 10 раз и к уменьшению потерь электроэнергии в 100 раз! Поэтому строятся высоковольтные линии электропередач (110 кВ, 220 кВ, 500 кВ).

На электростанции вырабатываемое генератором напряжение 11 кВ повышают, например, до 110 кВ. Высокое напряжение по ЛЭП (рис. 49) передаёт-

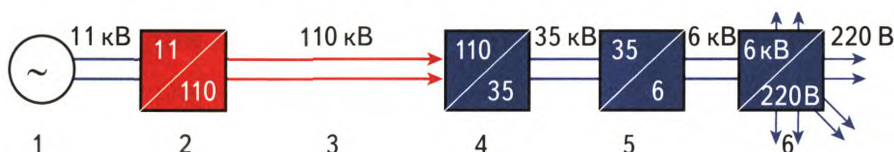


**Рис. 49.** Линия электропередачи (ЛЭП)



ся на большое расстояние. Вблизи большого города на понижающей подстанции напряжение понижают до 35 кВ. На следующей понижающей подстанции напряжение понижается до 6 кВ, наконец, последний понижающий трансформатор в каком-либо микрорайоне города понижает напряжение до 220 В.

Это напряжение подаётся в осветительную сеть. На рисунке 50 показана схема передачи и распределение электроэнергии.



**Рис. 50.** Схема передачи и распределения электрической энергии:

- 1 — генератор; 2 — повышающий трансформатор;  
3 — высоковольтная линия электропередачи (ЛЭП);  
4, 5, 6 — понижающие трансформаторы

1. Как устроен и работает трансформатор?
2. Почему сердечник трансформатора делают замкнутым?
3. Почему сердечник набирают из тонких изолированных друг от друга пластин?
4. Понижающий или повышающий трансформатор изображён на рисунке 48?
5. Сравните понижающий и повышающий трансформаторы.
6. Почему повышение напряжения на линии электропередачи ведёт к уменьшению потерь электроэнергии?
7. Напряжение, выработанное генератором, повысили в 100 раз. Во сколько раз уменьшились потери электроэнергии при передаче?
8. Нарисуйте схему передачи электроэнергии от генератора до потребителя.
9. В каких устройствах, используемых вами в быту, есть трансформатор?
10. (I). Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 900 витков, повышает напряжение с 220 В до 660 В. Найдите его коэффициент трансформации. Сколько витков содержит вторичная обмотка трансформатора? В какой обмотке провод имеет большее сечение? **(3; 2700; в первой)**
11. (II). Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 0,1, включён в сеть с напряжением 220 В.







Найдите напряжение на выходе трансформатора, если сопротивление вторичной обмотки  $0,2\ \text{Ом}$ , а сопротивление полезной нагрузки  $2\ \text{Ом}$ ? (20 В)

## Лабораторная работа 1

### Изучение явления электромагнитной индукции

**Цель работы:** наблюдение появления в контуре индукционного тока при движении магнита относительно контура и при изменении силы тока в расположенной рядом катушке.

**Приборы и материалы:** миллиамперметр лабораторный; батарея  $4,5\ \text{В}$ ; ключ; две катушки; магнит полосовой или дугообразный; железный сердечник; соединительные провода.

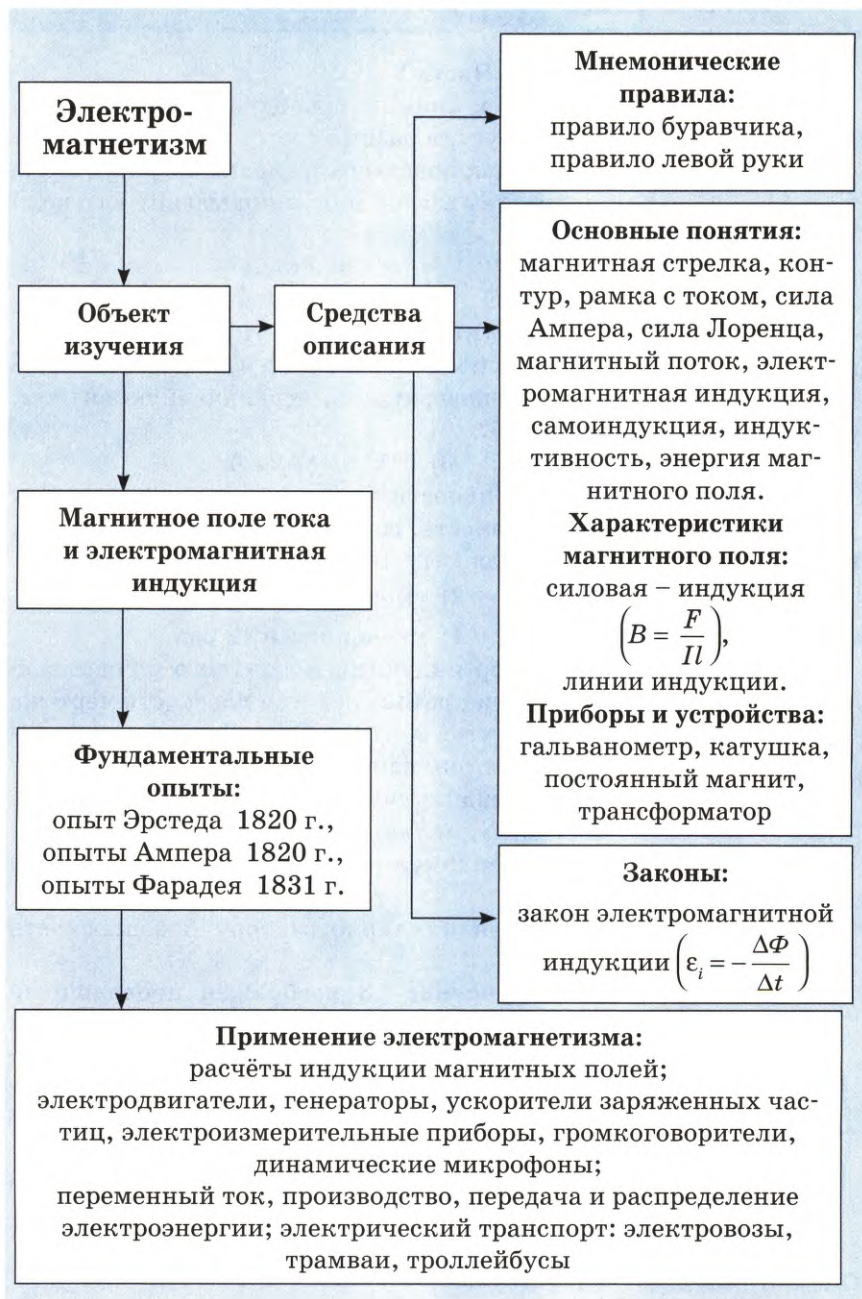
#### Порядок выполнения работы

1. Присоедините выводы катушки к клеммам миллиамперметра.
2. Введите постоянный магнит в катушку, наблюдая за отклонением стрелки миллиамперметра. Повторите наблюдение, выдвигая магнит из катушки и затем меняя полюсы магнита. Сделайте вывод.
3. Изучите, как влияет скорость движения магнита относительно катушки на величину тока индукции. Сделайте вывод.
4. Зарисуйте схему опыта и проверьте выполнение правила Ленца при вдвигании магнита в катушку и при выдвигании из неё.
5. Расположите вторую катушку, соединённую с гальваническим элементом, рядом с первой так, чтобы их оси совпадали. Вставьте в катушки железную ось. Замыкая и размыкая цепь второй катушки, наблюдайте отклонения стрелки миллиамперметра.
6. Зарисуйте схему опыта и проверьте выполнение правила Ленца.
7. Сформулируйте вывод по результатам эксперимента.





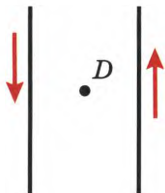
## Структура и содержание главы «Электромагнетизм»





## Задания для повторения главы I

### Часть 1



**Рис. 51.** Схематическое изображение к заданию 1

1. По двум тонким проводникам, параллельным друг другу, в разные стороны текут одинаковые токи  $I$ , как показано стрелками на рисунке 51. Как направлен вектор индукции магнитного поля в точке  $D$ ?

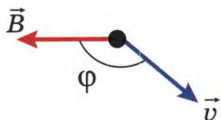
- |                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| 1) вверх $\uparrow$ | 3) от нас $\odot$    |
| 2) к нам $\odot$    | 4) вниз $\downarrow$ |

2. Индуктивность витка проволоки равна  $2 \cdot 10^{-3}$  Гн. При какой силе тока в витке магнитный поток через поверхность, ограниченную витком, равен 12 мВб?

- 1)  $24 \cdot 10^{-6}$  А    2) 0,17 А    3) 6 А    4) 24 А

3. Через катушку индуктивности течёт постоянный ток. Как нужно изменить её индуктивность, сохраняя силу тока прежней, чтобы энергия магнитного поля катушки возросла вдвое?

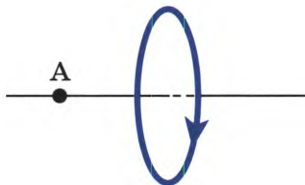
- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1) увеличить в $\sqrt{2}$ раз | 3) уменьшить в 2 раза         |
| 2) увеличить в 2 раза         | 4) уменьшить в $\sqrt{2}$ раз |



**Рис. 52.** Схематическое изображение к заданию 4

4. Вектор индукции магнитного поля и вектор скорости протона лежат в плоскости чертежа и образуют угол  $\varphi = 135^\circ$ . Сила Лоренца, действующая на протон, направлена (рис. 52):

- |  |
|--|
| 1) перпендикулярно плоскости чертежа вверх               |
| 2) перпендикулярно плоскости чертежа вниз                |
| 3) перпендикулярно вектору $\vec{v}$ в плоскости чертежа |
| 4) перпендикулярно вектору $\vec{B}$ в плоскости чертежа |



**Рис. 53.** Схематическое изображение к заданию 5

5. На рисунке 53 изображён проволочный виток, по которому течёт электрический ток в направлении, указанном стрелкой. Виток расположен в вертикальной плоскости. Точка  $A$  находится на горизонтальной прямой, проходящей через центр витка перпендикулярно его плоскости. Как направлен вектор магнитной индукции магнитного поля тока в точке  $A$ ?

- |                                       |
|---------------------------------------|
| 1) вертикально вверх $\uparrow$       |
| 2) вертикально вниз $\downarrow$      |
| 3) горизонтально вправо $\rightarrow$ |
| 4) горизонтально влево $\leftarrow$   |





6. Прямолинейный проводник длиной  $L$  с током  $I$  помещён в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции  $B$ . Как изменится сила Ампера, действующая на проводник, если его длину увеличить в 2 раза, а силу тока в проводнике уменьшить в 4 раза?

- 1) не изменится
- 2) уменьшится в 4 раза
- 3) увеличится в 2 раза
- 4) уменьшится в 2 раза

7. В опыте по исследованию ЭДС электромагнитной индукции квадратная рамка со стороной квадрата  $b$  находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости рамки. Индукция поля возрастает за время  $t$  по линейному закону от 0 до максимального значения  $B_m$ . Как изменится ЭДС индукции, возникающая в рамке, если  $b$  увеличить в 2 раза?

- 1) не изменится
- 2) уменьшится в 2 раза
- 3) увеличится в 2 раза
- 4) увеличится в 4 раза

8. К магнитной стрелке, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости чертежа, поднесли постоянный полосовой магнит. При этом стрелка (рис. 54)

- 1) повернётся на  $180^\circ$
- 2) повернётся на  $90^\circ$  по часовой стрелке
- 3) повернётся на  $90^\circ$  против часовой стрелки
- 4) останется в исходном положении

9. Электрическая цепь, состоящая из четырёх прямолинейных горизонтальных проводников (1–2, 2–3, 3–4, 4–1) и источника постоянного тока, находится в однородном магнитном поле (рис. 55). Вектор магнитной индукции направлен горизонтально вправо. Куда направлена вызванная этим полем сила Ампера, действующая на проводник 1–2?

- 1) горизонтально влево  $\leftarrow$
- 2) горизонтально вправо  $\rightarrow$
- 3) вертикально вниз  $\downarrow$
- 4) вертикально вверх  $\uparrow$



Рис. 54. Полосковый магнит и магнитная стрелка (к заданию 8)

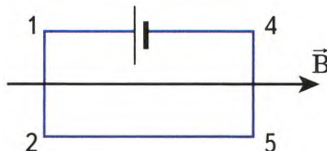


Рис. 55. Схематичное изображение к заданию 9

10. Если частоту вращения ротора генератора переменного тока увеличить в 2 раза, то амплитуда ЭДС, производимой генератором:

- 1) останется неизменной
- 2) увеличится в 2 раза
- 3) уменьшится в 2 раза
- 4) увеличится в 10 раз





## Часть 2\*

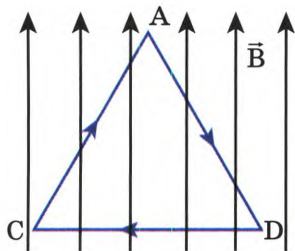


Рис. 56. Схематичное изображение к заданию 1

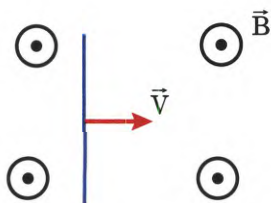


Рис. 57. Схематичное изображение к заданию 3

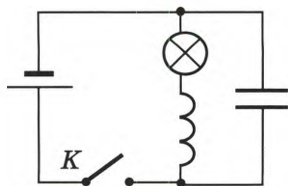


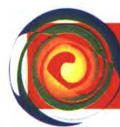
Рис. 58. Схематичное изображение к заданию 4

1. На непроводящей горизонтальной поверхности стола лежит проводящая жёсткая рамка из однородной проволоки, согнутая в виде равностороннего треугольника  $ADC$  со стороной, равной  $a$  (рис. 56). Рамка, по которой течёт ток  $I$ , находится в однородном горизонтальном магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен стороне  $CD$ . Каким должен быть модуль индукции магнитного поля, чтобы рамка начала поворачиваться вокруг стороны  $CD$ , если масса рамки равна  $m$ ? ( $2 mg/3 Ia$ )

2. Медное кольцо, диаметр которого 20 см, а диаметр провода кольца 2 мм, расположено в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого меняется по модулю со скоростью 1,09 Тл/с. Плоскость кольца перпендикулярна вектору магнитной индукции. Удельное сопротивление меди равно  $1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Чему равен возникающий в кольце индукционный ток? (9 А)

3. Горизонтально расположенный проводник длиной 1 м движется равноускоренно в вертикальном однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,5 Тл и направлена перпендикулярно проводнику и скорости его движения (рис. 57). Начальная скорость проводника равна нулю, ускорение  $8 \text{ м/с}^2$ . ЭДС индукции на концах проводника в конце перемещения равна 2 В. На какое расстояние переместился при этом проводник? (1 м)

4. В электрической цепи, показанной на рисунке 58, ЭДС источника тока равна 4,5 В, ёмкость конденсатора 2 мФ, индуктивность катушки 20 мГн и сопротивление лампы 5 Ом. В начальный момент времени ключ  $K$  замкнут. Какая энергия выделится в лампе после размыкания ключа? Внутренним сопротивлением источника, а также сопротивлением катушки и проводов пренебречь. (28,35 мДж)



### § 8. Свободные электромагнитные колебания

1. Какая физическая величина в механике аналогична индуктивности катушки в электродинамике?

2. При какой циклической частоте в электрической цепи переменного тока с индуктивностью и ёмкостью наступает электрический резонанс?

3. Как рассчитать период колебаний груза на пружине?

4. Какие колебания называются свободными?

5. Какие колебания называются вынужденными?

6. Как рассчитать энергию магнитного поля катушки с током и энергию электрического поля конденсатора?

1. Индуктивности катушки аналогична масса тела.

$$2. \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

$$3. \text{ По формуле: } T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

4. Свободными колебаниями называются колебания в системе под действием внутренних сил, после того как системе сообщён первоначальный запас энергии.

5. Вынужденными называются колебания, происходящие под действием периодически изменяющейся внешней силы.

6. По формулам:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}; W_e = \frac{CU^2}{2}; W_e = \frac{q^2}{2C}.$$



#### Опытный факт

Если заряженный конденсатор большой ёмкости на короткое время замкнуть на катушку с железным сердечником, то после размыкания цепи возможны варианты: конденсатор окажется частично разряженным, полностью разряженным или перезаряженным.

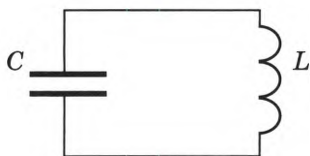


**Наша гипотеза:** в цепи, состоящей из конденсатора и катушки, возникают периодические изменения напряжения на клеммах конденсатора и силы тока в витках катушки. Результат опыта зависит от соотношения промежутка времени, в течение которого цепь была замкнута, и периода изменения напряжения на конденсаторе.

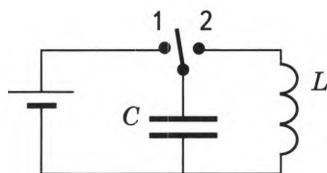


В науке подобная гипотеза была выдвинута при изучении явления разрядки конденсатора почти сразу после изобретения лейденской банки.

**Периодические изменения напряжения, силы тока и заряда в электрических цепях называются электромагнитными колебаниями.**



**Рис. 59.** Колебательный контур



**Рис. 60.** Получение свободных колебаний в электрической цепи

С вынужденными электрическими колебаниями вы уже знакомы — это переменный ток. Частота этих колебаний задаётся генератором, амплитуда определяется параметрами электрической цепи.

Свободные электромагнитные колебания происходят в колебательном контуре, представляющем собой соединённые друг с другом конденсатор с ёмкостью  $C$  и катушку с индуктивностью  $L$  (рис. 59).

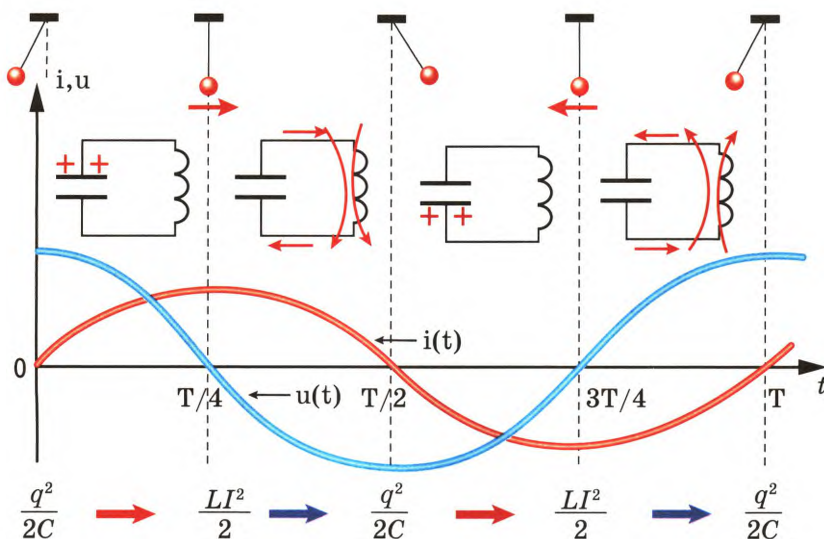
Соберём электрическую цепь, изображённую на рисунке 60. Поставим переключатель в положение 1 — конденсатор зарядится до напряжения, равного ЭДС батареи. Переведём переключатель в положение 2 — в цепи начнут происходить свободные колебания силы тока и напряжения. Рассмотрим этот процесс подробнее по четвертям периода. Пусть в момент времени, принятый за начальный, верхняя обкладка конденсатора имеет положительный заряд (рис. 61).

**Первая четверть периода ( $0 - 1/4 T$ )**

Конденсатор разряжается через катушку  $L$ . Сила тока нарастает постепенно. В катушке возникает ЭДС самоиндукции, сдерживающая разряд конденсатора. К концу этой четверти периода конденсатор разряжается полностью, а сила тока достигает максимального значения. Энергия электрического поля конденсатора переходит в энергию магнитного поля катушки  $L$ :

$$W = \frac{q^2}{2C} \rightarrow \frac{LI^2}{2}$$





**Рис. 61.** Процессы, происходящие в колебательном контуре, по четвертям периода

### Вторая четверть периода ( $1/4T — 1/2T$ )

Сила тока в катушке уменьшается. Магнитный поток через витки катушки уменьшается. Ток самоиндукции задерживает уменьшение тока через катушку. Постепенно ослабевающий ток перезаряжает конденсатор. К концу этого промежутка времени сила тока уменьшается до нуля, а конденсатор приобретает максимальный заряд, но теперь положительно заряжена нижняя обкладка. Вся энергия оказывается опять сосредоточенной в электрическом поле конденсатора.

### Третья четверть периода ( $1/2T — 3/4T$ )

Конденсатор разряжается в обратном (по сравнению с первой четвертью периода) направлении. Сила тока увеличивается. Магнитный поток через катушку увеличивается. Ток самоиндукции задерживает увеличение тока разрядки конденсатора. К концу этой четверти периода значение силы тока максимально, а конденсатор полностью разряжен. Вся энергия контура в этот момент сосредоточена в магнитном поле катушки  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ .

**Четвёртая четверть периода ( $3/4T$  —  $T$ )**

Сила тока уменьшается, магнитное поле катушки ослабевает и ток самоиндукции, препятствующий этому ослаблению, перезаряжает конденсатор. В результате к моменту времени  $t = T$  система возвращается в исходное состояние и начинается повторение всех процессов.

Таким образом, в колебательном контуре возникают электромагнитные колебания с периодом  $T$ : в течение первой половины периода ток идёт в одном направлении, а в течение второй половины периода — в противоположном направлении.

Электромагнитные колебания в контуре сопровождаются периодическими взаимными превращениями энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки, подобно тому, как колебания маятника сопровождаются переходами энергии из потенциальной в кинетическую и обратно (см. рис. 61, вверх).

Если бы в контуре не было потерь энергии (на нагревание проводов и на электромагнитное излучение), то электрические колебания совершались бы по гармоническому закону. В соответствии с условием электрического резонанса (§ 7) частота колебаний, возникающих в контуре, должна равняться резонансной частоте контура:

$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , тогда период равен:

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

Последняя формула носит название **формулы Томсона**. Увеличение ёмкости конденсатора ведёт к увеличению времени его разрядки, увеличение индуктивности катушки ведёт к увеличению ЭДС самоиндукции и вследствие этого к уменьшению скорости изменения силы тока. Поэтому, увеличивая  $L$  и  $C$ , мы увеличиваем период свободных колебаний в контуре.

Полная энергия колебательного контура равна максимальной энергии электрического поля конденсатора и максимальной энергии магнитного поля катушки  $\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$ . В любой момент времени полная энергия контура равна сумме энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2}; \quad \frac{LI_m^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2}; \quad \frac{q_m^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}$$



Период колебаний **энергии** магнитного поля катушки, а также период колебания **энергии** электрического поля конденсатора в 2 раза меньше периода свободных колебаний напряжения на обкладках конденсатора и силы тока в контуре.

$$T_{\text{э}} = T_{\text{м}} = \pi\sqrt{LC}.$$

1. Что представляет собой колебательный контур?
2. Как можно сообщить колебательному контуру первоначальный запас энергии?
3. Используя рисунок 61, опишите процессы, происходящие в колебательном контуре, по четвертям периода.
4. Чему равна полная энергия контура в любой момент времени?
5. Как рассчитать период свободных колебаний в колебательном контуре?
6. Как рассчитать период колебаний энергии магнитного поля катушки в колебательном контуре?
7. Индуктивность контура увеличили в 2 раза, а ёмкость уменьшили в 2 раза. Как изменился период свободных колебаний в контуре?
8. Каким образом можно увеличить частоту электромагнитных колебаний в контуре?
- 9 (I). Зависимость силы тока от времени в колебательном контуре описывается уравнением  $I = 0,1 \sin 300\omega t$ . Найдите индуктивность контура, если максимальная энергия электрического поля конденсатора равна 0,005 Дж. **(1 Гн)**
- 10 (I). Емкость контура равна 300 пФ. Какой должна быть индуктивность контура, чтобы он резонировал на частоту электромагнитных колебаний  $10^6 \text{ с}^{-1}$ ? **(3,3 мГн)**
- 11 (II). Определите резонансную частоту контура, если максимальный заряд конденсатора равен 1 мкКл, а максимальный ток в контуре составляет 10 А. **( $10^7 \text{ с}^{-1}$ )**



## § 9\*. Автоколебательная система

1. Почему колебания в колебательном контуре всегда затухающие?

1. Потому что первоначально запасённая энергия переходит во внутреннюю энергию проводов.







2. Что представляет собой транзистор  $p$ - $n$ - $p$ ?

2. Между двумя полупроводниками  $p$ -типа (эмиттер и коллектор) заключён узкий слой полупроводника  $n$ -типа (база).

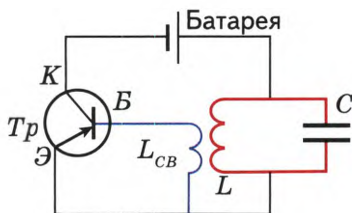
3. В каком случае электрический ток проходит через транзистор от эмиттера к коллектору?

3. Ток от Э к К проходит в том случае, если от отдельного источника пропускается ток от Э к Б, где Э — эмиттер, К — коллектор, Б — база.



В технике часто встречается такой вид незатухающих колебаний, при котором потери энергии в течение каждого периода восполняются за счёт постоянного источника энергии. Этот источник включается автоматически в нужные моменты времени самой колебательной системой. Такие колебания называются **автоколебаниями**. Примерами автоколебательных систем могут служить

часы, которые работают за счёт потенциальной энергии поднятой гири или потенциальной энергии деформированной пружины, а также генератор незатухающих колебаний с транзистором, к рассмотрению работы которого мы и переходим.



**Рис. 62.** Схема генератора и график незатухающих колебаний

Схема генератора незатухающих колебаний показана на рисунке 62. К колебательному контуру  $LC$  через транзистор  $Tr$  подключён источник постоянного напряжения — **батарея**. Между базой  $Б$  и эмиттером  $Э$  включена катушка связи  $L_{св}$ , индуктивно связанная с катушкой колебательного контура  $L$ . Если потенциал базы выше потенциала эмиттера, ток в цепи батареи не идёт. Если потенциал базы ниже потенциала эмиттера, ток идёт.

Рассмотрим работу генератора (автоколебательного контура) по четвертям периода, представленную в таблице 2. Пусть в начальный момент времени нижняя обкладка конденсатора имеет максимальный положительный электрический заряд.



Таблица 2

Промежуток времени	В колебательном контуре	В цепи батареи
$0 - T/4$	Конденсатор разряжается через катушку $L$ . Сила тока в катушке $L$ увеличивается. Магнитный поток через обе катушки нарастает. В катушке обратной связи $L_{св}$ возникает ЭДС индукции: эта катушка подключена так, что потенциал базы выше потенциала эмиттера	Транзистор не пропускает ток батареи
$T/4 - T/2$	Поддерживаемый ЭДС самоиндукции ток через катушку $L$ продолжает течь, постепенно ослабевая. Теперь магнитный поток через катушку уменьшается. ЭДС индукции изменяет направление на противоположное: потенциал базы оказывается ниже потенциала эмиттера	Через транзистор проходит ток батареи. Этот ток подзаряжает конденсатор (положительный заряд верхней пластины увеличивается от нуля до максимального значения). При этом увеличивается энергия электрического поля конденсатора
$T/2 - 3T/4$	Сила тока в катушке $L$ увеличивается (в обратном направлении). Магнитный поток через обе катушки нарастает. ЭДС индукции в катушке обратной связи имеет прежнее направление. Потенциал базы опять ниже потенциала эмиттера	Ток батареи увеличивает ток разрядки конденсатора и тем самым увеличивает энергию магнитного поля катушки $L$



Окончание табл. 2

Промежуток времени	В колебательном контуре	В цепи батареи
$3T/4 - T$	Ток через катушку $L$ постепенно ослабевает, магнитный поток через катушку уменьшается. Теперь ЭДС индукции в катушке связи направлена так, что потенциал базы выше потенциала эмиттера	Ток в цепи батареи отсутствует

Таким образом, батарея подпитывает колебательный контур только в те промежутки времени, когда верхняя пластина конденсатора имеет положительный заряд. Катушка связи управляет работой транзистора, играющего роль клапана: она открывает и закрывает транзистор в нужные моменты времени.



1. Какие колебания называют автоколебаниями?
2. Начертите схему генератора незатухающих колебаний.
3. Назовите основные элементы генератора незатухающих колебаний на транзисторе. Какую функцию выполняет каждый из этих элементов?
4. Опишите работу автоколебательного контура по четвертям периода.

## § 10. Электромагнитные волны



1. Что такое механическая волна?

2. Чем отличаются продольные волны от поперечных?

1. Процесс распространения колебаний в упругой среде.

2. В продольной волне направление распространения совпадает с направлением колебаний частиц среды. В поперечной волне направление распространения перпендикулярно направлению колебаний частиц.





3. Что такое длина волны?

3. Расстояние между двумя ближайшими частицами, совершающими колебания в одинаковой фазе. На расстояние, равное длине волны, колебания распространяются за время, равное одному периоду колебаний частиц:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$$

### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. Настрою сердце на любовь / И буду принимать сигналы / От множества **радиоволн**. / И через тысячи каналов (С. Селезнёв).

2. Рентгеновские лучи проходят через непрозрачные для света тела (рис. 63).

3. С неба светит солнце / Миллионы лет / Льёт на землю солнце / И **тепло** и **свет** (Д. Гулиа).

4. **Гамма-лучи** используются для лечения раковых опухолей.

**Общее в рассмотренных явлениях:** электромагнитные колебания различных частот (радиоволны, инфракрасное излучение, свет, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение) распространяются в пространстве.



**Рис. 63.** Фотографии цветов, сделанные с помощью рентгеновских лучей

Всё окружающее нас пространство пронизано **электромагнитным излучением**. Солнце, звёзды, нагретые тела, антенны радиостанций и телевизионных станций являются источниками электромагнитных волн различной частоты.

В 1864 г. **Джеймс Максвелл** создал **теорию электромагнитного поля**. Он теоретически доказал, что постоянные электрические и магнитные поля являются лишь частными случаями единого электромагнитного поля. Всякое изменение во времени магнитного поля порождает в



**Дж. Максвелл**  
(1831–1879)



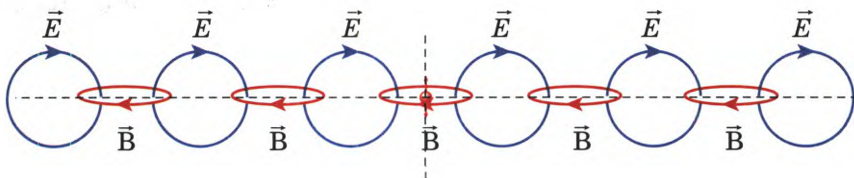
окружающем пространстве вихревое переменное электрическое поле, а всякое изменение электрического поля порождает вихревое переменное магнитное поле.

**Порождающие друг друга переменные электрическое и магнитное поля образуют единое электромагнитное поле.**

Некоторое представление о характере электромагнитного поля может дать рисунок 64. Связанные первоначально с зарядами и токами, переменные электрические и магнитные поля могут отделяться от них и существовать независимо от зарядов и токов. Порождая друг друга, переменные электрические и магнитные поля перемещаются в пространстве со скоростью

$$v = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}$$

где  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  — электрическая и магнитная постоянные,  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Для вакуума  $\epsilon = 1$  и  $\mu = 1$ . В вакууме электромагнитные поля распространяются со скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/с.



**Рис. 64.** «Мгновенный снимок» электромагнитного поля

**Процесс распространения в пространстве электромагнитного поля называется электромагнитной волной.**

Максвелл также предположил, что свет — электромагнитная волна.

В электромагнитной волне вектор напряжённости электрического поля и вектор индукции магнитного поля перпендикулярны друг другу и направлению распространения (рис. 65).



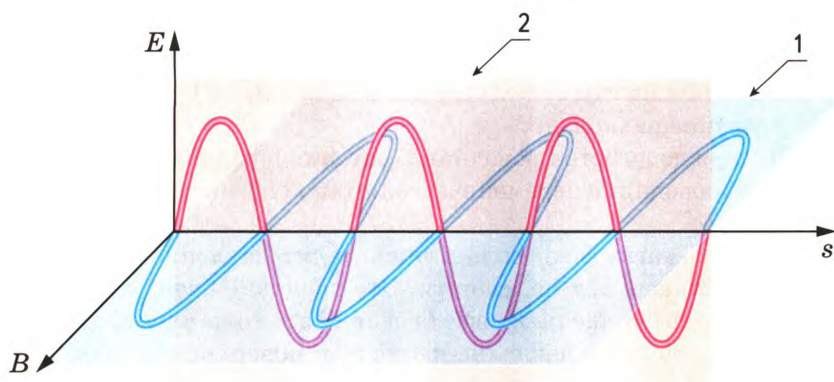


Рис. 65. Электромагнитная волна

В 1886 г. немецкий физик **Генрих Герц** экспериментально доказал существование электромагнитных волн и исследовал их свойства. Герц использовал источник высокого напряжения и вибраторы — пары металлических стержней, разделённых искровым промежутком.

Колебательный контур, рассмотренный нами в предыдущих параграфах, называют **закрытым**: энергия электрического поля сосредоточена в основном между обкладками конденсатора, а энергия магнитного поля — между витками катушки. В пространство такой контур энергию практически не излучает.

Если раздвинуть обкладки конденсатора и заменить одну из них горизонтальным проводом — антенной, а другую заземлить, то получится **открытый** колебательный контур, излучающий в пространство электромагнитные колебания. Вибратор Герца — это, по существу, открытый колебательный контур с очень малой ёмкостью и индуктивностью.

Следовательно, частота свободных электромагнитных колебаний в вибраторе Герца очень велика, она составляет сотни мегагерц.

Расчёты показали, что мощность излучения антенны очень сильно зависит от частоты колебаний ( $P \sim \nu^4$ ), поэтому для излучения электромагнитных волн используются колебания **высокой** частоты.

Уточним некоторые свойства электромагнитных волн.

1. Электромагнитная волна — поперечная волна (см. рис. 65). Вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен вектору  $\vec{E}$  и направлению распространения волны ( $\vec{B} \perp \vec{E} \perp \vec{\nu}$ ).

Г. Герц  
(1857—1894)





2. Электромагнитные волны распространяются в вакууме с конечной скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

3. Электромагнитные волны с длиной волны от 0,1 мм до 30 км носят название радиоволн.

4. Доходя до любого проводника (антенны), радиоволны вызывают в этом проводнике переменные токи такой же частоты, что и частота волн.

5. Электромагнитные волны производят давление на препятствия, встречающиеся на их пути. Это давление очень мало. Так, в ясный полдень солнечный свет (а свет — это тоже электромагнитная волна) оказывает давление на чёрную поверхность, приблизительно  $4 \cdot 10^{-6}$  Па. Давление света удалось обнаружить и измерить русскому физiku П.Л. Лебедеву в 1900 г.

6. Для электромагнитных волн, как и для волн любой другой природы, характерны явления отражения (рис. 66), преломления, интерференции, дифракции.

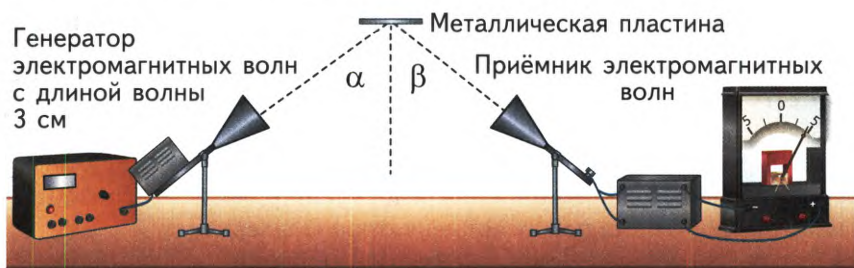


Рис. 66. Демонстрация отражения радиоволн

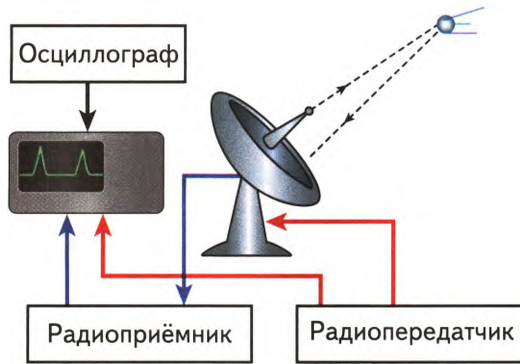
Отражение радиоволн нашло широкое применение в современной технике. Высокочувствительные приёмники улавливают и усиливают отражённый сигнал с целью получения информации о том, где находится отражающий объект.

**Обнаружение и точное определение местоположения объектов с помощью отражения радиоволн называется радиолокацией.**

В радиолокации используются импульсные электрические колебания сверхвысокой частоты ( $10^8$ — $10^9$  Гц). Мощный генератор сверхвысокой частоты (СВЧ) через специальную систему посылает импульсный сигнал. На экране осциллографа появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности. Сигнал доходит до объекта (самолёта, спутника и т.п.), отражается от него, возвращается



обратно и улавливается антенной. На экране осциллографа опять появляется всплеск (рис. 67). По его расстоянию от первого всплеска можно рассчитать дальность объекта.



**Рис. 67.** Схема радиолокационной установки

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолёты на расстоянии до нескольких сот километров. В аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолётами. Локаторы используются также в космических исследованиях.

1. Как образуется электромагнитное поле?
2. Что представляет собой электромагнитная волна?
3. Кто и когда предсказал существование электромагнитных волн?
4. Кто и когда экспериментально доказал существование электромагнитных волн и измерил их скорость?
5. Что является источником электромагнитной волны? Приведите примеры.
6. Как называется устройство для излучения и принятия радиоволн?
7. Чем открытый колебательный контур отличается от закрытого?
8. Почему для излучения электромагнитных волн используется высокая частота?
9. Какими свойствами обладают электромагнитные волны?
10. Какое свойство радиоволн используется в радиолокации?
11. Как работает радиолокационная установка?
12. Разделите текст на смысловые части и составьте план параграфа.





- 13 (I). На каком расстоянии от антенны радиолокатора находится объект, если отражённый от него радиосигнал возвратился обратно через 200 мкс? **(30 км)**
- 14 (II). Каким может быть максимальное число импульсов, испускаемых радиолокатором за 1 с, при разведывании цели, находящейся в 30 км от него? **(5000)**

## § 11. Радиопередача и радиоприём



- |   |  |
|---|--|
| 1. Что представляет собой открытый колебательный контур?              | 1. Колебательный контур, у которого обкладки конденсатора раздвинуты: одна заменена антенной, другая — землёй. |
| 2. Почему колебания в открытом колебательном контуре быстро затухают? | 2. Потому что запасённая энергия расходуется не только на нагревание проводов, но и на излучение.              |
| 3. Как интенсивность излучения радиоволн зависит от частоты?          | 3. Она пропорциональна четвёртой степени частоты: $I \sim \nu^4$ .   |
| 4. От чего зависит частота вынужденных колебаний?                     | 4. Частота вынужденных колебаний равна частоте внешней силы.   |

### Радиопередача



Открытый колебательный контур быстро теряет энергию. Это происходит не только из-за сопротивления проводников, но и из-за излучения радиоволн. Чтобы радиоволны излучались непрерывно, надо энергию открытого колебательного контура постоянно пополнять, забирая её от генератора незатухающих колебаний.

Если катушку открытого колебательного контура индуктивно связать (установить на одном железном сердечнике) с катушкой генератора незатухающих колебаний, то потери энергии в контуре будут постоянно восполняться за счёт энергии генератора (рис. 68). Получится радиопередатчик, непрерывно излучающий в пространство высокочастотные колебания (рис. 69).

Такой радиопередатчик может передавать определённую информацию (точки, тире), но этого недостаточно. Надо передавать речь,





музыку, т.е. колебания низкой (звуковой) частоты (рис. 70), интенсивность излучения которых ничтожно мала. Для осуществления поставленной задачи колебаниями низкой частоты воздействуют на амплитуду колебаний высокой частоты, вырабатываемых генератором незатухающих колебаний. В результате амплитуда высокочастотных колебаний изменяется в соответствии со звуковой частотой (рис. 71).

Этот процесс называется амплитудной модуляцией, а полученные колебания — амплитудно-модулированными.

**Амплитудно-модулированными называются колебания высокой частоты, амплитуда которых изменяется в соответствии со звуковой частотой.**

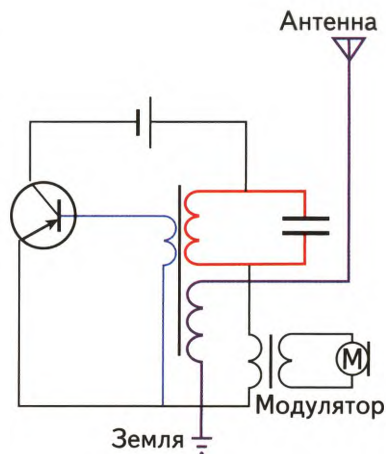


Рис. 68. Схема радиопередатчика

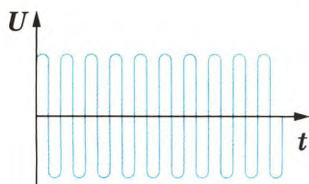


Рис. 69.  
Высокочастотные колебания

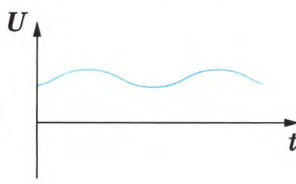


Рис. 70.  
Колебания звуковой частоты

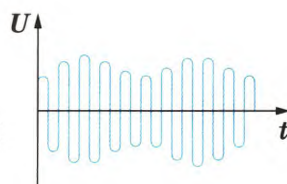


Рис. 71.  
Модулированные колебания

Для осуществления радиосвязи необходимо два устройства: радиопередатчик и радиоприёмник (рис. 72).

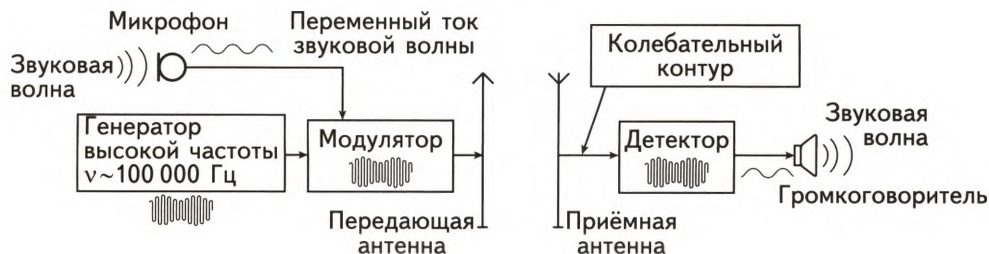


Рис. 72. Принципы радиосвязи



Основными элементами радиопередатчика являются микрофон, генератор электромагнитных колебаний высокой частоты, модулятор и антенна.

В **микрофоне** звуковые колебания преобразуются в электрические колебания низкой частоты. При этом амплитуда силы тока зависит от громкости звука, а частота равна частоте звуковых колебаний. Генератор электромагнитных колебаний задаёт **несущую** частоту, обычно от 100 кГц до 100 МГц. Каждая радиостанция вещает строго на своей частоте. Именно на неё мы настраиваем радиоприёмники.

**Модулятор**, основной частью которого является микрофон, преобразует высокочастотные колебания с постоянной амплитудой, вырабатываемые генератором, в высокочастотные колебания, амплитуда которых изменяется со звуковой частотой — амплитудно-модулированные колебания. **Антенна** передатчика излучает модулированные электромагнитные волны высокой частоты.

Основными элементами радиоприёмника являются: антенна и заземление, приёмный колебательный контур с конденсатором переменной ёмкости, детектор и громкоговоритель (динамик).

**Антенна и заземление** радиоприёмника принимают от всевозможных радиостанций электромагнитные волны, которые возбуждают в приёмном контуре электромагнитные колебания.

Изменяя ёмкость конденсатора в **приёмном контуре**, мы изменяем собственную частоту этого контура и тем самым настраиваем радиоприёмник на определённую радиостанцию. При совпадении собственной частоты контура с частотой, на которой работает радиостанция, возникает электрический резонанс, и амплитуда колебаний силы тока в контуре становится максимальной.

**Детектор** — устройство для выделения из принятых модулированных колебаний электромагнитных колебаний звуковой частоты. Основным звеном детектора является элемент с односторонней проводимостью, например двухэлектродная электронная лампа или **полупроводниковый диод**.

**Громкоговоритель** преобразует электрические колебания звуковой частоты в механические колебания мембраны, производящей сгущения и разрежения воздуха, воспринимаемые слушателем как звук.

### Электрический резонанс

Как уже говорилось выше, каждая радиостанция излучает электромагнитные волны на своей частоте  $\omega$ . В антенне радиоприёмника и в связанном с ней приёмном колебательном контуре возникают

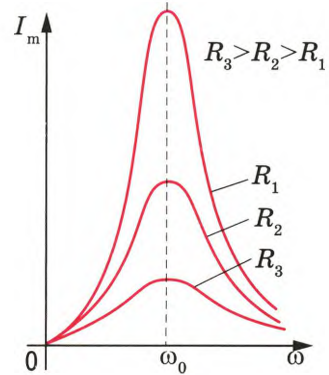




электромагнитные колебания той же частоты. Радиостанций множество, поэтому в контуре колебания, принесённые электромагнитными волнами одновременно от разных радиостанций, накладываются друг на друга.

Будем изменять собственную частоту колебательного контура радиоприёмника — обычно это делается путём изменения ёмкости конденсатора. Как только собственная частота  $\omega_0$  окажется равной частоте интересующей нас радиостанции, амплитуда колебаний напряжения и силы тока в приёмном контуре вследствие электрического резонанса резко возрастёт (рис. 73).

**Резонанс в колебательном контуре — это явление резкого возрастания амплитуды колебаний силы тока в контуре при совпадении частоты принятых колебаний с частотой собственных колебаний в нём.**



**Рис. 73.** Электрический резонанс

Если активное сопротивление контура мало, то собственная частота колебаний в контуре определяется формулой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Чем меньше активное сопротивление приёмного колебательного контура, тем острее резонанс (рис. 73). На явлении резонанса основана вся радиотехника\*. Однако резонанс в электрических цепях переменного тока может играть и вредную роль. Резкое увеличение напряжения может привести к пробое изоляции, резкое увеличение силы тока — к перегреву проводников.

\* Детекторный радиоприёмник является простейшим радиоприёмником. Однако все его элементы обязательно присутствуют в любом самом современном радиоприёмном устройстве. Детекторный радиоприёмник содержит: антенну  $A$  и заземление  $З$ , колебательный контур с конденсатором  $C_1$  переменной ёмкости, элемент с односторонней проводимостью — диод  $D$ , конденсатор постоянной ёмкости  $C_2$  и телефон  $T$  (рис. 74).



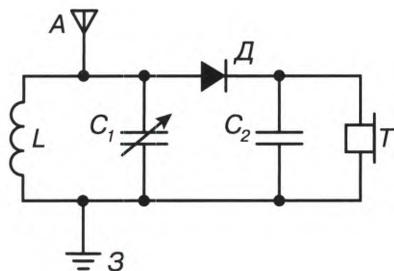


Рис. 74. Схема детекторного радиоприёмника

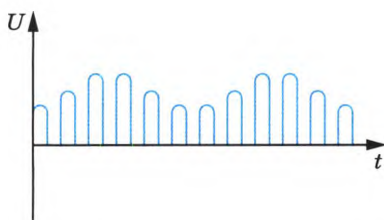


Рис. 75. Ток в цепи детектора

Определим функции, выполняемые каждым из перечисленных элементов.

**Антенна и заземление** улавливают радиоволны (модулированные электромагнитные колебания), идущие от всех радиостанций.

**Колебательный контур  $LC_1$ .** Благодаря переменной ёмкости конденсатора  $C_1$  приёмный контур можно настраивать на частоту нужной радиостанции. Для этого изменяется ёмкость конденсатора  $C_1$  до тех пор, пока собственная частота контура радиоприёмника не окажется равной частоте, на которой ведётся радиопередача. Тогда вследствие резонанса амплитуда колебаний силы тока в контуре окажется максимальной.

**Детектор** (элемент с односторонней проводимостью — полупроводниковый диод) отделяет в принятых колебаниях составляющую одного знака (рис. 75). В цепи с детектором протекает пульсирующий ток одного направления.

**Конденсатор постоянной ёмкости** и катушка телефона позволяют выделить из принятых и продетектированных колебаний колебания низкой (звуковой) частоты. Этот процесс называется **демодуляцией**. В течение первой половины периода колебаний высокой частоты ток идёт через катушку телефона, одновременно заряжается конденсатор  $C_2$ . В течение второй половины периода колебаний конденсатор разряжается через катушку, создавая в ней ток того же направления (рис. 76). Далее этот процесс повторяется многократно. В ре-

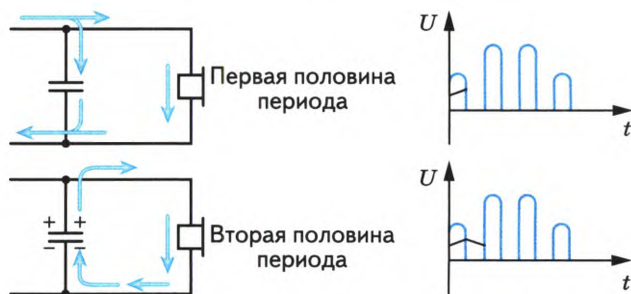


Рис. 76. Процесс демодуляции по половинам периода



зультате через катушку телефона проходит ток звуковой частоты и одного направления.

**Телефон** преобразует электрические колебания низкой частоты в механические колебания мембраны, которые наше ухо воспринимает как звук.

Детекторный радиоприёмник не требует никакого источника тока (в этом его достоинство). Он работает только за счёт энергии, которую переносит электромагнитная волна, поэтому громкость приёма очень мала. Слушать его может только один человек, и в этом недостаток детекторного радиоприёмника.

### Радиоприёмник Попова

Первый радиоприёмник (грозоотметчик) был изготовлен в 1895 г. русским учёным **А.С. Поповым**.

Кроме антенны и заземления грозоотметчик Попова содержал **когерер** — элемент, проводимость которого резко увеличивается при улавливании электромагнитных волн, источником которых были грозовые разряды.

Использованный Поповым когерер представлял собой стеклянную ампулу с металлическим порошком. При улавливании антенной электромагнитной волны крупинки порошка спекаются, поэтому сопротивление когерера резко уменьшается. При этом сила тока, проходящего через звонок (рис. 77), увеличивается — звонок звенит.

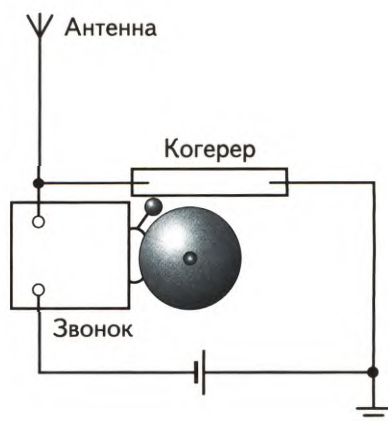
Молоточек звонка ударяет не только по звонковой чашке, но и по когереру, встряхивая металлический порошок. Сопротивление когерера снова увеличивается, через звонок проходит очень слабый ток. Звонок перестаёт звенеть, а грозоотметчик готов к улавливанию новой электромагнитной волны.

### Принципы телевидения

Радиоволны позволяют передать не только речь и музыку, но и изображения предметов. Основной частью модулятора телепередачи-



**А.С. Попов**  
(1859—1905)



**Рис. 77.** Грозоотметчик Попова





ка является передающая трубка — **видикон**. В видиконе создаётся электронный пучок, который пробегает вдоль полупроводникового экрана 625 строк за  $\frac{1}{25}$  секунды. При фокусировке на экран изображения предмета различные участки экрана оказываются освещёнными по-разному и вследствие этого имеют различное сопротивление. Соответственно изменяется напряжение на выходе видикона. Высокочастотные колебания, генерируемые телевизионным передатчиком, модулируются сигналами на выходе видикона и подаются на антенну передатчика.

Основной частью большинства телевизоров является **кинескоп**. В нём электронный пучок пробегает экран синхронно с электронным пучком в видиконе. Экран покрыт кристаллами, которые светятся под ударами электронов. Таким образом, изображение на экране кинескопа повторяет изображение на экране передающей трубки. Кадры сменяют друг друга с частотой 25 кадров в секунду, их последовательность воспринимается глазом человека как непрерывное движение.

Электронно-лучевые трубки обеспечивают чёткое и естественное изображение, но имеют некоторые недостатки, например громоздкость. Телевизоры нового поколения, разработанные на основе плазменной технологии, имеют широкий экран, при этом толщина экрана составляет всего около 15 см. Экран содержит сотни тысяч очень маленьких ячеек, которые заключены между двумя стеклянными пластинами. Ячейки заполнены инертным газом — ксеноном или неоном. При пропускании через ячейку тока газ ионизируется, переходя в плазменное состояние. При взаимодействии заряженных частиц в плазме возникает ультрафиолетовое излучение, возбуждающее атомы фосфора. Атомы фосфора излучают фотоны видимого света.

В последние годы появились жидкокристаллические телевизоры. Свет от специальной лампы проходит через жидкокристаллическую матрицу, формирующую изображение. Под действием электрических сигналов с высокой частотой изменяется степень прозрачности для каждого жидкого кристалла — **пикселя**. Одно из достоинств жидкокристаллического телевизора — большой срок службы (до 30 лет).

Телевизионные передачи ведутся в диапазоне от 50 до 850 МГц.

В этом диапазоне электромагнитные волны распространяются только в пределах прямой видимости. Передача телевизионных сигналов в любую точку нашей страны обеспечивается с помощью ретрансляционных спутников Земли в системе «Орбита».





1. Почему свободные колебания в открытом колебательном контуре затухают быстрее, чем в закрытом?
2. Как можно получить незатухающие электромагнитные колебания в открытом колебательном контуре?
3. Какие колебания называют амплитудно-модулированными?
4. Начертите схему «Принципы радиосвязи». Назовите основные элементы радиопередатчика и радиоприёмника. Каково их назначение?
5. Из каких элементов состоит детекторный радиоприёмник? Какие функции выполняет каждый из этих элементов?
6. В чём достоинства и недостатки детекторного радиоприёмника?
7. Какую роль в радиоприёмнике Попова играет когерер? электрический звонок?
8. Используя Интернет и другие источники информации, подготовьте сообщение по одной из тем: «Кто первым изобрёл радио: А.С. Попов или Маркони?», «Как происходит ретрансляция радиосигналов?», «Как работает сотовая связь?», «Как осуществляется связь с космонавтами на космической станции?», «Когда появился первый телевизор?».
9. Заполните таблицу 3, перечертив её в тетрадь. Необходимую информацию найдите в Интернете или других источниках.

Таблица 3

Название диапазона радиоволн	Длина волны	Свойства	Применение
Длинные			
Средние			
Короткие			
Ультракороткие, УКВ			
Сверхвысокочастотные, СВЧ			

- 10 (I). Колебательный контур излучает электромагнитные волны длиной 150 м. Какая ёмкость включена в контур, если его индуктивность равна 0,25 мГн? (25,4 пФ)





- 11 (II). Контур радиоприёмника судовой радиостанции настроен на частоту 9 МГц. Как нужно изменить ёмкость переменного конденсатора колебательного контура приёмника, чтобы он был настроен на длину волны 50 м? **(увеличить в 2,25 раза)**
- 12 (II). Какова длина волны электромагнитного излучения колебательного контура, если ёмкость конденсатора 2 пФ, а при скорости изменения силы тока в катушке индуктивности 4 А/с возникает ЭДС самоиндукции 0,04 В? **(266 м)**
- 13 (III). Определите резонансную частоту контура, если максимальный заряд конденсатора равен 1 мкКл, а максимальный ток в контуре равен 10 А. **(10<sup>7</sup> Гц)**

## Лабораторная работа 2

### Сборка детекторного радиоприёмника из отдельных узлов

**Цель работы:** собрать из отдельных узлов детекторный радиоприёмник и проверить его работу.

**Приборы и материалы:** конденсатор переменной ёмкости; катушка индуктивности; полупроводниковый диод; конденсатор постоянной ёмкости; соединительные провода; антенна (одна на класс); заземление (одно на класс); усилитель низкой частоты (УНЧ) с громкоговорителем (один на класс).

#### Порядок выполнения работы

1. Перечертите в тетрадь принципиальную схему детекторного радиоприёмника (см. рис. 74). Соберите схему.

2. Подойдите к столу учителя и подключите антенну, заземление, головные телефоны.

3. Изменяя ёмкость конденсатора переменной ёмкости, настройте собранный радиоприёмник на частоту какой-либо радиостанции.

4. Отключите головные телефоны и вместо них подключите свой радиоприёмник к входным клеммам УНЧ.

5. Напишите отчёт о проделанной работе.



## Структура и содержание главы «Электромагнитные колебания и волны»







## Задания для повторения главы II

### Часть 1

1. Электромагнитная волна является
  - 1) продольной
  - 2) поперечной
  - 3) как продольной, так и поперечной
  - 4) к электромагнитным волнам эта классификация неприменима
2. Излучение электромагнитных волн не происходит в следующем случае
  - 1) по прямому проводу течёт переменный ток
  - 2) по прямому проводу течёт постоянный ток
  - 3) в вакууме электроны движутся с постоянной скоростью по окружности
  - 4) в вакууме электроны движутся прямолинейно ускоренно
3. В приёмном колебательном контуре радиоприёмника возникают электромагнитные колебания
  - 1) собственные
  - 2) автоколебания
  - 3) вынужденные
  - 4) либо автоколебания, либо собственные
4. Какое утверждение справедливо для электромагнитной волны?
  - 1) Электрическое  $\vec{E}$  и магнитное  $\vec{B}$  поля изменяются в одинаковой фазе.
  - 2) Колебания вектора  $\vec{E}$  электрического поля отстают по фазе от колебаний вектора  $\vec{B}$  магнитного поля.
  - 3) Колебания вектора  $\vec{B}$  магнитного поля отстают по фазе от колебаний вектора  $\vec{E}$  электрического поля.
  - 4) Фазовый сдвиг между колебаниями векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  изменяется хаотическим образом.
5. Радиопередатчик излучает электромагнитные колебания
  - 1) высокочастотные
  - 2) низкочастотные
  - 3) модулированные
  - 4) попеременно высокочастотные, низкочастотные, модулированные

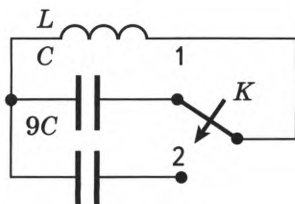


Рис. 78. Схема цепи к заданию 6

6. Как изменится период собственных колебаний контура (рис. 78), если ключ  $K$  переключить из положения 1 в положение 2?
  - 1) увеличится в 3 раза
  - 2) уменьшится в 3 раза



- 3) увеличится в 9 раз  
4) уменьшится в 9 раз

7. Колебательный контур состоит из конденсатора  $C$  и катушки  $L$ . Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в этом контуре, если ёмкость конденсатора, и индуктивность катушки увеличить в 2 раза?

- 1) не изменится                      3) уменьшится в 2 раза  
2) увеличится в 2 раза            4) увеличится в 4 раза

8. Как изменится период свободных колебаний в контуре, если расстояние между пластинами конденсатора увеличить в 4 раза?

- 1) уменьшится в 2 раза            3) увеличится в 2 раза  
2) уменьшится в 4 раза            4) увеличится в 4 раза

9. На рисунке 79 в декартовой системе координат представлены вектор напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  (стрелка 2) в электромагнитной волне и вектор  $\vec{c}$  скорости её распространения (стрелка 4). Направление вектора индукции  $\vec{B}$  в волне совпадает со стрелкой

- 1) 1      2) 2      3) 3      4) 4

10. В идеальном колебательном контуре напряжение между обкладками конденсатора меняется по закону  $u = U_m \cos \omega t$ , где  $U_m = 5$  В,  $\omega = 10^6$  с $^{-1}$ . Амплитуда колебаний ЭДС самоиндукции в катушке индуктивности равна

- 1) 0      2)  $5 \cdot 10^{-6}$  В      3)  $5 \cdot 10^{-3}$  В      4) 5 В

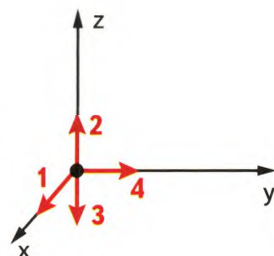


Рис. 79. Схематичное изображение к заданию 9

### Часть 2\*

1. В идеальном колебательном контуре амплитуда колебаний силы тока в катушке индуктивности 6 мА, а амплитуда колебаний заряда конденсатора 4 нКл. В момент времени  $t$  сила тока в катушке равна 3 мА. Найдите заряд конденсатора в этот момент. **(3,46 нКл)**

2. В идеальном колебательном контуре амплитуда колебаний силы тока в катушке индуктивности равна 5 мА, а амплитуда напряжения на конденсаторе равна 2 В. В некоторый момент времени сила тока в катушке равна 3 мА. Найдите напряжение на конденсаторе в этот момент. **(1,6 В)**

3. В некоторый момент времени заряд конденсатора в идеальном колебательном контуре равен 4 нКл, а сила тока в катушке равна 3 мА. Период колебаний  $6,3 \cdot 10^{-6}$  с. Найдите амплитуду силы тока. **(5 мА)**



## Глава III. Волновые свойства света

Электромагнитные волны, лежащие в диапазоне приблизительно от 380 до 800 нм, воспринимаются нами как свет. Электромагнитная теория света берёт начало в работах Дж. Максвелла, который показал возможность существования электромагнитных волн и определил, что скорость электромагнитных волн в вакууме должна быть равна скорости света. Генрих Герц подтвердил выводы Максвелла экспериментально. Раздел физики, изучающий световые явления, называется оптикой. Геометрическая (лучевая) оптика рассмотрена нами в 8 классе. Здесь мы повторим основные выводы геометрической оптики с помощью волновых представлений.

### § 12. Скорость света и её опытное определение



1. Кем и когда была впервые измерена скорость света?

1. Датским физиком **О. Рёмером** в 1676 г.

2. Чему равна скорость света?

2.  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.



Напомним вкратце, как была измерена скорость света. Датский астроном **О. Рёмер** изучал закономерности затмений спутников **Юпитера**. Для одного из спутников Юпитера (**Ио**) Рёмер составил таблицу предстоящих затмений на несколько лет вперёд. Однако оказалось, что затмения стали запаздывать по сравнению с расчётными, и через полгода запаздывание составило примерно 1000 с.

Потом запаздывания стали уменьшаться и ещё через полгода исчезли совсем (рис. 80).

Так как через полгода Земля оказалась на противоположной от Солнца стороне орбиты, Рёмер абсолютно верно предположил, что 1000 с — это время, в течение которого свет проходит расстояние, равное диаметру земной орбиты, то есть примерно 300 млн км. Тогда скорость света можно рассчитать следующим образом:



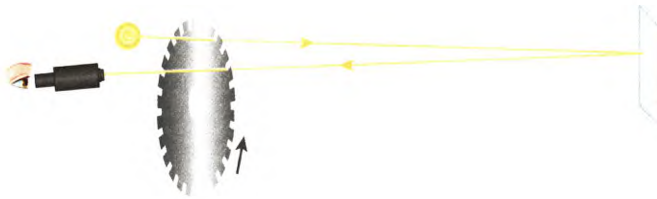


**Рис. 80.** Астрономический метод определения скорости света

$$c = \frac{300\,000\,000 \text{ км}}{1000 \text{ с}} = \frac{300\,000 \text{ км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

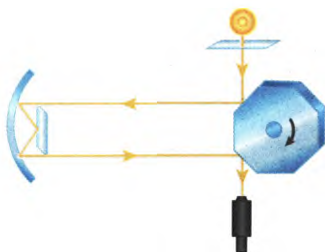
Правда, у Рёмера из-за малой точности измерений скорость света получилась несколько меньше — около 215 000 км/с.

Лабораторным методом скорость света измерил французский физик **И. Физо** в 1849 г. Он направлял яркий пучок света через прорезь на краю зубчатого колеса на плоское зеркало, которое находилось на расстоянии около 10 км от его установки. Отразившись от зеркала, световой пучок проходил через соседнюю прорезь в зубчатом колесе и через зрительную трубу попадал в глаз (*рис. 81*).



**Рис. 81.** Схема опыта Физо

Когда зубчатое колесо было неподвижно или вращалось с очень малой угловой скоростью, отражённый от зеркала луч был виден. При увеличении угловой скорости колеса луч исчезал, видимо, его путь к нашему глазу преграждал зубец. Физо подобрал такую скорость вращения зубчатого колеса, при которой свет снова попадал в глаз наблюдателя, но уже проходил через соседнюю прорезь. Если в зубчатом колесе было 24 зубца, то это означает, что время поворота колеса на  $\frac{1}{24}$  оборота равно времени прохождения светом расстояния от колеса до зеркала и обратно — от зеркала до колеса.



**Рис. 82.** Схема опыта Майкельсона

В опыте Физо расстояние от колеса до зеркала равнялось 8,6 км, и для скорости света было найдено значение 313 000 км/с.

В 1900 г. скорость света была измерена американским физиком **А. Майкельсоном**. Схема опыта Майкельсона показана на рисунке 82. Вместо зубчатого колеса он использовал восьмиугольную зеркальную призму. Расстояние от призмы до вогнутого зеркала составило около 35,5 км. Свет, дважды отражённый от граней призмы, виден, во-первых, при неподвижной призме и, во-вторых, при вращении призмы с угловой

скоростью, при которой время прохождения светом расстояния до зеркала и обратно равно времени, за которое призма успевает повернуться на  $\frac{1}{8}$  оборота.

Скорость света в прозрачной среде (в воде, в стекле и т.д.) оказалась меньше скорости света в вакууме. Так, в воде она составляет только  $\frac{3}{4}$  скорости света в вакууме. В стекле, в зависимости от состава стекла, скорость света в 1,5—1,7 раза меньше, чем в вакууме.

Из двух прозрачных сред та среда, в которой скорость света меньше, считается **оптически более плотной**. Так, стекло — среда оптически более плотная, чем вода.



1. Опишите астрономический метод определения скорости света.
2. В чём заключается метод определения скорости света Физо?
3. Чем отличается метод определения скорости света Майкельсона от метода Физо?
4. Расположите среды в порядке возрастания их оптической плотности: стекло, воздух, вода.
5. Как изменится скорость света при переходе его из стекла в воздух? Из воздуха в воду?



- 6 (I). До ближайшей к нам звезды **Проксима** из созвездия **Центавра** 4,1 световых года. Выразите это расстояние в метрах.

( $3,9 \cdot 10^{16}$  м)

- 7 (III). На рисунке 82 показана схема опыта Майкельсона по определению скорости света. С какой минимальной частотой должна вращаться восьмиугольная зеркальная призма, чтобы источник был виден в зрительную трубу, если расстояние от зеркальной призмы до вогнутого зеркала равно приблизительно 35,5 км?

(528 об/с)



## § 13. Законы отражения и преломления света. Полное внутреннее отражение

1. Сформулируйте закон отражения света.

2. Что такое преломление света?

3. Сформулируйте закон преломления света.

4. Какая из двух прозрачных сред называется оптически более плотной?

1. Лучи падающий, отражённый и перпендикуляр, проведённый к отражающей поверхности в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения равен углу падения.  $\beta = \alpha$ .

2. Явление изменения направления распространения светового луча при его переходе из одной прозрачной среды в другую.

3. Лучи падающий, преломлённый и перпендикуляр, проведённый к отражающей поверхности в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}.$$

4. Среда, в которой скорость света меньше.



### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. Ночью на гладкой поверхности реки или озера видна лунная дорожка (рис. 83). Луна отражает солнечный свет, зеркальная гладь воды отражает лунный свет, то есть вторично отражает солнечный свет.

2. Трубочка, погружённая в стакан с водой, кажется надломленной (рис. 84).





Рис. 83. Лунная ночь. Художник С.В. Бровкин



Рис. 84.  
Преломление света

3. ...В томительной пустыне / Мы видим образы далёких чуждых стран, / Но то лишь призраки, и снова небо сине, / И вдаль бредёт усталый караван... (Б. Тимофеев).

**Общее в рассмотренных примерах:** все рассмотренные явления объясняются законами отражения и преломления света; пример 3 (миражи) можно объяснить полным внутренним отражением света.



Законы отражения и преломления света мы рассматривали в 8 классе. При этом мы ссылались на результаты экспериментов. Сейчас мы получим эти законы, опираясь на волновые свойства света и на закономерности распространения волн.

#### Принцип Гюйгенса

Современник Ньютона **Христиан Гюйгенс**, исследуя волновое движение, сформулировал общий для всех волн принцип:

**Каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн.**

Если мы знаем положение волновой поверхности (фронт волны) в некоторый момент времени  $t$ , то легко можем определить её положение в момент времени  $t + \Delta t$ . Для этого каждую точку волновой поверхности в момент времени  $t$  надо принять за источник вторичных волн (рис. 85). Тогда поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет волновую поверхность в момент времени  $t + \Delta t$ .



Луч, показывающий направление распространения волны, всегда перпендикулярен к волновой поверхности. Если волновая поверхность представляет собой плоскость, волна называется плоской.

## Закон отражения света

Рассмотрим отражение плоской волны от отражающей поверхности  $MN$  (рис. 86). Связанные с волновой поверхностью лучи 1 и 2 составляют с нормалью к отражающей поверхности угол  $\alpha$ . Этот угол называют углом падения. Применяя принцип Гюйгенса, построим волновую поверхность отражённой волны. В точку  $B$  свет приходит позднее, чем в точку  $O$ , на время  $t = \frac{AB}{c}$ , где  $c$  — скорость света в воздухе. За это время из точки  $O$  как из вторичного источника света в воздухе успевает распространиться полусферическая волна радиусом  $r = ct = AB$ . От всех остальных распространяются вторичные полусферы, которых убывают в направлении от точки  $O$ . Огибающая всех волновых полусфер даст фронт отражённой волны.

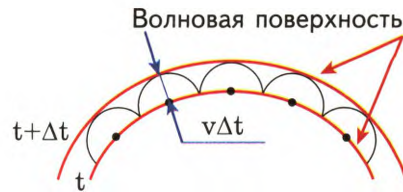
На рисунке 86 видно, что  $\triangle OAB = \triangle ODB$  (как прямоугольные треугольники, имеющие общую гипотенузу и по одному одинаковому катету  $OD = AB$ ). Поэтому значение  $\angle AOB$  равно значению  $\angle DBO$ , то есть  $\beta = \alpha$ , где  $\beta$  — угол отражения. Сформулируем **закон отражения света**.

**Лучи падающий и отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведённым к отражающей поверхности в точке падения луча.**

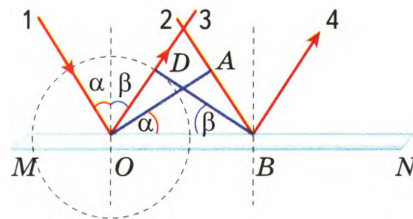
**Угол отражения равен углу падения:  $\beta = \alpha$ .**

## Закон преломления света

Пусть теперь плоский фронт световой волны падает на границу раздела двух прозрачных сред (рис. 87) с разной оптической плотностью (скорость распространения света в первой среде пусть равна  $c$ , во второй среде —  $v$ , причём  $v < c$ ). На границе раздела сред свет

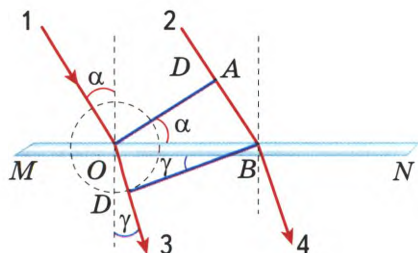


**Рис. 85.** Принцип Гюйгенса



**Рис. 86.** Вывод закона отражения света





**Рис. 87.** Вывод закона преломления света

частично отражается (по закону отражения), частично проходит во вторую среду (лучи 3 и 4).

Применяя принцип Гюйгенса, построим фронт преломлённой волны.

В точку  $B$  свет приходит позднее, чем в точку  $O$ . За время  $t = \frac{AB}{c}$  во второй среде распространится полусферическая волна радиусом, равным  $OD = vt = \frac{vAB}{c}$ . Огибающая всех волновых полусфер второй среды даст фронт преломлённой волны  $BD$ .

На рисунке 87 видно, что  $\frac{AB}{OD} = \frac{c}{v}$ ;  $AB = OB \sin \alpha$ ;  $OD = OB \sin \gamma$ .

Тогда получим:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v}$ , где  $\gamma$  — угол преломления.

Величина, равная отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде и соответственно отношению показателя преломления второй среды относительно первой, называется **относительным показателем преломления**:  $n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$ , следовательно,  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$ .

Сформулируем закон преломления света:

**Лучи падающий и преломлённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведённым в точке падения луча.**

**Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред и называется показателем преломления второй среды относительно первой:**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$$

**Относительный показатель преломления** показывает, во сколько раз скорость света в первой среде больше, чем во второй:  $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$ .

**Абсолютный показатель преломления** показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше, чем в вакууме:  $n = \frac{c}{v}$ .

Для любой среды  $n > 1$ .





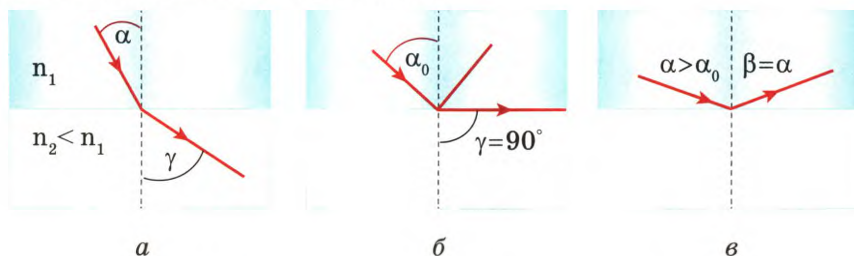
Оптически более плотная среда имеет больший абсолютный показатель преломления. Значения показателей преломления для некоторых веществ (для жёлтого света с длиной волны  $\lambda = 589$  нм) приведены в таблице 4.

Таблица 4

Вещество	Показатель преломления	Вещество	Показатель преломления
Воздух	1,0003	Стекло (крон)	1,515
Вода	1,333	Стекло (флинт)	1,752
Спирт (этиловый)	1,362	Алмаз	2,420

### Полное внутреннее отражение

Если свет переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, например из стекла в воздух, то в соответствии с законом преломления света угол преломления  $\gamma$  будет больше угла падения  $\alpha$  (рис. 88, а).



**Рис. 88.** Ход луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду

Будем увеличивать угол падения, угол преломления тоже будет увеличиваться и при некотором угле падения  $\alpha_0$  окажется равным  $90^\circ$ , то есть преломлённый луч будет скользить вдоль границы раздела сред, не выходя за пределы оптически более плотной среды (рис. 88, б). Угол  $\alpha_0$  называется **предельным углом полного отражения**. При  $\alpha > \alpha_0$  свет полностью отражается в первую (оптически более плотную) среду. Это явление носит название **полного внутреннего отражения света** (рис. 88, в).

Из закона преломления имеем:  $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = n_{21}$ . Если вторая среда — вакуум (или воздух), то  $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$ , где  $n$  — абсолютный по-



казатель преломления среды. Для стекла (флинт), например,

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{1,752} = 0,57; \quad \alpha_0 = 39^\circ.$$

Следовательно, если угол падения светового луча будет больше  $39^\circ$ , то свет полностью отразится в стекло.

На явлении полного внутреннего отражения основана **волоконная оптика** — система передачи оптических изображений с помощью стекловолокон (световодов). Луч света, падающий на торец стеклянной нити, проходит через всю нить, независимо от того, как нить изогнута. Из множества таких нитей составляется жгут, который представляет собой **световод**. Если перед торцом световода поставить освещённый предмет, то на другом конце световода появится его точное изображение. С помощью световода можно рассматривать объекты, недоступные непосредственному наблюдению, например внутренность желудка человека. Световоды позволяют также с наименьшими помехами передавать информацию на большие расстояния.

Явлением полного внутреннего отражения света на границе с оптически менее плотными слоями воздуха объясняется такой необычный факт, как возникновение миражей (*рис. 89*).

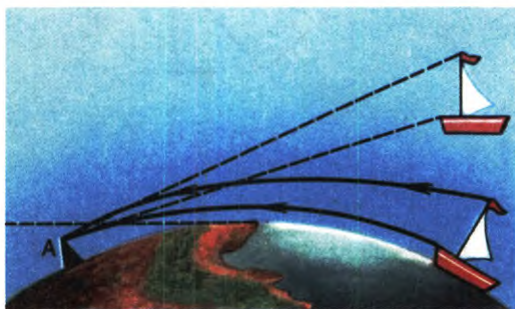


Рис. 89. Объяснение появления миража



1. В чём заключается принцип Гюйгенса?
2. Сформулируйте закон отражения света и докажите его с помощью принципа Гюйгенса.
3. Сформулируйте закон преломления света и докажите его с помощью принципа Гюйгенса.
4. Абсолютный показатель преломления алмаза равен 2,42. Что это значит?
5. Какая среда является оптически более плотной: алмаз или стекло?



6. При каком условии свет, переходя из одной прозрачной среды в другую прозрачную среду, не преломляется?
7. Что иллюстрирует рисунок 83?
8. Какие два условия необходимы для наблюдения полного внутреннего отражения света?
9. Используя построения, докажите, что световой луч, попадая из воздуха на трёхгранную стеклянную призму, отклоняется к основанию призмы.
10. Как изменится ход луча при его прохождении через плоскую стеклянную пластинку? Сделайте рисунок.
11. Используя Интернет, подготовьте сообщение по одной из тем: «Волоконная оптика и её применение», «Миражи», «Влияние атмосферы Земли на астрономические наблюдения».
- 12 (I). Плоское зеркало повернули на угол  $16^\circ$ . На какой угол при этом повернулся отражённый луч? **( $32^\circ$ )**
- 13 (I). На какой высоте висит уличный фонарь, если тень от вертикально поставленной палки высотой 0,9 м имеет длину 1,2 м, а при перемещении палки на 1 м от фонаря вдоль направления тени длина тени стала равна 1,5 м? **(3,9 м)**
- 14 (I). Найдите скорость распространения света в алмазе. **( $1,24 \cdot 10^8$  м/с)**
- 15 (II). Луч света падает на границу раздела двух сред под углом  $30^\circ$ . Показатель преломления первой среды равен 2,4. Определите показатель преломления второй среды, если известно, что отражённый и преломлённый лучи перпендикулярны друг другу. **(1,4)**
- 16 (II). Луч света падает из воздуха на поверхность жидкости под углом  $40^\circ$  и преломляется под углом  $24^\circ$ . При каком угле падения луча угол преломления будет равен  $20^\circ$ ? **( $33^\circ$ )**
- 17 (II). Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол полного внутреннего отражения  $42^\circ$ . Определите скорость распространения света в скипидаре. **( $2 \cdot 10^8$  м/с)**



## § 14. Линзы

1. Что такое линза?

1. Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Одна из поверхностей может также быть плоской (рис. 90).







2. Чем по внешнему виду (по форме) отличаются собирающая и рассеивающая линзы?

3. Каково основное свойство собирающей линзы?

4. Каково основное свойство рассеивающей линзы?

5. Сколько фокусов имеет линза?

2. У собирающей линзы середина толще, чем края. У рассеивающей линзы середина тоньше, чем края (рис. 91, 92).

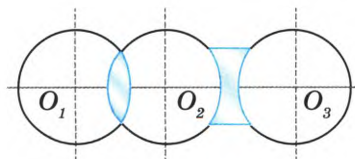
3. Она собирает все лучи, идущие параллельным пучком, в одной точке — фокусе линзы (рис. 93).

4. Лучи, идущие до попадания на линзу параллельным пучком, в результате преломления в линзе расходятся так, как будто вышли из одной точки — фокуса линзы (рис. 94).

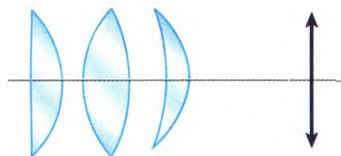
5. Два главных фокуса линзы, они расположены симметрично по обе стороны от линзы, и бесчисленное множество побочных фокусов, расположенных в фокальных плоскостях, перпендикулярных главной оптической оси и проходящих через два главных фокуса.



С линзами мы достаточно подробно познакомились в 8 классе. Вспомним изученный ранее материал и рассмотрим применение линз в двухлинзовых системах — в **микроскопе** и **телескопе**.



**Рис. 90.** Поперечный разрез линз



**Рис. 91.** Собирающие линзы и их схематичное изображение

### Основные линии и точки линзы

Мы ограничимся рассмотрением тонких линз, толщина которых много меньше радиусов кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу.

**Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называется главной оптической осью линзы.**

Любая прямая, проходящая через центр линзы под углом к главной оптической оси, называется побочной оптической осью.



**Точка, в которой собираются все лучи после преломления в линзе, если до попадания на линзу они шли параллельно друг другу, называется фокусом линзы.**

Фокус, лежащий на главной оптической оси, называется **главным фокусом** линзы. Каждая линза имеет два главных фокуса, лежащих на главной оптической оси симметрично относительно линзы, и бесконечное множество **побочных** фокусов. Все фокусы лежат на фокальных плоскостях, перпендикулярных главной оптической оси и проходящих через главные фокусы.

На рисунке 95 цифрами обозначены: 1 — световой луч; 2 — собирающая линза; 3 — фокальные плоскости; 4 — главная оптическая ось; 5 — побочная оптическая ось.

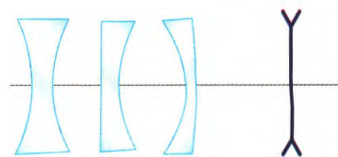
### Построение изображений в линзах

Чтобы построить изображение предмета, даваемое линзой, надо научиться строить изображение одной точки, например точки  $A$  — крайней верхней точки стрелки  $AB$  (рис. 96).

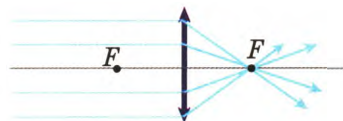
Из каждой точки предмета выходит бесконечное множество лучей по всем направлениям. Те из них, которые попали на линзу, испытают преломление на поверхностях линзы и, пройдя через линзу, пересекутся в одной точке  $A_1$ , которая и будет изображением точки  $A$ . Изображения всех остальных точек предмета окажутся между изображениями крайних точек (точки  $A$  и точки  $B$ ).

Чтобы построить изображение точки в линзе, воспользуемся лучами, ход которых нам известен заранее (рис. 97). Существуют три подобных луча:

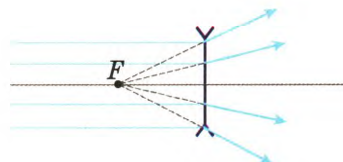
1. **Луч, идущий параллельно главной оптической оси.** После преломления в линзе он пойдёт через главный фокус (луч 1 на рисунке 97).



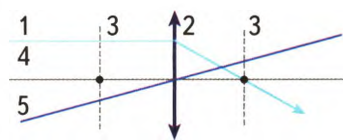
**Рис. 92.** Рассеивающие линзы и их схематичное изображение



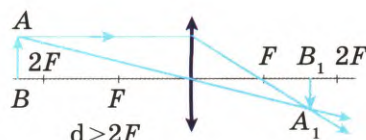
**Рис. 93.** Основное свойство собирающей линзы



**Рис. 94.** Основное свойство рассеивающей линзы



**Рис. 95.** Основные линии и точки линзы



**Рис. 96.** Построение изображений, случай 1



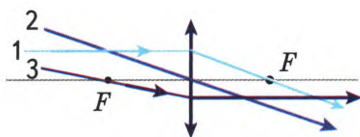


Рис. 97. Лучи с известным ходом

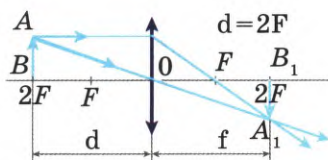


Рис. 98. Построение изображений, случай 2

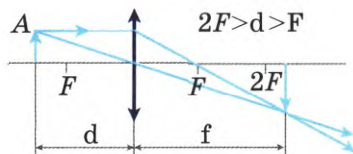


Рис. 99. Построение изображений, случай 3

2. Луч, идущий через центр линзы (луч 2 на рисунке 97). Проходя через тонкую линзу, этот луч не испытывает преломления.

3. Луч, идущий через главный фокус. Преломившись в линзе, этот луч пойдёт параллельно главной оптической оси (луч 3 на рисунке 97).

Чтобы найти точку, в которой получится изображение, достаточно взять два луча из указанных выше. Рассмотрим четыре случая построения изображения предмета, даваемого собирающей линзой, в зависимости от взаимного положения предмета и линзы, и один случай построения изображения, даваемого рассеивающей линзой.

**Случай 1.** Предмет находится на расстоянии  $d$  от линзы, превышающем двойное фокусное расстояние (см. рис. 96). Изображение получается **действительное, перевёрнутое и уменьшенное**. Расположено оно на расстоянии  $f$  от линзы между  $F$  и  $2F$ . Чтобы убедиться в том, что изображение действительное, надо в качестве предмета взять зажжённую лампочку или свечу. Тогда на экране, поставленном на расстоянии  $f$  от линзы, можно увидеть уменьшенное перевёрнутое изображение пламени свечи или лампочки. Такое изображение даёт, например, оптическая система фотоаппарата.

**Случай 2.** Предмет находится на расстоянии  $2F$  от линзы (рис. 98). Изображение получается **действительное, перевёрнутое и равное** по высоте предмету (в натуральную величину). Это легко доказать, используя равенство треугольников  $ABO$  и  $A_1B_1O$ .

**Случай 3.** Предмет расположен между фокусом и двойным фокусным расстоянием (рис. 99). Изображение отодвинулось за двойное фокусное расстояние и стало **увеличенным**. По-прежнему изображение перевёрнутое и действительное. Такое изображение даёт, например, кинопроектор при демонстрации фильма. На экране зрители видят увеличенное изображение, зафиксированное на плёнке.

**Случай 4.** Предмет расположен между фокусом и линзой (рис. 100). Изображение получается **прямое, увеличенное и мнимое**. Мнимое, потому что лучи, вышедшие из точки  $A$ , расходятся и





нигде не пересекаются. Если на расстоянии  $f$  от линзы поставить экран, то на экране изображения не будет. А если лучи, вышедшие из точки  $A$ , попадут в глаз, то создастся ощущение, будто они вышли из точки  $A_1$ , в которой пересекаются продолжения лучей, преломившихся в линзе. Полученное изображение теперь лежит с той же стороны от линзы, что и сам предмет. В этом случае линза используется как лупа, удобная для рассмотрения мелких предметов.

**Случай 5.** Изображение в рассеивающей линзе (рис. 101). Первый луч, преломившись в линзе, идёт так, как будто вышел из мнимого фокуса, второй луч идёт через центр линзы, не меняя направления. Лучи расходятся, следовательно, мы нигде не получим действительного изображения. Изображение в этом случае **мнимое, прямое и уменьшенное**. Характер изображения не изменяется, если предмет удалять от линзы или приближать к ней — во всех случаях рассеивающая линза даёт только уменьшенное изображение, только прямое и только мнимое. Изображение находится с той же стороны от линзы, что и предмет.

### Формула тонкой линзы

Формула линзы связывает расстояние от предмета до линзы  $d$  с расстоянием от линзы до изображения  $f$  и фокусным расстоянием  $F$ .

Для вывода формулы линзы воспользуемся рисунком 102. Обозначим высоту предмета  $h$ , а высоту изображения —  $H$ . Из подобия треугольников, окрашенных в голубой цвет:

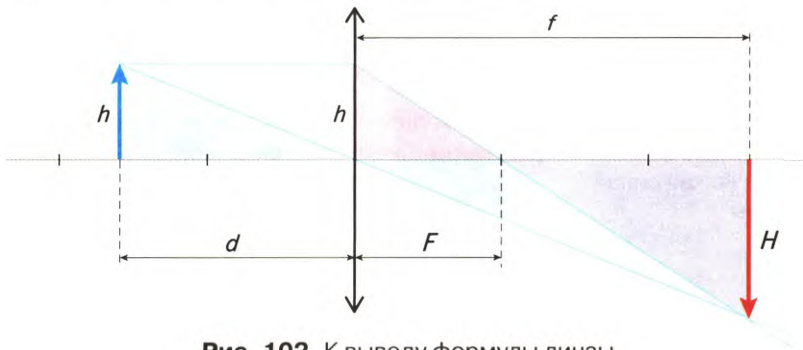


Рис. 102. К выводу формулы линзы

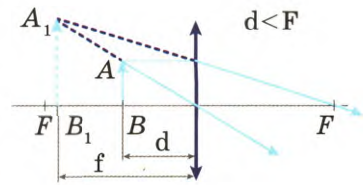


Рис. 100. Построение изображений, случай 4

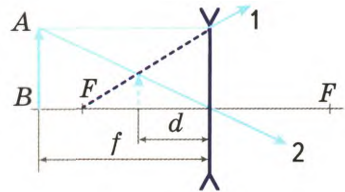


Рис. 101. Построение изображений, случай 5



$$\frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Из подобия треугольников, окрашенных в розовый цвет:

$$\frac{H}{h} = \frac{f - F}{F}.$$

Приравниваем правые части записанных пропорций, получаем:

$$\frac{f}{d} = \frac{f - F}{F}; \quad Ff = df - dF.$$

Разделим все три члена последнего равенства на произведение  $dfF$ :

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}$$

Это и есть формула тонкой линзы. Если изображение мнимое, то расстояние  $f$  берётся со знаком «минус», а если линза рассеивающая (фокус мнимый), то  $F$  берётся со знаком «минус».

**Величина, равная отношению размера изображения к размеру предмета, называется увеличением линзы.**

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

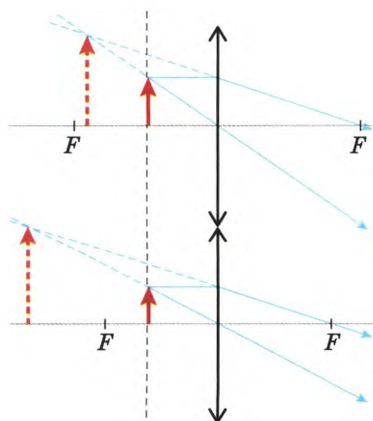
#### Оптическая сила линзы

На рисунке 103 показаны две собирающие линзы с разными фокусными расстояниями. Предметы находятся на одинаковом расстоянии от этих линз. Та линза, у которой фокусное расстояние меньше, при прочих равных условиях даёт большее увеличение. Про такую линзу говорят, что она имеет большую оптическую силу.

**Оптической силой линзы называется величина, обратная фокусному расстоянию:**

$$D = \pm \frac{1}{F}$$

Единицей оптической силы является диоптрия (дптр). 1 дптр — это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.



**Рис. 103.** Оптическая сила линзы



## Микроскоп

Для значительного увеличения малых объектов используется микроскоп. Это оптическая система, состоящая из короткофокусной собирающей линзы, называемой **объективом**, длиннофокусной линзы — **окуляра**.

Предмет помещается на расстоянии от объектива, немного большем фокусного расстояния  $F_{об}$  (рис. 104). Действительное, перевёрнутое и увеличенное изображение предмета (сплошная голубая стрелка на рисунке 104, направленная влево) рассматривается через окуляр, как через лупу. Для этого окуляр располагается на расстоянии от действительного изображения, немного меньшем его фокусного расстояния  $F_{ок}$ .

В результате получается мнимое, увеличенное и перевёрнутое (относительно предмета) изображение, которое находится от окуляра на расстоянии наилучшего зрения  $L$ . Для нормального глаза  $L = 25$  см.

Расстояние  $l$  между «внутренними» фокусами объектива и окуляра называется **длиной тубуса** микроскопа.

Если объектив даёт увеличение  $\Gamma_{об} = \frac{l}{F_{об}}$ , а окуляр  $\Gamma_{ок} = \frac{L}{F_{ок}}$ , то общее увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра:  $\Gamma = \Gamma_{об} \Gamma_{ок}$ ;  $\Gamma = \frac{lL}{F_{об} F_{ок}}$ .

Практически увеличение микроскопа не превышает 2000—3000. Это связано с ограничениями, обусловленными явлением **дифракции** света, которое будет рассмотрено через несколько параграфов.

## Телескоп

Телескоп представляет собой оптический прибор, предназначенный для рассматривания глазом удалённых объектов. Исключительное значение телескоп имеет в астрономии. Телескоп-**рефрактор**, как и микроскоп, состоит из **объектива** и **окуляра**, которые являются достаточно сложными оптическими системами (рис. 105). Мы их будем схематически представлять тонкими линзами.

Объектив и окуляр располагаются так, что задний фокус объектива (длиннофокусная линза) почти совпадает с передним фокусом окуляра (короткофокусная линза). Из окуляра выходят пучки параллельных лучей — это удобно для наблюдения нормальным глазом.

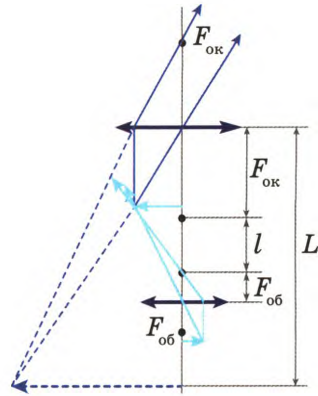
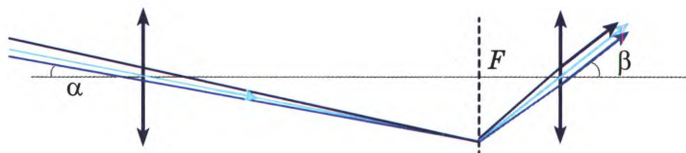


Рис. 104. Ход лучей в микроскопе



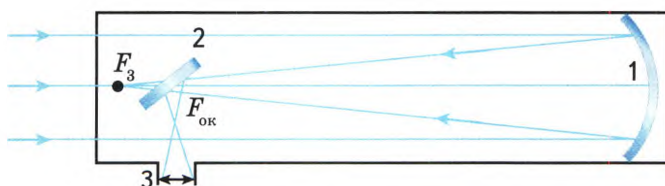
**Рис. 105.** Ход лучей в телескопе-рефракторе

Угол зрения, под которым видны планета или звезда, очень мал. Например, планету Марс мы видим невооружённым глазом в наиболее благоприятном случае под углом всего 25 секунд, при этом она представляется нам светящейся точкой. При 75-кратном увеличении телескопа Марс будет виден под углом 31 мин — под таким углом мы видим Солнце невооружённым глазом.

Увеличение, даваемое телескопом: 
$$\Gamma = \frac{tg\beta}{tg\alpha} = \frac{F_{об}}{F_{ок}}.$$

**Увеличение телескопа-рефрактора равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.**

Наряду с рефракторами большое значение имеют в астрономии отражательные телескопы-**рефлекторы** (рис. 106).

**Рис. 106.** Схема телескопа-рефлектора

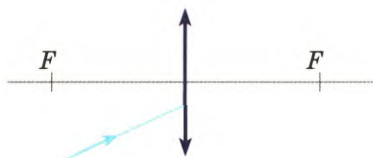
Так как свет от небесных источников идёт практически параллельным пучком, изображение, даваемое вогнутым сферическим зеркалом 1, получается в фокальной плоскости зеркала. Это **действительное и уменьшенное** изображение. Вблизи фокуса зеркала установлено плоское зеркало 2, которое поворачивает лучи в сторону окуляра 3. В окуляр изображение рассматривается как в лупу.



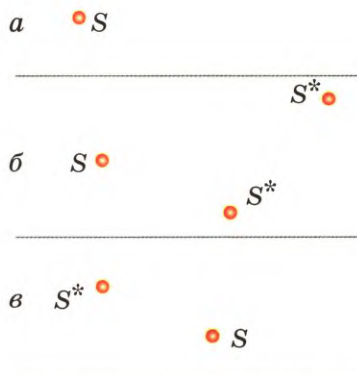
1. Какая линза называется тонкой?
2. Что такое фокус линзы? Сколько фокусов имеет линза?



3. Что иллюстрируют рисунки 101 и 102?
4. Что изображено на рисунках 103 и 104?
5. Какие три луча мы можем использовать для построения изображения предмета в линзе?
6. В каких случаях линза даёт:
  - действительное изображение;
  - мнимое увеличенное изображение;
  - мнимое уменьшенное изображение?
7. В каких случаях размер изображения равен размеру предмета?
8. Что такое оптическая сила линзы?
9. Какая линза, верхняя или нижняя, на рисунке 103 имеет большую оптическую силу? Почему?
10. Какое фокусное расстояние имеет линза с оптической силой 1 дптр?
11. Используя рисунок 102, выведите формулу тонкой линзы.
12. Опишите устройство микроскопа.
13. Как сделать микроскоп с максимально возможным увеличением?
14. Какое максимальное увеличение может давать микроскоп?
15. Чем отличается телескоп-рефлектор от телескопа-рефрактора?
16. Чему равно увеличение, даваемое телескопом?
- 17 (I). На рисунке 107 на собирающую линзу падает луч под произвольным углом. Покажите дальнейший ход этого луча.
- 18 (II). На рисунке 108 показана главная оптическая ось, светящаяся точка  $S$  и её изображение  $S^*$ . Найдите построением, где находятся линза и её главные фокусы.
- 19 (II). На каком расстоянии от линзы с фокусным расстоянием 12 см надо поставить предмет, чтобы его действительное изображение оказалось втрое больше самого предмета? (16 см)



**Рис. 107.** Схематичное изображение к заданию 17



**Рис. 108.** Схематичное изображение к заданию 18



- 20 (II). Расстояние от предмета до экрана 90 см. Где надо поставить между ними линзу с фокусным расстоянием 20 см, чтобы получить на экране отчётливое изображение предмета? (30 и 60 см от экрана)
- 21 (III). Определите оптическую силу объектива фотоаппарата, которым фотографируют местность с самолёта на высоте 5 км в масштабе 1 : 20 000. (4 дптр)
- 22 (III). С помощью тонкой линзы получается увеличенное в 2 раза действительное изображение предмета. Если предмет сместить на 1 см в сторону линзы, то изображение будет увеличенным в 3 раза. Чему равно фокусное расстояние линзы? (6 см)

## § 15. Дисперсия света



- |   |  |
|---|--|
| 1. Каков физический смысл абсолютного показателя преломления вещества?                            | 1. Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в среде. |
| 2. В какую сторону отклоняется луч при прохождении через находящуюся в воздухе стеклянную призму? | 2. Луч отклоняется к основанию призмы.   |

### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. Солнце вешнее с дождём / Строят радугу вдвоём: / Семицветный полукруг / Из семи широких дуг (С. Маршак) (рис. 109).



Рис. 109. Радуга

2. Если рассматривать через трёхгранную призму освещённые солнцем предметы, то ясно видна радужная окраска границ предметов.

3. В 1666 г. И. Ньютон проделал следующий опыт: на пути пучка солнечного света, проходящего через отверстие в ставне окна, он поставил трёхгранную призму. В результате на противоположной стене, как на экране, оказалась ярко окрашенная полоска с плавным переходом цветов от





красного к фиолетовому (рис. 110). Ньютон выдвинул следующую гипотезу: белый свет сложный, он является смесью пучков света с различной цветностью.

Окрашенную полоску, полученную Ньютоном в описанном опыте, назвали **спектром**, а явление разложения белого света на ряд цветных пучков в результате преломления в трёхгранной призме — **дисперсией света**. В спектре из-за сходства его цветов с цветами радуги (радуга издавна считалась семицветной) Ньютон выделил семь основных цветов: **красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый**.

Если выдвинутая гипотеза верна, то, собрав все выделенные цветные пучки с помощью зеркальных пластинок или с помощью второй призмы, повернутой на  $180^\circ$ , в один пучок, можно опять получить белый свет. Ньютон так и сделал, собранные вместе цветные пучки действительно дали белый свет. Вывод: **белый свет является сложным, он состоит из смеси световых пучков различной цветности**.

После этого Ньютон, сделав в экране вырез в виде узкой горизонтальной полоски, выделил узкий пучок одного цвета. Поставив на пути этого пучка призму, Ньютон убедился, что он только отклоняется к основанию призмы, но остаётся одноцветным (рис. 111). **Монохроматический свет является простым**. Причём лучи разного цвета преломляются призмой по-разному.

Зная, что свет — это электромагнитное излучение в диапазоне  $380\text{—}760\text{ нм}$  и что разным цветам соответствуют разные длины волн (рис. 112), основное открытие Ньютона можно сформулировать следующим образом: **показатель преломления вещества зависит от длины (частоты) световой волны**. Эта зависимость носит название **дисперсии света**. При увеличении частоты (уменьшении длины волны) показатель преломления увеличивается, поэтому фиолетовые лучи сильнее отклоняются к основанию призмы, чем красные. Бе-

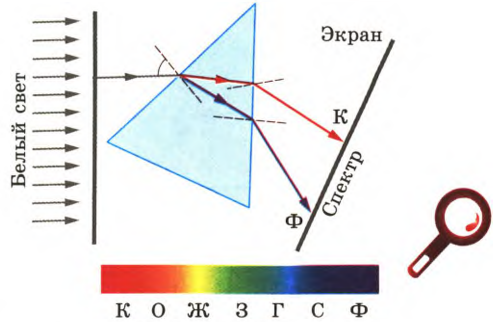


Рис. 110. Опыт Ньютона

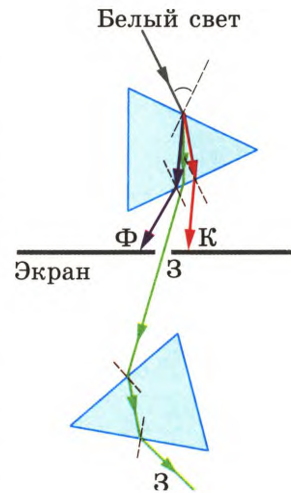
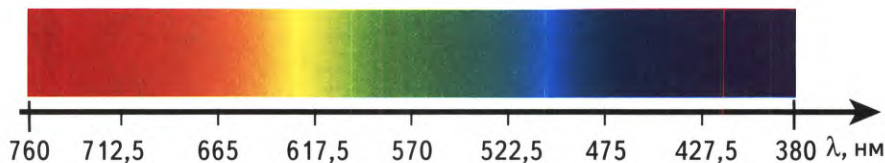


Рис. 111.

Монохроматический свет в спектр не разлагается



лый свет — это совокупность (смесь) простых (монохроматических) цветов.



**Рис. 112.** Разным цветам соответствуют разные длины волн

Оценка цвета, даваемая глазом, очень индивидуальна. Например, вы считаете, что некоторая поверхность имеет красный цвет, а вашему товарищу кажется, что цвет этой поверхности оранжевый. Более точной количественной характеристикой цвета является длина волны излучения. Интервалы длин волн и соответствующие этим интервалам цвета указаны в таблице 5.

*Таблица 5*

Цвет	Интервал $\Delta\lambda$ , нм	Цвет	Интервал $\Delta\lambda$ , нм
Красный	620—760	Голубой	480—500
Оранжевый	590—620	Синий	450—480
Жёлтый	560—590	Фиолетовый	380—450
Зелёный	500—560		

Открытие разложения белого света в спектр позволило объяснить образование радуги и некоторых других метеорологических явлений.



1. Чем отличаются световые волны разного цвета?
2. Опишите опыты Ньютона по изучению явления дисперсии света.
3. На какие простые цвета разделил Ньютон полученный им спектр?
4. Закончите предложения: «Спектр — это...», «Дисперсия — это...», «Монохроматическим называется свет...», «Белый свет представляет собой...».
5. Сравните показатель преломления и скорость распространения в стеклянной призме световых волн красного и фиолетового цвета.





6. Ощущение какого цвета даёт интервал длин волн электромагнитного излучения от 600 до 610 нм?
7. Каким является цвет излучения, частота которого равна  $5 \cdot 10^{14}$  Гц?
- 8 (I). Вода освещена красным светом, для которого длина волны в воздухе 700 нм. Какой будет длина волны в воде ( $n = 1,33$ )? Какой цвет видит человек, открывший глаза под водой?  
(539 нм; красный)



## § 16. Интерференция света

1. Какие источники волн называются когерентными?

2. Какое явление называется интерференцией волн?

3. В каком случае в некоторой точке пространства наблюдается интерференционный максимум?

1. Источники, создающие волны с одинаковой длиной волны и постоянной разностью фаз.

2. Явление наложения когерентных волн, в результате которого создаётся картина чередующихся максимумов и минимумов колебаний.

3. Если в эту точку приходят волны от когерентных источников в одинаковой фазе.



### Опытные факты и наблюдаемые явления

1. Если приглядеться к весенним лужам, то можно увидеть иногда радужную окраску поверхностной плёнки, образованной попавшими в воду нефтепродуктами (рис. 113).

2. Очень красивую и постоянно меняющуюся окраску имеют мыльные пузыри (рис. 114).

3. В 1802 г. Томас Юнг проделал следующий опыт. Свет от источника, прошедший через узкую щель, падал на ширму

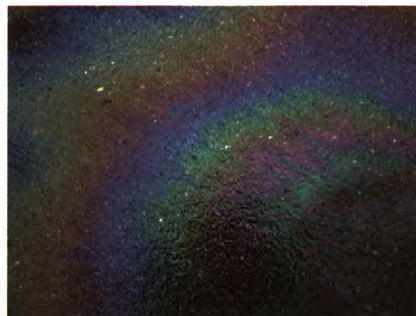


Рис. 113. Цвет масляной плёнки на воде





**Рис. 114.** Окраска мыльного пузыря



(см. рис. 114). Эта окраска получается в результате интерференции света на мыльной плёнке.

с двумя узкими щелями. За ширмой на экране наблюдалось чередование полос с максимумами и минимумами интенсивности света.

**Наша гипотеза:** все описанные явления, а также результат опыта Юнга можно объяснить, если предположить, что свет — это электромагнитная волна, для которой, как для волн любой природы, характерно явление интерференции.

Если вы внимательно приглядитесь к мыльному пузырю, то увидите его радужную окраску

**Интерференция света убедительно доказывает, что свет обладает волновыми свойствами.**

Однако между интерференцией волн на поверхности воды и интерференцией света имеется существенное различие. Получить два когерентных источника механических волн достаточно просто — это могут быть два острия, закреплённые на одной упругой пластинке. Одновременно входя в воду и выходя из неё, эти два острия создают когерентные волны. Если же взять два любых (кроме лазерных) источника света, то в результате освещения какой-либо площадки этими источниками всегда будет только увеличение освещённости.

Свет излучается громадным числом возбуждённых атомов, условия излучения которых быстро и беспорядочно изменяются. Независимые источники не являются когерентными. Для получения когерентных источников приходится заставлять интерферировать части одной и той же волны, идущие от единственного источника и достигающие точки наблюдения различными путями. В школьных условиях возможно получение интерференционной картины с помощью **бипризмы Френеля** (рис. 115).

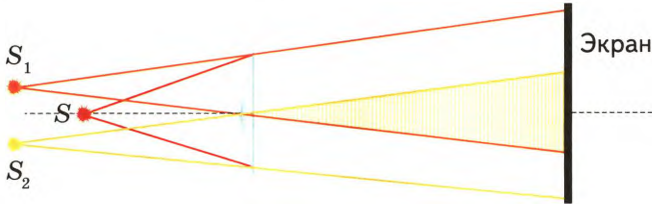
Для раздвоения волны здесь использовано явление преломления света. Дойдя до верхней грани би-



**О. Френель**  
(1788—1824)



призмы, световой пучок, исходящий из источника  $S$ , преломляется и отклоняется к основанию призмы, вниз, так, как будто он вышел из мнимого источника  $S_1$ . Световой пучок, попавший на нижнюю грань, тоже преломляется и отклоняется вверх так, как будто вышел из мнимого источника  $S_2$ .



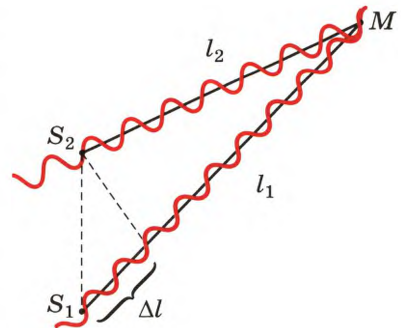
**Рис. 115.** Наблюдение интерференции света с помощью бипризмы Френеля

Мнимые источники  $S_1$  и  $S_2$  когерентны. На самом же деле имеет-ся только один источник  $S$ , которым является освещённая щель, параллельная ребру бипризмы. В той части экрана, где световые пучки перекрываются, наблюдается чередование тёмных и светлых полос, параллельных ребру бипризмы.

**Интерференция света — это сложение волн, идущих от когерентных источников, в результате которого возникает устойчивая картина чередования участков усиления освещённости и участков ослабления освещённости.**

Рассмотрим условие образования интерференционных максимумов и минимумов. Пусть  $S_1$  и  $S_2$  — два когерентных источника света (рис. 116), которые излучают световые волны в одинаковой фазе.  $S_1M$  — расстояние от первого источника до некоторой точки  $M$ .  $S_2M$  — расстояние от второго источника до этой точки.  $S_1M - S_2M = \Delta$  и называется геометрической разностью хода волн.

Если разность хода равна ровно одной длине волны, двум, трём и т.д. длинам волн, то волны от обоих источников будут приходить в точку  $M$  в одинаковых фазах, и в точке  $M$  окажется интерференционный максимум. Амплитуда результирующего колебания будет равна сумме амплитуд колебаний, созда-



**Рис. 116.** К понятию разности хода волн





ваемых обоими источниками. Тогда условие максимумов запишется так:  $\Delta = k\lambda$ , где  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  (целое число).

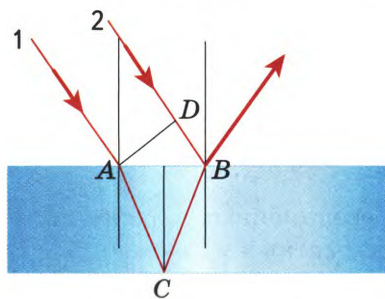
Условие интерференционного максимума: **равенство разности хода волн целому числу длин волн (чётному числу полуволен).**

Если разность хода волн будет включать в себя полуволны, полторы волны, две с половиной волны и т.д., колебания от источников  $S_1$  и  $S_2$  будут приходить в точку  $M$  в противофазе: гребень одной волны будет встречаться со впадиной другой волны. В результате в точке  $M$  амплитуда колебаний окажется минимальной или равной нулю — возникнет интерференционный **минимум**.

Условие минимумов:  $\Delta = \frac{\lambda}{2}(2k + 1)$ , где  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  (целое число): **равенство разности хода волн нечётному числу полуволен.**

Если волны от когерентных источников распространяются в некоторой прозрачной среде с показателем преломления  $n$ , то для нахождения интерференционных максимумов и минимумов надо использовать **оптическую разность** хода, которая равна геометрической разности хода, умноженной на  $n$ .

Объясним теперь окраску тонких плёнок. Пусть на плёнку толщиной  $d$  (рис. 117) падает параллельный пучок световых лучей белого света от удалённого источника. С одной стороны, луч 1, дойдя до плёнки, частично отражается от её поверхности (на чертеже этого луча нет), а частично проходит внутрь плёнки, отражается от её нижней поверхности и выходит из плёнки (проходит внутри плёнки расстояние  $AC + CB$ ). С другой стороны, в точку  $B$  попадает и отражается под тем же углом луч 2. К глазу наблюдателя идут вместе два луча: первый прошёл путь  $ACB$  внутри пластинки, а второй — путь  $DB$  в воздухе. На фронте волны  $AD$  эти лучи имели одинаковую фазу, но потом прошли разные пути в разных средах.



**Рис. 117.** Ход лучей при интерференции на тонких плёнках

Если окажется, что оптическая разность хода этих лучей вмещает в себя целое число длин волн **красного** света, то рассматриваемый участок будет иметь **красный** цвет. Если укладывается целое число длин волн синего или какого-либо другого света, то и цвет плёнки будет соответствующим. При другой толщине плёнки её цвет может оказаться другим. Так появляется радужная окраска масляных плёнок на поверхности луж, окраска мыльных пузырей и других тонких плёнок.





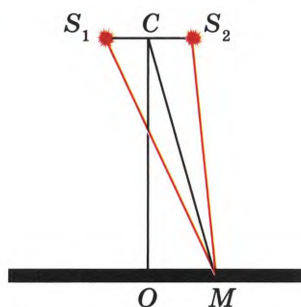
Явление интерференции света используется в **интерферометрах** — приборах для измерения с особо высокой точностью малых расстояний. С одним из типов интерферометров вы познакомитесь при изучении § 20. Также это явление применяется для **контроля качества обработки плоских поверхностей**, для **просветления оптики** и других целей.

Рассмотрим, как производится просветление оптики — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки. Современные объективы оптических приборов представляют собой сложные многолинзовые системы. Попадая на поверхность стеклянной линзы, свет частично отражается от этой поверхности. Отражение происходит от каждой из линз, составляющих объектив, поэтому через объектив проходит только небольшая часть падающего на него света. Чтобы уменьшить эти потери световой энергии, поверхность линзы покрывают прозрачной плёнкой такой толщины и с таким показателем преломления, что лучи, отражённые от поверхности плёнки и от стекла, взаимно гасят друг друга. Это означает, что свет не отражается от линзы, а полностью проходит через неё. Кроме того, просветлённая оптика не даёт бликов, что очень важно в военном деле.

Рассчитаем толщину просветляющей плёнки, имеющей показатель преломления  $n$ . Луч, прошедший через плёнку и отражённый от стекла, проходит по сравнению с лучом, отражённым от плёнки, дополнительное расстояние  $2d$ , где  $d$  — толщина плёнки. Тогда оптическая разность хода  $\Delta = 2dn$ . Минимальная толщина плёнки должна составлять полволны:  $2dn = \frac{\lambda}{2}$ , откуда  $d = \frac{\lambda}{4n}$ .

1. Что такое интерференция света?
2. В чём отличие интерференции света от интерференции волн на поверхности воды?
3. Почему нельзя наблюдать интерференционную картину от двух ламп накаливания?
4. Используя рисунок 115, расскажите, как можно получить два когерентных источника света и наблюдать интерференционную картину.
5. При каком условии наблюдается интерференционный минимум? Максимум?
6. Как объясняется возникновение радужной окраски на поверхностях тонких плёнок?
7. Как осуществляется просветление оптики?
8. Разделите текст на смысловые части и составьте план параграфа.





**Рис. 118.** Схематичное изображение к заданию 10

9 (I). Два когерентных источника испускают монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Будет ли в некоторой точке  $M$  интерференционный максимум, если оптическая разность хода составляет 1,5 мкм?

10 (II). Расстояние на экране (рис. 118) между двумя соседними максимумами освещённости равно 1,2 мм. Определите длину волны света, испускаемого когерентными источниками  $S_1$  и  $S_2$ , если  $OC = 2$  м,  $S_1S_2 = 1$  мм. (600 нм)

## § 17. Дифракция света



1. Что такое дифракция волн?

2. В чём заключается принцип Гюйгенса?

1. Огибание волнами препятствий.

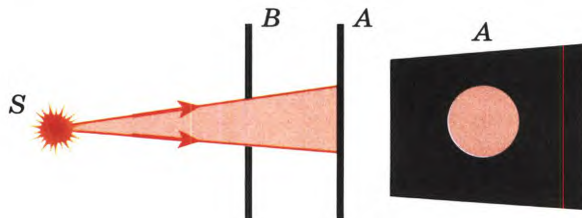
2. Каждая точка, до которой дошёл фронт волны, становится источником вторичных волн.



Если вы окликнете товарища, который находится за углом дома, он услышит вас, значит, звуковые волны могут огибать угол дома.

**Дифракция** — это типично волновой процесс, поэтому она свойственна волнам любой природы, в том числе и электромагнитным.

Если между экраном  $A$  и освещающим его источником света  $S$  поместить другой экран  $B$  с отверстием, то на экране появится светлое пятно (рис. 119). Границы этого пятна можно найти геометрическим путём, учитывая, что свет распространяется прямолинейно.



**Рис. 119.** Светлое пятно имеет резкие границы





Если отодвинуть экран  $A$  от экрана  $B$  достаточно далеко, а диаметр отверстия в экране  $B$  уменьшить до десятых долей миллиметра, то пятно на экране будет состоять из чередующихся тёмных и светлых колец, постепенно переходящих друг в друга и захватывающих также область геометрической тени (рис. 120). Это говорит о нарушении прямолинейности распространения света от источника  $S$ : свет попадёт в область геометрической тени.

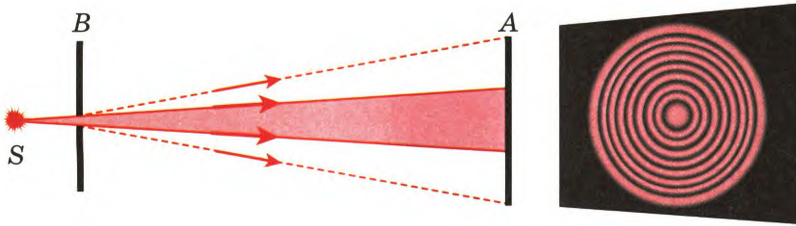


Рис. 120. Дифракционная картина монохроматического света

**Явление отклонения света от прямолинейного распространения вблизи преград называется дифракцией света.**

Получающаяся на экране картина называется **дифракционной**.

При использовании белого света дифракционная картина приобретает радужную окраску.

Для наблюдения дифракции размеры препятствия (щели или отверстия в экране) должны быть сравнимы с длиной световой волны. Дифракцию также можно наблюдать и на непрозрачных предметах, размеры которых малы по сравнению с расстоянием до места наблюдения (экрана):

$$l \geq \frac{R^2}{\lambda},$$

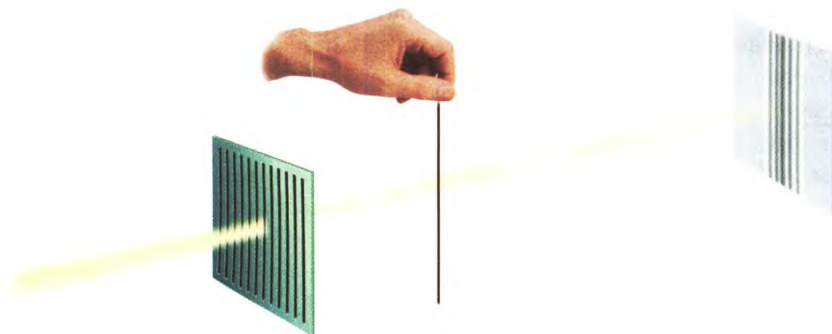
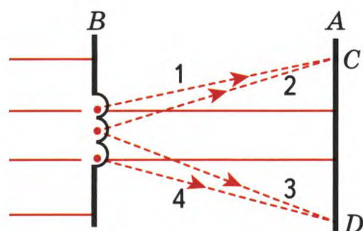
где  $l$  — расстояние от препятствия до экрана,  $R$  — размеры препятствия.

На рисунке 121 показана дифракционная картина, даваемая тонкой проволоочкой.

Неравенство  $\lambda \leq \frac{R^2}{l}$  означает, что методы геометрической опти-

ки можно использовать для описания распространения достаточно коротких волн, распространяющихся вблизи препятствий больших размеров. Таким образом, **геометрическая оптика является предельным случаем волновой теории.**



**Рис. 121.** Дифракция от тонкой проволоки**Рис. 122.** Ход лучей при дифракции света

Дифракция света может быть объяснена на основе принципа Гюйгенса. Пусть плоская световая волна падает на экран *A* через круглое отверстие в экране *B* (рис. 122). Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка фронта волны, заполняющего отверстие, является источником вторичных волн. Эти волны (1 и 2, 3 и 4 и т.д.) когерентны, поэтому будут интерферировать.

В зависимости от разности хода на экране в точках *C*, *D* и т.д. возникнут максимумы или минимумы освещённости. Таким образом, на экране появится кольцеобразная дифракционная картина.

Дифракция света накладывает ограничения на разрешающую способность оптических приборов. Две близкие точки из-за дифракции света на входном отверстии объектива становятся неразличимыми, прибор не разделяет этих точек. Для микроскопа разрешаемое расстояние равно приблизительно половине длины световой волны. Это означает, что в оптический микроскоп нельзя рассматривать предметы, размер которых меньше 300 нм.

Явление дифракции света находит применение в дифракционных решётках.

**Дифракционная решётка — это спектральный прибор, представляющий собой совокупность большого числа узких непрозрачных полос на прозрачном материале.**



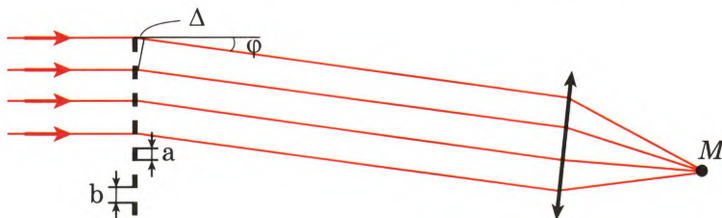
В школьной лаборатории обычно используются дифракционные решётки, содержащие 50 или 100 штрихов на каждый миллиметр. В научных лабораториях решётки более тонкие: от 1000 до 10 000 штрихов на миллиметр.

Если  $a$  — ширина полосы,  $b$  — ширина просвета, то  $d = a + b$  — **постоянная (период) решётки**.

Пусть на дифракционную решётку (рис. 123) падает пучок параллельных лучей белого света. От каждой точки, до которой дошёл фронт волны, отходят лучи по всем направлениям. Рассмотрим те из них, которые пошли под углом  $\varphi$  к нормали к решётке. Если разность хода верхних двух лучей, равная  $\Delta$ , включает ровно одну длину волны  $\lambda$ , например красного света, то на экране в точке  $M$  окажется красная полоса. Для точки рядом с  $M$  окажется максимум для длин волн, соответствующих оранжевому цвету, потом жёлтому, зелёному и т.д. Таким образом, на экране окажется спектр первого порядка ( $k = 1$ ). Из чертежа видно, что  $\Delta = d \sin \varphi$ . Тогда:

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

где  $d$  — постоянная (период) решётки,  $k = 0; \pm 1; \pm 2$  — порядок спектра.



**Рис. 123.** Прохождение света через дифракционную решётку

При помощи дифракционной решётки можно определить длину световой волны.

На рисунке 124 показана картина, которую можно увидеть, если рассматривать свет от газосветной лампы через дифракционную решётку, расположив её штрихи вертикально (параллельно лампе). Чем меньше постоянная решётки, тем больше длина спектра на экране.

В средней части расположена полоска белого света. Справа и слева от неё расположены два спектра первого порядка, причём цвета располагаются от фиолетового к красному, начиная от центральной полосы. Потом справа и слева расположены спектры второго порядка, третьего и т.д.

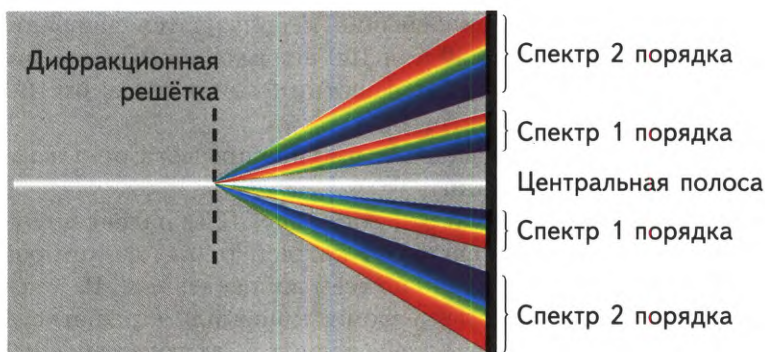


Рис. 124. Дифракционные спектры

Роль грубой дифракционной решётки может играть кусок капроновой ткани. Если посмотреть через неё на раскалённый волосок электрической лампы с достаточно большого расстояния, можно увидеть целый ряд узких спектров справа и слева, а также сверху и снизу от центра лампы. В этой решётке непрозрачные полосы, параллельные друг другу, идут не только вдоль ленты, но и поперёк ленты.



1. Закончите фразу: «Дифракция света — это...», «Дифракционная решётка — это...», «Постоянной дифракционной решётки называется...».
2. Почему дифракция света не наблюдается в солнечный день от стволов деревьев, фонарных столбов и т.д.?
3. При каких условиях может наблюдаться дифракция света?
4. Объясните появление дифракционной картины, используя принцип Гюйгенса.
5. Сравните спектры, даваемые дифракционной решёткой и трёхгранной призмой.
6. Как при помощи дифракционной решётки можно определить длину световой волны (определить порядок спектра)?
7. Решётку с периодом  $d_1 = 10^{-5}$  м заменили на решётку с периодом  $d_2 = 2 \cdot 10^{-5}$  м. Как изменился полученный дифракционный спектр?
8. Разделите текст на смысловые части и составьте план параграфа.
- 9 (I). На каком минимальном расстоянии от экрана надо разместить иголку диаметром 0,5 мм и карандаш диаметром 0,5 см, чтобы наблюдать явление дифракции света с длиной волны 500 нм?  
(0,5 м; 50 м)







- 10 (I). Период дифракционной решётки равен  $1,5 \text{ мкм}$ . Чему равна ширина прозрачных щелей, если она в 2 раза больше ширины непрозрачных промежутков между щелями? ( $1 \text{ мкм}$ )
- 11 (I). Монохроматический свет падает перпендикулярно плоскости дифракционной решётки. Под каким углом будет наблюдаться первый главный максимум зелёной линии спектра ртутной лампы (длина волны  $546 \text{ нм}$ ), если период решётки  $1,1 \text{ мкм}$ ? ( $30^\circ$ )
- 12 (II). На дифракционную решётку, имеющую период  $6 \text{ мкм}$ , нормально падает монохроматическая волна. Определите длину волны, если угол между двумя дифракционными максимумами второго и третьего порядка равен  $3^\circ$ ? ( $300 \text{ нм}$ )
- 13 (II). Какую наибольшую длину волны можно наблюдать в спектре третьего порядка дифракционной решётки, имеющей 500 штрихов на  $1 \text{ мм}$ ? ( $670 \text{ нм}$ )
- 14 (II). Дифракционная решётка освещена нормально падающим монохроматическим светом. Максимум второго порядка наблюдается под углом  $14^\circ$ . На какой угол отклонён максимум третьего порядка? ( $21^\circ$ )

## § 18. Поляризация света

1. Что представляет собой электромагнитная волна?

1. Колебания напряжённости электрического поля перпендикулярны колебаниям индукции магнитного поля и направлению распространения.

2. К какому виду волн относится электромагнитная волна — к продольным волнам или к поперечным?

2. Электромагнитные волны являются поперечными.



Световые волны создаются возбуждёнными атомами. Опыт и теория показывают, что химическое, физиологическое и другие виды воздействия света на вещество обусловлены в основном электрическими колебаниями, поэтому, говоря о плоскости световых колебаний, будем иметь в виду плоскость, в которой происходят колебания напряжённости электрического поля.





Всякий реальный источник света состоит из множества атомов, излучающих свет беспорядочно. Световые волны испускаются в плоскостях со всевозможными ориентациями. Такой свет, в котором колебания напряжённости электрического поля (следовательно, и колебания индукции магнитного поля) имеют всевозможную ориентацию, называется естественным светом (рис. 125, а).

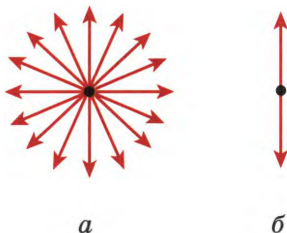


Рис. 125. Естественный и поляризованный свет

Естественный свет можно **поляризовать**, то есть превратить его в поляризованный свет. Для этого надо создать условия, при которых колебания вектора напряжённости электрического поля  $E$  происходили бы только в одной плоскости (рис. 125, б). Такие условия могут возникнуть при прохождении света через среду, которая анизотропна в отношении электрических колебаний. Анизотропия свойственна кристаллам, поэтому можно ожидать поляризации света, проходящего через кристалл.

К природным кристаллам, поляризующим свет, относится, например, **турмалин** — прозрачный кристалл тёмно-зелёного цвета. Если вырезать из кристалла пластинку, параллельную оси  $OO_1$  кристалла, и поставить на пути пучка естественного света, свет полностью поляризуется и имеет электрические колебания только в плоскости  $Q$  (рис. 126). Поляризованный свет, который выходит из пластинки, ничем не отличается от естественного, он лишь несколько ослаблен из-за поглощения внутри пластинки.

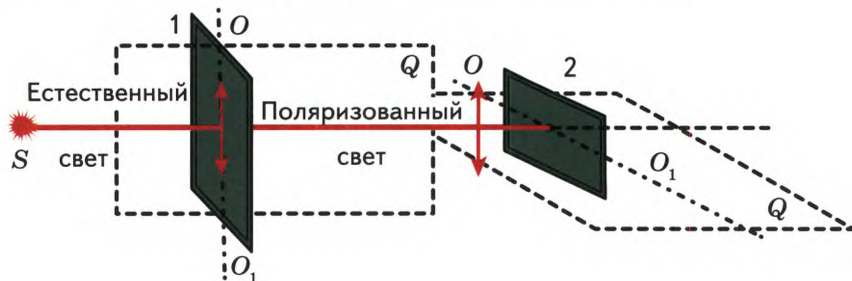


Рис. 126. Прохождение света через пластинку из турмалина

При повороте пластинки в вертикальной плоскости интенсивность поляризованного света не изменяется — это говорит о том, что в естественном свете все направления колебаний вектора  $E$  равноправны.





Если за пластинкой 1 поместить точно такую же пластинку 2 и точно также ориентированную, то поляризованный свет проходит через эту пластинку без изменения. Теперь начнём поворачивать пластинку 2 — проходящий через неё свет будет постепенно ослабевать и совсем исчезнет, когда оси пластинок будут скрещены — расположены под углом  $90^\circ$  друг к другу. В этом случае электрические колебания перпендикулярны плоскости колебаний  $Q$ . При дальнейшем вращении пластинки 2 поляризованный свет снова начинает проходить через неё, его интенсивность будет максимальной при угле  $180^\circ$ .

Пластинка 1, поляризующая свет, называется **поляризатором**, а пластинка 2, посредством которой изменяется интенсивность поляризованного света, называется **анализатором**. Пластинки одинаковы, их можно поменять местами. Тогда поляризатором будет пластинка 2, а анализатором — пластинка 1.

Явление поляризации света является доказательством **поперечности электромагнитных волн**. Если явления интерференции и дифракции свойственны как поперечным, так и продольным волнам, то явление поляризации — только поперечным волнам.

В настоящее время для поляризации света широко используются поляроиды, представляющие собой прозрачную полимерную плёнку, содержащую множество мелких кристалликов **герапатита**. Оптические оси всех кристалликов герапатита ориентированы в одном направлении.

Частичная поляризация света происходит при его **отражении** от поверхности воды или стекла. Если отражённый от них свет рассматривать через поляроид, то при его повороте интенсивность отражённого света будет понижаться почти до нуля, затем увеличиваться, потом опять уменьшаться и т.д.

Одним из интересных практических применений поляроида является его использование в автотранспорте для защиты водителя от ослепления светом фар встречного автомобиля. С этой целью на ветровое стекло и на фары автомобиля наклеивается поляроидная плёнка так, что оптические оси плёнки на фарах составляют прямой угол с оптическими осями плёнки на ветровом стекле. Тогда при встрече автомобилей свет фар каждого из автомобилей не проходит через ветровое стекло встречного автомобиля и не ослепляет водителя.

1. Какой свет называют естественным?
2. Какой свет называется поляризованным?







3. Какое свойство электромагнитных волн подтверждается явлением поляризации света?
4. Используя рисунок 126, расскажите, как осуществляется поляризация света.
5. Являются ли поляризатор и анализатор взаимозаменяемыми?
6. Как доказать, что при отражении света от поверхности воды или стекла происходит его частичная поляризация?
7. Что такое поляроид и каково его назначение?
8. Разделите текст на смысловые части и составьте план параграфа.

## § 19. Шкала электромагнитных волн



1. Какие виды электромагнитных излучений вам известны?

2. Какими свойствами обладает свет?

1. Радиоволны, видимое излучение — свет.

2. Для света, как и для волн любой природы, свойственны явления отражения, преломления, интерференции, дифракции. Поперечность световых волн доказывает явление поляризации света.



**Шкала электромагнитных волн, или спектр электромагнитных излучений, — это непрерывная последовательность длин волн от бесконечности до  $10^{-13}$  м в порядке уменьшения длины волны.**

На рисунке 127 показано, что кроме радиоволн и видимого излучения в шкалу электромагнитных волн входят **инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения.**

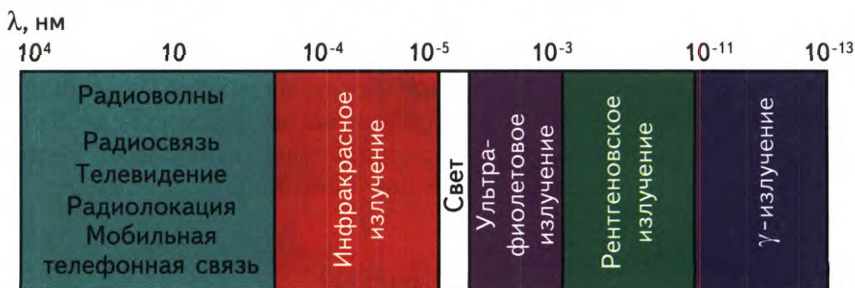


Рис. 127. Шкала электромагнитных волн



Прежде чем остановиться подробнее на каждом из видов излучений, отметим то общее, что присуще всей шкале в целом.

**Между отдельными частями спектра нет резких границ.** Например, ультракороткие радиоволны могут иметь длину волны меньше, чем длина волны инфракрасного излучения.

По мере уменьшения длины волны **всё меньше проявляются волновые свойства излучений** и всё ярче — **корпускулярные свойства**, о которых пойдёт речь в следующей главе.

Шкала электромагнитных волн — яркий пример проявления закона диалектики — **перехода количественных изменений в качественные**. Так, например, радиоволны задерживаются тонкой металлической пластиной, а рентгеновское излучение проходит сквозь неё. Свет проходит через оконное стекло, а ультрафиолетовое излучение, длина волны которого меньше, задерживается им. Изменение длины волны ведёт к изменению свойств излучений.

Для всех видов излучений свойственны явления **отражения, преломления, интерференции, дифракции, поляризации**. Скорость распространения всех видов излучения в вакууме одинакова и составляет  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

### Радиоволны ( $10^4$ м — $10^{-4}$ м)

Используются в радиосвязи, телевидении, радиолокации, в мобильной телефонной связи. Некоторые свойства радиоволн рассмотрены в § 10. Здесь же рассмотрим подробнее особенности коротких и длинных волн, которые по-разному распространяются в атмосфере Земли.

На высоте около 300 км над поверхностью Земли находится слой ионизированных газов — **ионосфера**. Длинные и средние волны отражаются от ионосферы и возвращаются на Землю, а короткие и ультракороткие могут проходить сквозь ионосферу в космическое пространство. Поэтому именно они используются для связи с космическими кораблями, а также для радиосвязи между пунктами в пределах прямой видимости (рис. 128).

В настоящее время электромагнитное излучение с частотой  $10^{11}$ — $10^{13}$  Гц выделяют в особую группу — **терагерцевое излучение** (ТГц), потому что его свойства отличаются как от свойств более длинных



**Рис. 128.** Распространение коротких и длинных радиоволн





радиоволн, так и от свойств инфракрасного излучения. Терагерцевое излучение легко проходит сквозь большинство диэлектриков, но сильно поглощается проводящими материалами. Например, дерево, пластик, керамика для него прозрачны, а металл и вода — нет.

Сейчас техника субмиллиметровых волн бурно развивается. В частности, это излучение используется в системах безопасности для сканирования багажа и людей, в медицинской практике, для контроля качества выпускаемой продукции и для многих других целей.

### Инфракрасное излучение ( $\lambda = 10^{-4} \text{ м} — 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ )

Если чувствительный термоэлемент поместить в красную часть спектра так, что на него из всех выделенных из белого света цвет-

ных пучков падает только красный свет, то гальванометр, соединённый с термоэлементом, покажет наличие тока (рис. 129). Следовательно, свет несёт энергию. В синей части спектра эта энергия несколько меньше, в красной части — больше.

Если поместить термоэлемент до красной части спектра, там, где глаз уже ничего не видит, термоэлемент по-прежнему будет нагреваться.

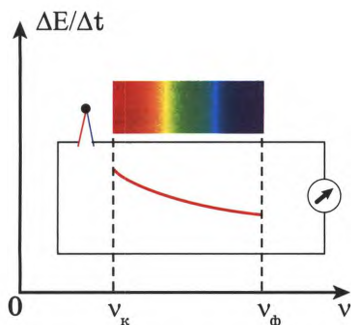


Рис. 129. Обнаружение инфракрасного излучения

**Электромагнитные волны с длиной волны, большей длины волны красного света, называются инфракрасным излучением.**



У. Гершель  
(1738—1822)

Инфракрасное излучение открыто У. Гершелем в 1800 г. Оно производится любым нагретым телом: батареей отопления, телом человека или животного, горячим утюгом, чайником и т.д. Оно используется для обогрева жилых помещений, сушки овощей и т.д.

Изготавливаются бинокли и оптические прицелы, позволяющие видеть в темноте. Для научных целей используется фотография в инфракрасных лучах.

Инфракрасное излучение сильнее поглощается тёмными телами, имеющими шероховатую поверхность. Наоборот, белые и блестящие тела в меньшей мере поглощают это излучение и в большей мере отражают.





### Видимое излучение (свет) ( $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м} — 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ )

Мы уже рассмотрели явления отражения, преломления света, явления интерференции, дифракции, дисперсии, поляризации света. В некоторых явлениях свет проявляет свойства частиц (это будет рассмотрено в следующей главе).

Свет оказывает **химическое** действие: засвечивает фотопластинку, а также биологическое действие — **фотосинтез**. Фотосинтез также содержит химическую компоненту. Это важный процесс улавливания и преобразования энергии света в энергию химических связей органических веществ. Это один из самых важных процессов, протекающих на Земле под действием света. Фотосинтез заключается в превращении неорганических веществ (воды и углекислого газа) в органические. Он осуществляется под влиянием солнечного света, поглощаемого хлорофиллом, и сопровождается выделением газообразного кислорода. Фотосинтез обеспечивает условия, необходимые для существования жизни на планете.

Свет действует не только на органы зрения, но и на кожный покров. Для человека, животных и растений свет является необходимым жизненным фактором.

Свет оказывает давление на твёрдые тела. Давление света с помощью тончайших экспериментов измерил русский учёный **Пётр Николаевич Лебедев**, подтвердив тем самым теоретические выводы Дж. Максвелла.

### Ультрафиолетовое излучение ( $\lambda = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м} — 10^{-8} \text{ м}$ )

Если поместить чувствительный термоэлемент за фиолетовую часть спектра, стрелка гальванометра опять будет отклоняться, хотя и значительно меньше. Следовательно, за фиолетовой частью спектра существует электромагнитное излучение, которое названо **ультрафиолетовым излучением**.

**Ультрафиолетовое излучение — это электромагнитные волны с длиной волны меньшей, чем длина волны фиолетового света.**

Ультрафиолетовое излучение открыто немецким физиком **И. Риттером** в 1801 г. Оно вызывает люминесценцию некоторых веществ, обладает высокой химической активностью — засвечивает фотоплёнку значительно сильнее, чем видимое излучение. На сетчатку глаза ультрафиолетовое



**И. Риттер**  
(1776—1810)



излучение действует разрушительно, поэтому без специальных защитных очков нельзя смотреть на дуговую электросварку.

Обычное стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи, но кварцевое стекло для них прозрачно. В малых дозах ультрафиолетовые лучи полезны: они вызывают фотохимическую реакцию в наружном слое кожи, ведущую к образованию коричневого пигмента (загар), усиливается сопротивляемость организма инфекционным заболеваниям, улучшается обмен веществ.

Ультрафиолетовое излучение с длиной волны меньше 280 нм обладает сильным бактерицидным действием и используется для стерилизации молока, обеззараживания воздуха в помещениях. Большая часть ультрафиолетового излучения Солнца поглощается атмосферой Земли.

### Рентгеновское излучение ( $\lambda = 10^{-8} \text{ м} - 10^{-11} \text{ м}$ )

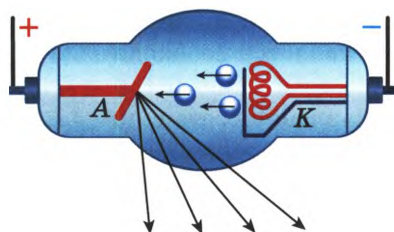


Рис. 130. Трубка Рентгена

Это излучение было открыто в 1895 г. немецким физиком **Вильгельмом Рентгеном**. В стеклянном баллоне, где создан высокий вакуум, помещается катод, который разогревается специальной нитью накала (рис. 130) и вследствие термоэлектронной эмиссии испускает электроны.

Электроны разгоняются сильным электрическим полем и, попадая на анод А, резко тормозятся. Торможение электронов сопровождается электромагнитным излучением с очень короткой длиной волны, получившим название **рентгеновского излучения**.



Рис. 131. Рентгеновский снимок кисти руки

**Рентгеновское излучение — электромагнитное излучение, длина волны которого меньше длины волны ультрафиолетового излучения.**

Замечательная особенность рентгеновских лучей состоит в том, что они проходят через некоторые непрозрачные для света тела (рис. 131).





Рентгеновские лучи применяются:

- в медицине для постановки правильного диагноза заболевания;
- в научных исследованиях для установления порядка расположения атомов в кристаллах. В этом случае кристалл используется как дифракционная решётка.

Проводимые в нашей стране ежегодные флюорографические обследования населения позволяют предотвратить ряд серьёзных заболеваний.

**$\gamma$ -лучи ( $\lambda = 10^{-10} \text{ м} — 10^{-13} \text{ м}$ )**

Это излучение возникает при самопроизвольном распаде некоторых атомов. Обладает высокой проникающей способностью. Оказывает сильное химическое и биологическое действие. Вредное воздействие этого излучения на живые организмы будет рассмотрено в следующей главе.

1. Что такое шкала электромагнитных волн?
2. Что можно сказать о границах между отдельными частями спектра электромагнитных излучений?
3. Как изменяются волновые и корпускулярные свойства излучений по мере уменьшения длины волны?
4. Покажите на примере шкалы электромагнитных волн проявление закона диалектики: перехода количественных изменений в качественные.
5. Чем отличается распространение длинных радиоволн от распространения коротких и ультракоротких радиоволн?
6. Используя текст параграфа и дополнительные источники информации, опишите диапазоны электромагнитного излучения по плану:
  - 1) название излучения;
  - 2) диапазон;
  - 3) кто, когда и как открыл;
  - 4) источники излучения;
  - 5) свойства излучения;
  - 6) области применения излучения.







## Лабораторная работа 3

## Определение показателя преломления стекла

**Цель работы:** научиться определять показатель преломления стекла.

**Приборы и материалы:** стеклянная пластинка, 4 иглы, лист бумаги, линейка, карандаш, пластина из пенопласта.

## Порядок выполнения работы

1. Положите на пластину из пенопласта лист бумаги. На лист бумаги положите стеклянную пластинку и обведите её контуры тонко отточенным карандашом (рис. 132).

2. Уберите пластинку и проведите сначала перпендикуляр  $KL$  к пластине, затем падающий луч  $AB$ .

3. Поставьте на луч  $AB$  две иглы, желательно подальше одну от другой.

4. Поставьте на прежнее место стеклянную пластинку и, глядя сквозь неё, поставьте третью иглу так, чтобы казалось, что все три иглы стоят на одной прямой.

5. Поставьте четвёртую иглу так, чтобы, глядя сквозь стекло, казалось, что все 4 иглы стоят на одной прямой.

6. Уберите стеклянную пластинку, все иглы и по следам третьей и четвёртой игл проведите луч  $CD$ , который вышел из стеклянной пластинки.

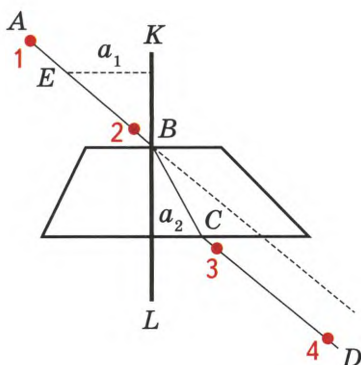
7. Соединив точки  $B$  и  $C$ , проведите луч, который прошёл внутри стеклянной пластинки.

8. Продолжив луч  $AB$ , убедитесь, что луч  $CD$ , который вышел из пластинки, параллелен лучу  $AB$ .

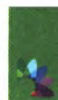
9. Измерьте гипотенузу  $BC$  и отложите на луче отрезок  $BE$ , равный  $BC$ . Опустите из точки  $E$  перпендикуляр на  $KL$ . Отношение катета  $a_1$  к катету  $a_2$  будет равно отношению  $\sin \alpha$  к  $\sin \beta$  и равно показателю преломления стекла.

10. Измерьте катеты  $a_1$  и  $a_2$  и рассчитайте  $n$ . 
$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{a_1}{a_2}.$$

11. Приняв за абсолютную погрешность измерения катетов 0,5 мм, рассчитайте относительную погрешность измерения каждо-



**Рис. 132.** Схематическое изображение к лабораторной работе 3



го катета, относительную и абсолютную погрешность измерения показателя преломления стекла. Запишите ответ с учётом найденной абсолютной погрешности измерения  $n$ .

12. Сформулируйте вывод согласно цели работы.

## Лабораторная работа 4

### Определение оптической силы собирающей линзы

**Цель работы:** научиться определять фокусное расстояние и оптическую силу линзы различными способами.

**Приборы и материалы:** собирающая линза, экран, низковольтная лампа, линейка.

#### Порядок выполнения работы

##### Способ 1

1. Поднесите линзу к стене, находящейся против окон, на такое расстояние, при котором на стене или на листе бумаги, прижатом к стене, получается чёткое перевёрнутое изображение окна. Измерьте расстояние от линзы до стены — это расстояние приблизительно равно фокусному расстоянию линзы.

2. По формуле  $D = \frac{1}{F}$  рассчитайте оптическую силу линзы.

##### Способ 2

1. Соберите электрическую цепь и включите низковольтную лампу.

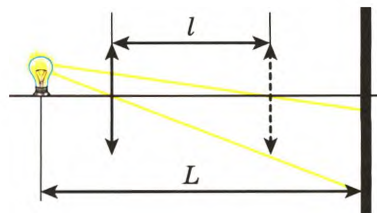
2. Поставьте экран так, чтобы расстояние между лампочкой и экраном было около 80—90 см. Между лампочкой и экраном примерно посередине поставьте линзу.

3. Придвигайте линзу к экрану до тех пор, пока на экране не получится резкое перевёрнутое изображение лампочки. Измерьте расстояние  $d$  от лампочки до линзы, расстояние  $f$  от линзы до экрана и по формуле тонкой линзы рассчитайте оптическую силу линзы.

##### Способ 3

1. Измерьте расстояние  $L$  между предметом (лампочкой) и экраном.

2. Найдите два положения линзы, при которых на экране получаются резкие изображения предмета — увеличенное и уменьшенное. Измерьте расстояние  $l$  между этими положениями (рис. 133).



**Рис. 133.** Схематичное изображение к лабораторной работе 4



3. Используя свойство обратимости лучей, можно написать:

$$L = d + f; d = \frac{L + l}{2}; f = \frac{L - l}{2}.$$

$$l = d - f; D = \frac{2}{L + l} + \frac{2}{L - l}; D = \frac{4L}{L^2 - l^2}.$$

4. Используя последнюю формулу, рассчитайте оптическую силу линзы.  
5. Сформулируйте вывод согласно цели работы.

## Лабораторная работа 5

### Наблюдение явлений интерференции и дифракции света

**Цель работы:** наблюдение интерференционных и дифракционных картин.

**Приборы и материалы:** стакан, средство для мытья посуды, кусок проволоки длиной около 20 см, лазерный диск, капроновый лоскут, листок фольги с прорезью, лампа накаливания (одна на класс).

#### Порядок выполнения работы

1. Подготовьте мыльный раствор. Для этого в стакан воды налейте несколько капель средства для мытья посуды (типа Fairy).
2. Сверните из бумаги трубочку и выдуйте мыльный пузырь диаметром около 8—10 см.
3. Наблюдайте радужную окраску мыльного пузыря. Сделайте рисунок или фотоснимок на мобильный телефон.
4. Сделайте проволочный прямоугольный каркас. Опустите его в мыльный раствор, затем расположите вертикально и наблюдайте за изменением окраски плёнки. Сделайте рисунок или фотоснимок.
5. Сделайте в листе фольги разрез лезвием безопасной бритвы.
6. Расположите лист со щелью вертикально и, смотря сквозь щель на вертикальную светящуюся нить лампы, наблюдайте дифракционную картину. Как меняется дифракционная картина при увеличении ширины щели?
7. Наблюдайте в проходящем свете дифракционную картину, получаемую с помощью капронового лоскута.
8. Наблюдайте дифракционную картину в отражённом свете с помощью лазерного диска, расположив его горизонтально.
9. Оформите отчёт о проделанной работе.
10. Сформулируйте вывод согласно цели работы.





## Лабораторная работа 6

### Определение длины световой волны

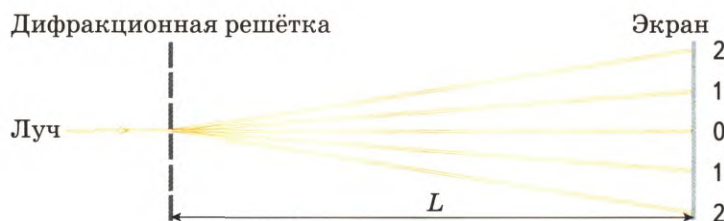
**Цель работы:** рассмотреть дифракционный спектр и измерить длину волны лазерной указки.

**Приборы и материалы:** лазерная указка (одна на класс), рулетка, линейка, дифракционная решётка.

#### Порядок выполнения работы

1. В слегка затемнённом классе на дальнем от доски крае демонстрационного стола закрепите в лапке штатива лазерную указку, а рядом с ней, ближе к доске, дифракционную решётку. Измерьте расстояние  $L$  от решётки до доски.

2. Направьте луч лазерной указки через дифракционную решётку на доску. Рассмотрите полученные на доске спектры монохроматического света (рис. 134).



**Рис. 134.** Схематичное изображение к лабораторной работе 6

3. Отметьте на доске середины полученных пятен, соответствующих центральному максимуму и максимумам первого, второго и третьего порядков. Измерьте расстояния  $l$ . Эти расстояния измеряются справа и слева от центрального максимума, и берётся среднее из полученных значений. Результаты занесите в таблицу 6, перечертив её в тетрадь.

Таблица 6

$L$ , м	$d$ , м	$k$	$l$ , м	$\operatorname{tg} \varphi$	$\sin \varphi$	$\lambda$ , м	$\lambda$ ср., м

4. Рассчитайте для каждого порядка спектра  $\operatorname{tg} \varphi$ , затем  $\sin \varphi$ .



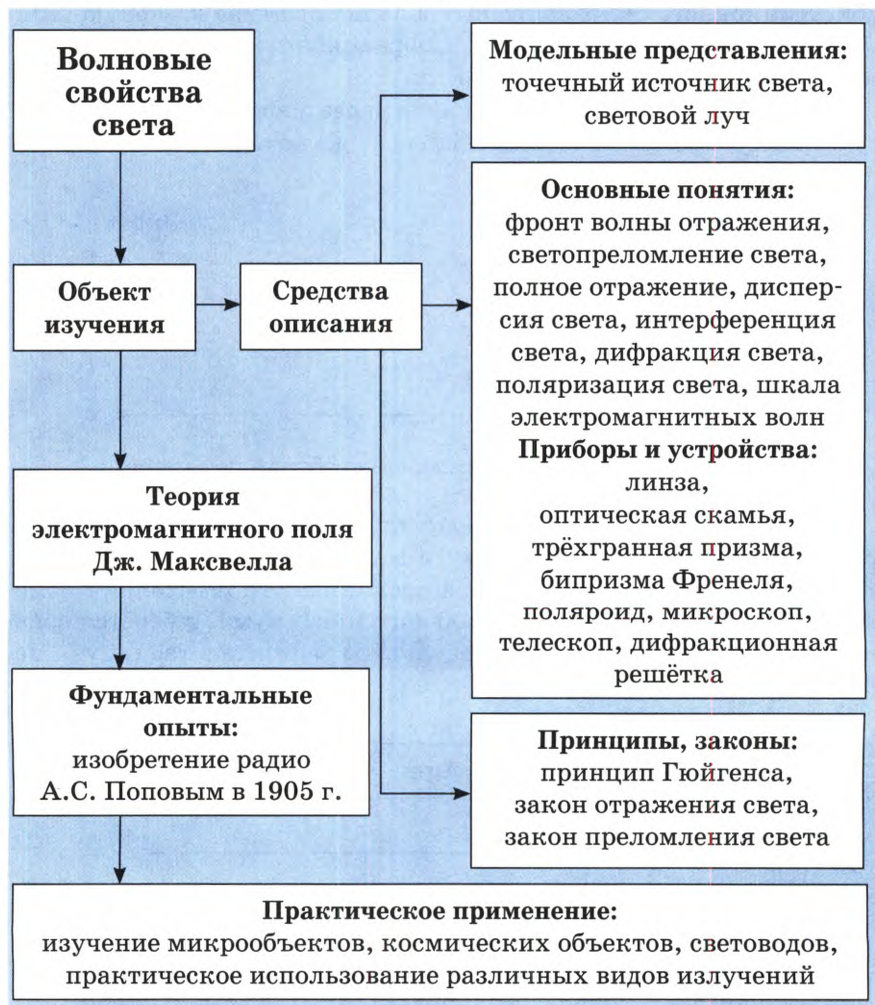
5. По формуле дифракционной решётки рассчитайте длину волны излучения по первому, второму и третьему порядкам спектра. Найдите среднее значение длины волны света, излучаемого лазерной указкой.

6. Считая абсолютную погрешность измерения  $L$  равной 10 см, а  $\Delta l$  — 1 см, рассчитайте относительную погрешность измерения  $\lambda$ , затем абсолютную погрешность измерения  $\lambda$ .

7. Запишите результат с учётом найденных погрешностей.

8. Сформулируйте вывод согласно цели работы.

### Структура и содержание главы «Волновые свойства света»



**Задания для повторения главы III****Часть 1**

1. Как изменяются частота и длина волны света при переходе из вакуума в среду с показателем преломления  $n$ ?

- 1) Длина волны уменьшается в  $n$  раз, частота увеличивается в  $n$  раз.
- 2) Длина волны увеличивается в  $n$  раз, частота уменьшается в  $n$  раз.
- 3) Длина волны уменьшается в  $n$  раз, частота не изменяется.
- 4) Длина волны увеличивается в  $n$  раз, частота не изменяется.

2. Явление дифракции света происходит

- 1) только на малых круглых отверстиях
- 2) только на больших отверстиях
- 3) только на узких щелях
- 4) на краях любых отверстий и преград

3. При освещении мыльной плёнки белым светом наблюдаются разноцветные полосы. Какое физическое явление обуславливает появление этих полос?

- 1) дифракция
- 2) интерференция
- 3) дисперсия
- 4) поляризация

4. Собирающая линза может давать

- 1) только увеличенные изображения предметов
- 2) только уменьшенные изображения предметов
- 3) увеличенные, уменьшенные и равные изображения предметов
- 4) только уменьшенные или равные предмету изображения

5. Технология «просветления» объективов оптических систем основана на использовании явления

- 1) дифракции
- 2) интерференции
- 3) дисперсии
- 4) поляризации

6. Свет в прозрачной среде с абсолютным показателем преломления  $n$  имеет длину волны  $\lambda$ . Какова длина волны  $\lambda_1$  этого света в вакууме?

- 1)  $\lambda_1 = \lambda$
- 2)  $\lambda_1 = \frac{\lambda}{n}$
- 3)  $\lambda_1 = n \cdot \lambda$
- 4)  $\lambda_1 = n^2 \cdot \lambda$

7. Объектив фотоаппарата при фотографировании обычно даёт на плёнке

- 1) действительное увеличенное изображение
- 2) действительное уменьшенное изображение





- 3) мнимое увеличенное изображение  
4) мнимое уменьшенное изображение
8. Свет от двух точечных когерентных монохроматических источников приходит в точку 1 экрана с разностью хода  $\Delta = 3/2\lambda$ , в точку 2 экрана с разностью хода  $\Delta = 1/2\lambda$ . Одинакова ли в этих точках освещённость, и если не одинакова, то в какой точке больше?
- 1) одинакова и отлична от нуля  
2) одинакова и равна нулю  
3) не одинакова, больше в точке 1  
4) не одинакова, больше в точке 2
9. Объектив телескопа при фотографировании небесных тел даёт
- 1) действительное увеличенное изображение  
2) действительное уменьшенное изображение  
3) мнимое увеличенное изображение  
4) мнимое уменьшенное изображение
10. Какой из перечисленных ниже видов электромагнитных излучений имеет наибольшую длину волны?
- 1) радиоволны                      3) инфракрасное излучение  
2) видимый свет                  4) рентгеновское излучение

### Часть 2\*

1. Человек читает книгу, держа её на расстоянии 50 см от глаз. Если для него это расстояние наилучшего видения, то какой оптической силы очки позволят ему читать книгу на расстоянии 25 см?

(2 дптр)

2. Масляная плёнка на воде при наблюдении перпендикулярно к поверхности кажется оранжевой. Каково минимально возможное значение толщины плёнки? Показатель преломления воды 1,33, а масла — 1,47. Длина световой волны 588 нм. Учтите, что отражение света от оптически более плотной среды происходит с потерей полуволны, а оптически менее плотной среды — без потери полуволны. (100 нм)

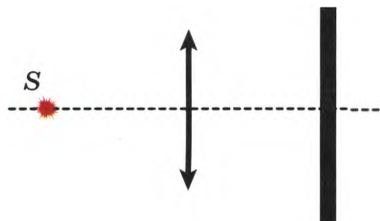


Рис. 135. Схематическое изображение к заданию 3

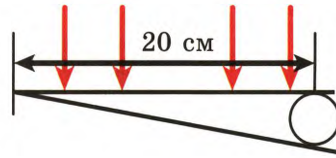
3. Свет от точечного источника проходит сквозь собирающую линзу с фокусным расстоянием 5 см и падает на плоское зеркало (рис. 135). Источник света расположен на главной оптической оси линзы. Расстояние от источника света до его действительного изображения 8,5 см, а от источника до линзы 7,5 см. Постройте действительное изображение источника в этой



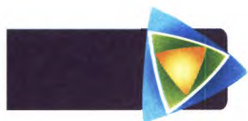
оптической системе. Определите, на каком расстоянии от линзы находится зеркало. **(8 см)**

4. В дно водоёма глубиной 4,93 м вертикально вбита свая. Угол падения солнечных лучей на поверхность воды равен  $30^\circ$ . Свая отбрасывает на дно тень длиной 3 м. Определите высоту выступающей из воды части сваи. Показатель преломления воды  $n = 4/3$ . **(1,75 м)**

5. Между краями двух хорошо отшлифованных тонких плоских стеклянных пластинок помещена тонкая проволочка, противоположные концы пластинок плотно прижаты друг к другу (рис. 136). Расстояние от проволочки до линии соприкосновения пластинок равно 20 см. На верхнюю пластинку нормально к её поверхности падает монохроматический пучок света с длиной волны 600 нм. Определите диаметр проволочки, если на 1 см длины клина уместится 10 интерференционных полос. **( $6 \cdot 10^{-6}$  м)**



**Рис. 136.** Схематичное изображение к заданию 5



## Глава IV. **Современные физические теории**

Физическая теория — это совокупность связей между величинами, характеризующими физический объект. Эти связи могут быть выражены аналитически (формулами), таблицами, графиками, словесными утверждениями, логически последовательными рассуждениями и т.д. Любая физическая теория строится на основе опытных фактов или постулатов. Физическая теория только тогда находит признание, когда позволяет решать практические задачи, предсказывать заранее результаты каких-либо действий над физическими величинами. В школьном курсе физики изучаются только основные положения разных физических теорий, выводы часто делаются без привлечения математического аппарата.

### § 20. Постулаты специальной теории относительности



1. В чём заключается принцип относительности Галилея?

1. Во всех инерциальных системах отсчёта любое механическое явление протекает одинаково.

2. Какую функцию в классической электродинамике выполнял эфир?

2. В электродинамике Максвелла эфир — среда, необходимая для распространения электромагнитных волн.



Если первоначально волновая теория рассматривала свет как упругие волны, распространяющиеся в мировом эфире, то после возникновения теории Максвелла на смену упругому эфиру пришёл другой эфир — носитель электромагнитных волн. Эфир заполняет всё мировое пространство и все тела. Среди учёных, однако, не было определённого мнения: движется ли эфир, заполняющий твёрдое тело, вместе с этим телом или эфир остаётся в покое, а твёрдое тело проникает сквозь него?





В 1881 г. американский физик **А. Майкельсон** осуществил знаменитый опыт, с помощью которого он рассчитывал обнаружить движение Земли относительно эфира (так называемый **эфирный ветер**). В 1887 г. он повторил свой опыт совместно с **Э. Морли** на более совершенной установке. Для опытов был использован интерферометр Майкельсона (рис. 137).

Пучок света, идущий от источника  $S$  по направлению движения Земли относительно эфира, попадает на полупрозрачную пластинку, которая покрыта тонким слоем серебра. Половина пучка  $OM_1$  отражается от пластинки под углом  $90^\circ$ . Пройдя расстояние  $L$ , эта часть пучка отражается от зеркала, снова попадает на пластинку, проходит через неё и попадает в зрительную трубу. Вторая половина первоначального пучка проходит через пластинку, пройдя такое же расстояние  $L$ , доходит до зеркала  $M_2$ , отражается от него, опять доходит до пластинки, отражается от неё и тоже попадает в зрительную трубу. Пучки 1 (синий) и 2 (красный) когерентны, поэтому в зрительную трубу видна интерференционная картина.

Если скорость света равна  $c$ , а скорость эфирного ветра —  $v$ , то скорость пучка 2 при движении к зеркалу должна быть равна, как считал Майкельсон,  $(c + v)$ , а при движении от зеркала —  $(c - v)$ . В то же время пучок 1 всегда направлен перпендикулярно эфирному ветру, и его скорость равна  $c$ . Время прохождения одинаковых путей лучами 1 и 2 должно получиться различным.

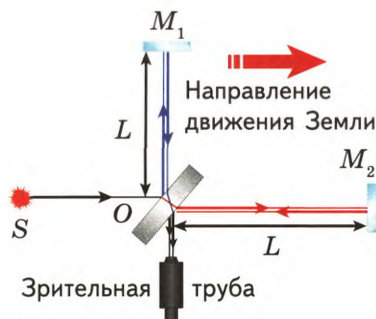
Если теперь повернуть прибор на  $90^\circ$ , разность хода волн должна изменить знак. По смещению интерференционных полос можно рассчитать скорость движения Земли относительно эфира.

Опыт продлевался многократно в различное время года и в различное время суток, но неизменно показывал один и тот же результат: интерференционные полосы не смещались. **Обнаружить эфирный ветер не удалось.**

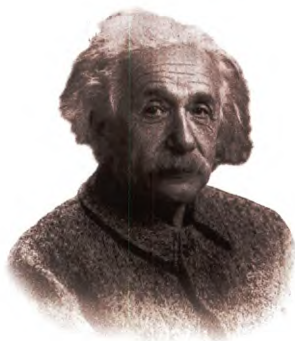
Было предпринято несколько попыток объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона, не отказываясь от гипотезы о мировом эфире, но все эти попытки оказались несостоятельными.



**А. Майкельсон**  
(1852—1931)



**Рис. 137.** Интерферометр Майкельсона



**А. Эйнштейн**  
(1879—1955)

Объяснить результаты опытов А. Майкельсона удалось только **А. Эйнштейну** в 1905 г. Но для этого ему пришлось кардинально изменить классические представления о пространстве и времени.

А. Эйнштейн пришёл к выводу, что мирового эфира как особой среды, которая могла бы служить абсолютной системой отсчёта, не существует. Механический принцип относительности Галилея он распространил на все без исключения физические явления.

**Согласно принципу относительности Эйнштейна, любое физическое явление во всех инерциальных системах отсчёта протекает одинаково.**

Далее А. Эйнштейн, опираясь на опытные факты, постулировал:

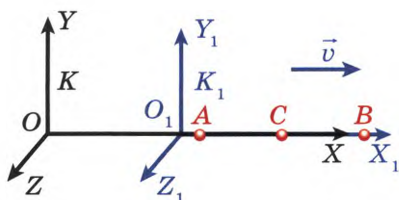
**Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта и не зависит ни от движения источников света, ни от движения приёмников света.**

Принцип относительности и принцип постоянства скорости света образуют основу специальной теории относительности (СТО), которая является теорией пространства и времени.

В классической механике пространство и время рассматриваются независимо друг от друга. Абсолютное пространство безотносительно к чему-либо, всегда остаётся одинаковым и неподвижным. Время тоже безотносительно к чему-либо, всегда течёт равномерно. Считалось очевидным, что два события, одновременные в одной системе отсчёта, будут одновременны и во всех остальных системах отсчёта.

Однако последнее утверждение находится в противоречии с принципом постоянства скорости света.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчёта: система  $K_1$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v$  (рис. 138). Пусть в системе  $K_1$  вдоль оси  $O_1X_1$  расположен отрезок  $AB$ , посередине которого находится точка  $C$  ( $AC = CB$ ). В точке  $C$  в какой-то момент времени происходит вспышка света.



**Рис. 138.** Относительность одновременности





Для наблюдателя, находящегося в системе отсчёта  $K_1$ , свет от вспышки доходит до точек  $A$  и  $B$  одновременно, так как свет проходит одинаковые отрезки пути  $CB$  и  $CA$ . Для наблюдателя, находящегося в системе отсчёта  $K$ , свет сначала доходит до точки  $A$ , потому что эта точка приближается к источнику света, а потом до точки  $B$ , которая удаляется от источника.

Сделаем пример более конкретным. Пусть система  $K$  связана с Землёй, система  $K_1$  — с поездом, который движется прямолинейно со скоростью  $v$ . Посередине одного из вагонов вспыхивает свет. Для пассажира этого вагона свет до передней и задней стенок вагона доходит одновременно, потому что распространяется на одинаковые расстояния. Для наблюдателя на Земле эти два события происходят не одновременно: свет сначала дойдёт до задней стенки вагона, которая движется навстречу свету, и лишь затем до передней стенки, которая «убегает» от света. Следовательно, одновременность событий, разделённых в пространстве, **понятие относительное**, зависящее от выбора системы отсчёта.

1. В чём отличие мирового эфира в механической картине мира и в электромагнитной картине мира?
2. Опишите опыт Майкельсона.
3. Как Эйнштейн объяснил результаты опыта Майкельсона?
4. Какие постулаты Эйнштейна легли в основу специальной теории относительности?
5. Чем отличается принцип относительности Эйнштейна от принципа относительности Галилея?
6. Докажите относительность одновременности событий.
7. Как вы понимаете фразы: «время абсолютно», «пространство однородно»?



## § 21. Некоторые следствия из постулатов Эйнштейна

1. Инерциальная система  $K_1$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $\vec{v}_1$ . В системе  $K_1$  движется тело со скоростью  $\vec{v}_2$ . Как найти скорость этого тела в системе  $K$ ?

1. Классический способ сложения скоростей:  $\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ .







2. Масса гири в неподвижном космическом корабле равна 5 кг. Изменится ли масса этой гири при движении корабля со скоростью, близкой к скорости света?

3. По часам на Земле прошёл 1 час. Можно ли с уверенностью сказать, что на космическом корабле, движущемся со скоростью, близкой к скорости света, тоже прошёл 1 час?

2. С точки зрения классической механики масса тела не зависит от скорости его движения, значит, масса гири не изменится.

3. С точки зрения механики Ньютона время везде течёт равномерно и одинаково. Если по часам наблюдателя на Земле прошёл 1 час, то и по часам космонавта тоже прошёл 1 час.



Из постулатов теории относительности вытекает ряд очень интересных следствий, которые мы перечислим без математического вывода.

### Относительность расстояний

Пусть в той системе отсчёта, в которой космический корабль покоится (система  $K$ ), его длина равна  $l_0$ . Тогда в той системе, в которой этот корабль движется со скоростью  $v$  (система  $K_1$ ), длина корабля  $l$  окажется меньше. Эту длину можно рассчитать по формуле

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

В этой формуле  $c$  — скорость света. Так как  $v < c$ ,  $l < l_0$ .

Все эффекты, наблюдаемые при скоростях движения, близких к скорости света, называют **релятивистскими** эффектами. Рассмотренный эффект называют релятивистским сокращением размеров тел.

### Относительность промежутков времени

Если интервал времени между двумя событиями в системе  $K$  равен  $\tau_0$ , то интервал времени между этими же событиями в системе  $K_1$ , которая движется относительно  $K$  со скоростью  $v$ , рассчитывается по формуле:

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

$\tau > \tau_0$  — в этом состоит релятивистский эффект замедления времени при движении со скоростью, близкой к скорости света. Этот эф-



факт многократно подтверждён фактом прохождения значительных расстояний короткоживущими частицами, прилетающими к нам из космоса. Благодаря большой скорости движения время жизни этих частиц возрастает во много раз.

### Релятивистский закон сложения скоростей

Классический закон сложения скоростей противоречит утверждению о постоянстве скорости света в вакууме. Если, например, один космический корабль движется со скоростью 0,5 с, а другой движется навстречу первому со скоростью 0,6 с, то, по представлениям классической механики, скорость второго корабля относительно первого равна 1,1 с.

Релятивистский закон сложения скоростей имеет вид:

$$v_{\text{отн}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}.$$

В рассмотренном выше примере:

$$v_{\text{отн}} = \frac{0,5 \text{ с} + 0,6 \text{ с}}{1 + \frac{0,3 \text{ с}^2}{c^2}} = \frac{1,1 \text{ с}}{1,3} = 0,85 \text{ с}.$$

Скорость света оказывается предельной как для любого материального тела, так и для передачи сигнала.

### Зависимость массы тела от скорости

В релятивистской механике при всех взаимодействиях сохраняется сумма импульсов взаимодействующих тел. Проекцию импульса на одну из координатных осей можно рассчитать по формуле:

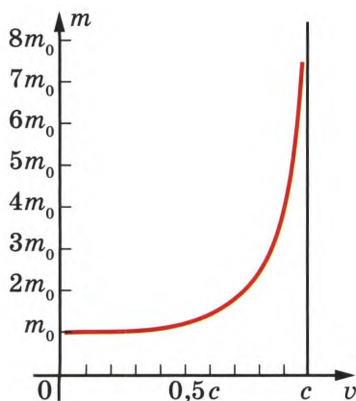
$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Релятивистский импульс можно рассматривать как величину, равную произведению релятивистской массы  $m$  и скорости его движения. Следовательно, релятивистская масса тела с увеличением скорости растёт по закону:

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

где  $m_0$  — масса покоя тела,  $v$  — скорость движения тела (рис. 139).

Возрастание массы с увеличением скорости приводит к тому, что ни одно тело, если его масса покоя не равна нулю, не может дви-



**Рис. 139.** Зависимость массы тела от скорости

гаться со скоростью, равной скорости света в вакууме, или со скоростью, превышающей скорость света.

### Взаимосвязь массы и энергии

Из экспериментально установленного факта зависимости массы тела от скорости его движения следует, что масса тела и его энергия взаимно связаны. При любых взаимодействиях изменение полной энергии тела  $\Delta E$  равно произведению изменения массы тела и квадрата скорости тела в вакууме.

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Это уравнение выражает один из основных законов природы — **закон взаимосвязи массы и энергии**. Эйнштейн высказал предположение, что любое тело, имеющее массу покоя  $m_0$ , обладает энергией  $E_0$  в соответствии с уравнением:

$$E_0 = m_0 c^2$$

Эта энергия называется **энергией покоя** тела. Если же тело движется, то его энергия, называемая **полной энергией**, складывается из энергии покоя и кинетической энергии и равна:  $E = mc^2$ .

Тогда кинетическая энергия тела равна:  $E_k = mc^2 - m_0 c^2$ .

На основе закона взаимосвязи массы и энергии ведутся расчёты выхода энергии в ядерных реакциях и различных ядерных энергетических установках.

### Принцип соответствия

Всякая новая теория, претендующая на более глубокое описание явлений, должна включать в себя старую теорию как предельный случай. В этом заключается **принцип соответствия**. Результаты новой физической теории в предельном случае должны совпадать с соответствующими результатами старой теории.

Классические представления о пространстве и времени можно рассматривать как частный случай релятивистских законов для скоростей движения, которые много меньше скорости света в вакууме.

Пусть скорость ракеты составляет одну сотую от скорости света (0,01 c). Тогда масса ракеты:





$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{0,0001c^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{0,9999}} = 1,00005m_0.$$

Даже при такой большой скорости — 3000 км/с увеличение массы составляет всего 0,005 %. При массе покоя 100 кг увеличение массы составит всего 5 г! Однако, если скорости элементарных частиц в современных ускорителях лишь на десятки метров в секунду меньше скорости света, массы этих частиц увеличиваются в тысячи раз.

Аналогичные расчёты можно привести для уменьшения длин движущихся отрезков, для замедления времени и других релятивистских эффектов. При скоростях движений, значительно меньших скорости света, релятивистскими эффектами можно пренебречь и пользоваться уравнениями классической механики, выступающей как частный случай специальной теории относительности.

1. Какие эффекты называют релятивистскими?
  2. Приведите примеры релятивистских эффектов.
  3. Какова зависимость длины тела от скорости в СТО?
  4. Как длительность события зависит от скорости в СТО?
  5. Как рассчитать релятивистскую массу тела?
  6. Что такое энергия покоя тела?
  7. Какова взаимосвязь массы тела и его энергии?
  8. Что утверждает принцип соответствия?
- 
- 9 (I). Электрон движется со скоростью 0,9 с. Чему равно отношение энергии электрона  $E$  к его энергии покоя  $E_0$ ? (2,3)
  - 10 (I). Два космических корабля движутся навстречу друг другу. Скорость каждого корабля в неподвижной системе отсчёта равна 0,8 с. Какова скорость первого корабля относительно второго? (0,98 с)
  - 11 (II). В верхних слоях атмосферы рождается нестабильная частица  $\mu$ -мезон. До распада  $\mu$ -мезон, движущийся со скоростью 0,98 с, успевает пролететь 600 м. Чему равно собственное время жизни частицы? (0,4 мкс)
  - 12 (II). На ракете, движущейся относительно Земли со скоростью  $v$ , происходят две световые вспышки с промежутком времени между ними  $\tau_0 = 48$  с относительно корабля. Наблюдатель на Земле зафиксировал, что промежуток времени между вспышками равен  $\tau = 80$  с. Чему равна скорость ракеты относительно Земли? ( $2,4 \cdot 10^8$  м/с)





- 13 (III). Мощность излучения Солнца  $3,8 \cdot 10^{23}$  кВт. Вычислите уменьшение массы Солнца за 1 с за счёт этого излучения.  
( $\sim 4,2 \cdot 10^9$  кг)

## § 22. Фотоэффект



1. В каких явлениях проявляются волновые свойства света?

1. Интерференция, дифракция, дисперсия, поляризация света.

2. Как называется явление испускания электронов раскалёнными металлами?

2. Термоэлектронная эмиссия.

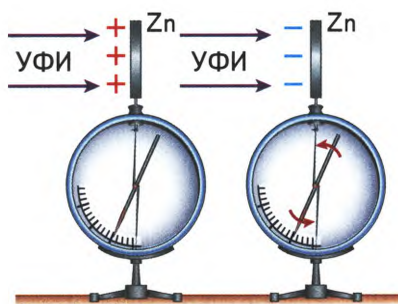


Рис. 140. Пластина теряет только отрицательный заряд

### Опытные факты

1. В 1887 г. немецкий физик Г. Герц обратил внимание на то, что искра между двумя электродами проскакивает при меньшем напряжении, если на катод падает ультрафиолетовое излучение (УФИ).

2. Если направить ультрафиолетовое излучение на цинковую пластину, установленную на электрометре и имеющую положительный заряд (рис. 140), заряд пластины не уменьшается. Если же это излучение направить на пластину, имеющую отрицательный заряд, то пластина быстро теряет этот заряд.

**Наша гипотеза:** ультрафиолетовое излучение вырывает с поверхности металла электроны.



В 1888—1890 гг. русский физик А.Г. Столетов исследовал описанное явление, названное **фотоэффектом**, и сформулировал первый закон фотоэффекта. После открытия электрона стало ясно, что ультрафиолетовое излучение вырывает с поверхности металла **электроны**.

Некоторые металлы, например щелочные, теряют отрицательный заряд даже под действием видимой части спектра электромагнитных излучений. Однако, как установил Столетов, разряжающее действие ультрафиолетового излучения значительно сильнее.





**Фотоэффект — это явление вырывания светом электронов с поверхности металла.**

Установка для изучения явления фотоэффекта представляет собой стеклянный баллон, в котором создан вакуум. В баллон впаяны два электрода: анод и катод, покрытый металлом с малой работой выхода электронов. На катод через специальное кварцевое стекло может подаваться ультрафиолетовое излучение (рис. 141).

Электрическая схема позволяет плавно изменять напряжение между анодом и катодом и измерять силу тока, образованного вырванными излучением электронами (фотоэлектронами), или, как говорят, **силу фототока**.

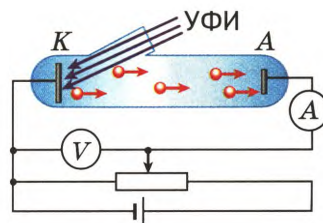
Если напряжение между анодом и катодом равно нулю (ползунок потенциометра в крайнем левом положении), ток по цепи уже проходит. Вырванные излучением электроны обладают кинетической энергией — это позволяет некоторой части фотоэлектронов дойти до анода.

При увеличении напряжения на электродах сила тока увеличивается — до анода доходит всё большая часть фотоэлектронов. Наконец, при некотором напряжении до анода доходят все фотоэлектроны (рис. 142) — фототок достигает **насыщения**. Дальнейшее увеличение напряжения между анодом и катодом больше не приводит к увеличению фототока.

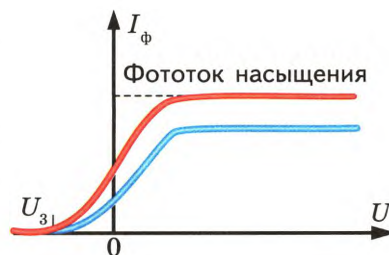
Чтобы сила фототока уменьшилась до нуля, надо включить источник тока так, чтобы его положительный полюс соединился с катодом, а отрицательный — с анодом (переменить полюсы источника) и плавно увеличивать напряжение до некоторого значения  $U_3$ . Зная значение запирающего напряжения  $U_3$ , можно рассчитать кинетическую энергию и начальную скорость самых быстрых фотоэлектронов.



**А.Г. Столетов  
(1839—1896)**



**Рис. 141.** Современная установка для исследования явления фотоэффекта



**Рис. 142.** Зависимость силы фототока от напряжения на электродах





В этом случае работа электрического поля будет равна начальной кинетической энергии фотоэлектронов:

$$eU_3 = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}.$$

Если при неизменной частоте падающего на катод излучения увеличить световой поток, то увеличится число вырываемых светом электронов (фотоэлектронов), увеличится значение фототока насыщения, но задерживающее напряжение, а значит, и начальная кинетическая энергия фотоэлектронов останутся прежними.

Теперь исследуем зависимость начальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты излучения (рис. 143). При малой частоте падающего на катод излучения фотоэффекта не происходит. Постепенно увеличивая частоту излучения, мы дойдём до такого её значения, при котором фотоэффект возникнет, электроны будут вырываться с поверхности катода, но их начальная скорость и кинетическая энергия будут равны нулю.

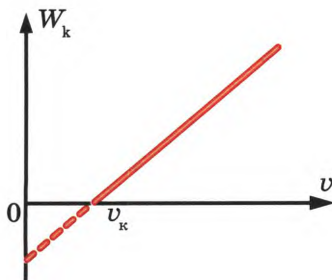
Минимальная частота (максимальная длина волны), при которой происходит фотоэффект, называется красной границей фотоэффекта  $\nu_k$ .

Красная граница фотоэффекта по частоте соответствует красной границе по длине волны:  $\nu_k = \frac{c}{\lambda_k}$ .

При дальнейшем увеличении частоты падающего на катод излучения приобретённая фотоэлектронами кинетическая энергия будет увеличиваться линейно.

Сформулируем установленные экспериментально законы фотоэффекта.

1. Количество электронов, вырываемых излучением с поверхности металла в единицу времени (фототок насыщения), прямо пропорционально интенсивности света, падающего на катод и не зависит от частоты падающего света.
2. Кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой падающего на катод излучения и не зависит от его интенсивности.



**Рис. 143.** Зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты излучения



**3. Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.**

Второй закон фотоэффекта, а также существование красной границы фотоэффекта невозможно объяснить, исходя из классических представлений о свете как электромагнитной волне, непрерывно распределённой в пространстве. Невозможно понять, почему лишь при малой длине волны свет вырывает электроны и почему кинетическая энергия фотоэлектронов зависит только от частоты света и не зависит от его интенсивности.

В 1900 г. для объяснения закономерностей излучения нагретого твёрдого тела немецкий физик **Макс Планк** высказал гипотезу, которая положила начало подлинной революции в теоретической физике. М. Планк предположил, что **свет излучается и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями**. Минимальная энергия, которую тело может излучить или поглотить, называется **квантом энергии**. Квант энергии пропорционален частоте колебаний:



**М. Планк**  
(1858—1947)

$$E_{\phi} = h\nu$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  в этом выражении носит название **постоянной Планка**.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Квант электромагнитного излучения можно рассматривать как частицу, называемую **фотоном**. Гипотеза Планка послужила основой для объяснения законов фотоэффекта, которое дал в 1905 г. **А. Эйнштейн**.

Поглощаемый поверхностью металла фотон передаёт свою энергию  $h\nu$  электрону. Если работа выхода электрона из металла меньше отданной фотоном энергии, то электрон, совершив работу выхода, обладает ещё и кинетической энергией:

$$E_{\phi} = A_{\text{вых}} + E_{\text{к}}$$

Полученное уравнение носит название **уравнения Эйнштейна для фотоэффекта**.





Энергия фотона расходуется на совершение электроном работы выхода и на сообщение фотоэлектрону кинетической энергии.

Если энергия фотона равна работе выхода, то фотоэффект возможен, но покинувший электрод электрон не обладает кинетической энергией.

Объяснение фотоэффекта имело большое значение для более глубокого понимания природы света. Но ценность этого явления состоит ещё и в его большом применении в самых различных областях техники. Работающие на основе фотоэффекта фотоэлементы позволили создать автоматические устройства, включающие и выключающие уличное освещение и маяки в нужные моменты времени.

С помощью фотоэлемента производятся воспроизведение звука с киноленты, передача изображений на большое расстояние, работают станки, которые без участия человека изготавливают детали по заданным чертежам, в экстремальных условиях защищают человека и предотвращают аварии.

Рассмотрим устройство фотоэлемента. В стеклянной колбе создаётся вакуум (рис. 144). В центре колбы помещается металлический анод. Внутренняя поверхность колбы покрывается металлом с малой работой выхода (цезием) — это покрытие служит катодом. При попадании на катод фотоэлемента света световые сигналы преобразуются в электрические. Фотоэлемент — составная часть многих автоматических устройств.



**Рис. 144.**  
Фотоэлемент



1. Какие новые понятия вы встретили в тексте? Что они означают?
2. Кем и когда обнаружен фотоэффект?
3. Что иллюстрирует рисунок 140?
4. Кто исследовал явление фотоэффекта?
5. Кто объяснил явление фотоэффекта?
6. Нарисуйте схему установки для исследования фотоэффекта.
7. При каком условии наблюдается фотоэффект?
8. Как сила фототока зависит от напряжения на электродах?
9. Почему в цепи существует фототок даже при отсутствии напряжения между анодом и катодом?
10. В каком случае фототок достигает насыщения?
11. Начертите график зависимости силы фототока от напряжения на электродах.





12. Как, зная запирающее напряжение, можно рассчитать кинетическую энергию и начальную скорость самых быстрых фотоэлектронов?
13. Что такое красная граница фотоэффекта?
14. Начертите график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего на катод излучения.
15. Сформулируйте законы фотоэффекта. Кто их установил?
16. В чём заключается гипотеза Планка?
17. Одинакова ли работа выхода у различных металлов?
18. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
19. Опишите устройство и принцип работы фотоэлемента. Где используют фотоэлементы?
20. Разбейте текст параграфа на смысловые части и составьте его план.
- 21 (I). Определите энергию фотонов, соответствующих наиболее длинным ( $\lambda = 0,75$  мкм) и наиболее коротким ( $\lambda = 0,4$  мкм) волнам видимой части спектра. ( $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $5 \cdot 10^{-19}$  Дж)
- 22 (I). К какому виду следует отнести лучи, энергия фотонов которых равна  $2 \cdot 10^{-17}$  Дж;  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $3 \cdot 10^{-23}$  Дж?  
(рентгеновские, видимые, радиоволны)
- 23 (I). Красная граница фотоэффекта для серебра равна 260 нм. Определите работу выхода в джоулях. ( $7,6 \cdot 10^{-19}$  Дж)
- 24 (II). В процессе фотоэффекта электроны, вырываемые с поверхности металла излучением частотой  $2 \cdot 10^{15}$  Гц, полностью задерживаются тормозящим полем при разности потенциалов 7 В, а при частоте  $4 \cdot 10^{15}$  Гц — при разности потенциалов 15 В. По этим данным вычислите постоянную Планка. ( $6,4 \cdot 10^{-34}$  Дж·с)
- 25 (III). Тренированный глаз, длительно находящийся в темноте, воспринимает свет с длиной волны 500 нм при мощности  $2,1 \cdot 10^{-17}$  Вт. Сколько фотонов попадает в этом случае на сетчатку за 1 с? (53)



### § 23. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм. Давление света

1. Что такое фотон?
2. Какую энергию имеет фотон?

1. Это квант электромагнитного излучения.
2.  $E_{\phi} = h\nu$ .





3. Какова связь между массой и энергией, установленная Эйнштейном?

$$3. E = mc^2.$$



Фотон можно рассматривать как частицу, обладающую массой и импульсом и существующую только в движении со скоростью  $c$ .

Масса покоя фотона равна нулю. Рассчитаем импульс фотона. Энергия фотона равна  $E = h\nu$ . Учитывая взаимосвязь массы и энергии  $E = mc^2$ , получим:

$$h\nu = mc^2 \Rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2};$$

$$p = mc \Rightarrow p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c}.$$

Массу и импульс фотона можно назвать его **корпускулярными** характеристиками, а частоту и длину волны — **волновыми** характеристиками. В тесной связи этих характеристик находит своё выражение **корпускулярно-волновой дуализм**, или двойственность свойств света. При распространении света ярче проявляются его волновые свойства, при поглощении и излучении — корпускулярные. **Свет обладает одновременно и свойствами непрерывных электромагнитных волн, и свойствами дискретных фотонов.**



Луи де Бройль  
(1892—1987)

В 1923 г. французский учёный Луи де Бройль высказал смелую гипотезу, что дуализм не является особенностью только оптических явлений. Он носит универсальный характер: волновыми свойствами обладают электроны, протоны, нейтроны и другие микрочастицы. Связь длины волны де Бройля с импульсом частицы оказалась такой же, как и у фотонов:

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

Это одна из основных формул в физике микромира.

Предсказанные де Бройлем волновые свойства частиц были впоследствии обнаружены экспериментально.





Картина распределения электронов, пролетевших через тончайшую металлическую фольгу, имеет поразительное сходство с полученной в аналогичных условиях рентгенограммой.

Обнаружение волновых свойств микрочастиц явилось свидетельством того, что классическая механика не способна правильно описать поведение этих частиц. Новая механика микромира, учитывающая, кроме всего прочего, и волновые свойства микрочастиц, получила название **квантовой механики**.

Ещё в 1604 г. немецкий астроном Иоганн Кеплер объяснял форму кометных хвостов (рис. 145) давлением солнечного света. В 1873 г. Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на все тела, которые препятствуют его распространению. Это давление очень мало, однако измерить его и подтвердить тем самым истинность теории Максвелла удалось в 1900 г. русскому учёному **П.Н. Лебедеву**.



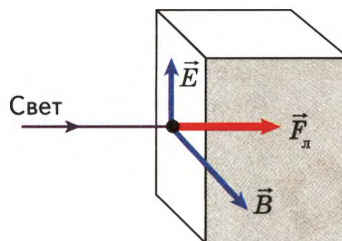
**П.Н. Лебедев**  
(1866—1912)



**Рис. 145.** Хвост кометы всегда направлен от Солнца

С точки зрения волновой теории электроны вещества под действием электрической составляющей электромагнитной волны должны приходить в движение. В магнитном поле на эти электроны должна действовать сила Лоренца, направление которой совпадает с направлением распространения волны (рис. 146).

Рассматривая свет как поток фотонов, каждый из которых обладает импульсом, можно заключить, что при поглощении фотона поверхностью тела этому телу передаётся



**Рис. 146.** Падение световой волны на поверхность





импульс  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Если свет отражается от поверхности тела, то фотон при взаимодействии с телом изменяет импульс на противоположный. Изменение импульса в этом случае  $\Delta p = \frac{2h}{\lambda}$ .

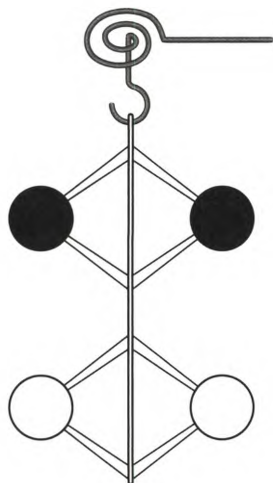


Рис. 147. Прибор Лебедева

Прибор Лебедева состоял из тонкого лёгкого стерженька на упругой нити, по краям стерженька прикреплены лёгкие крылышки. С одной стороны стерженька крылышки были чёрными, а с другой — зеркальными. Весь прибор заключался в стеклянный сосуд, из которого был выкачан воздух (рис. 147). На крылышки подавался свет, о давлении которого можно было судить по углу закручивания нити.

Трудности точного измерения давления света были связаны с тем, что полностью удалить из сосуда все молекулы газов, составляющих воздух, невозможно. Поверхность крылышек при освещении нагревается, создаются конвекционные потоки оставшегося в сосуде воздуха. Согласно уравнению Бернулли давление внутри потока зависит от скорости потока. Это приводит к появлению конвекционных сил, во много раз превосходящих силы светового давления.

Кроме того, передняя и задняя стороны крылышек нагреваются неодинаково. Сталкиваясь с крылышками, молекулы воздуха получают отдачу: молекулы отталкиваются от крылышек, а крылышки отталкиваются от молекул. Возникают так называемые радиационные силы. Лебедев сумел преодолеть все эти трудности и измерить давление света. Результаты, полученные Лебедевым, совпали с результатами, предсказанными теорией Максвелла.

Давление света при определённых условиях может оказаться достаточно большим. Так, благодаря этому явлению не происходит бесконечного сжатия звёзд гравитационными силами.



1. Дайте характеристику фотона.
2. В чём заключается корпускулярно-волновой дуализм света?
3. В чём состоит гипотеза Луи де Бройля?
4. Чему равна длина волны де Бройля?
5. Какой опыт доказывает истинность гипотезы де Бройля?



6. Электрон и протон движутся с одинаковыми скоростями. У какой из этих частиц большая длина волны де Бройля?
  7. Электрон и  $\alpha$ -частица имеют одинаковые длины волн де Бройля. Импульс какой частицы больше?
  8. Используя рисунок 146, объясните механизм оказания давления на препятствие электромагнитной волной.
  9. Опишите опыт П.Н. Лебедева по измерению давления света.
  10. Почему давление света на зеркальную поверхность в 2 раза больше давления на чёрную поверхность?
  11. С какими трудностями встретился Н.П. Лебедев при измерении давления света?
  12. Чем квантовая механика отличается от классической?
  13. Почему хвосты комет, пролетающих вблизи Солнца, направлены от Солнца?
  14. Разбейте текст параграфа на смысловые части и составьте его план.
  15. Используя Интернет и другие источники информации, подготовьте сообщение (презентацию) по одной из тем: «Открытие дифракции электронов на кристаллах», «Волны де Бройля и их физический смысл», «Опыты Н.П. Лебедева по обнаружению давления света», «В чём заключается соотношение неопределённостей Гейзенберга?».
- 
- 16 (I). Каким импульсом обладает фотон с частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц?  
( $1,1 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с)
  - 17 (I). Каков импульс фотона, энергия которого равна  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж?  
( $2 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с)
  - 18 (I). Чему равна длина волны де Бройля для частицы, обладающей импульсом  $100$  кг·м/с?  
( $6,6 \cdot 10^{-36}$  м)
  - 19 (III). Сколько фотонов испускает за 1 с лампочка мощностью  $100$  Вт? Длина волны излучения лампочки равна  $1200$  нм.  
( $6 \cdot 10^{20}$ )





## Структура и содержание главы «Современные физические теории»







## Задания для повторения главы IV

### Часть 1

1. В инерциальной системе отсчёта свет распространяется в вакууме со скоростью  $c$ . Самолёт летит над поверхностью Земли со скоростью  $v$  и зажигает сигнальные огни. С какой скоростью относительно Земли распространяется световой сигнал?

- 1)  $c + v$       2)  $c - v$       3)  $c$       4)  $\frac{c + v}{1 - \frac{cv}{c^2}}$

2. На металлическую пластинку падает свет, длина волны которого  $\lambda = 400$  нм. Красная граница фотоэффекта для металла пластинки  $\lambda_{кр} = 600$  нм. Чему равно отношение максимальной кинетической энергии фотоэлектронов к работе выхода для этого металла?

- 1)  $2/3$       2)  $2$       3)  $1/2$       4)  $3/2$

3. Энергия фотона в первом пучке света в 2 раза больше энергии фотона во втором пучке. Отношение частоты электромагнитных колебаний в первом пучке света к частоте во втором пучке равно

- 1)  $1$       2)  $2$       3)  $\sqrt{2}$       4)  $1/2$

4. Явление интерференции электронов можно объяснить, используя представление об электронах как о потоке частиц, обладающих

- 1) электрическим зарядом      3) малыми размерами  
2) малой массой      4) волновыми свойствами

5. Поток фотонов с энергией 15 эВ выбивает из металла фотоэлектроны, максимальная кинетическая энергия которых в 2 раза меньше работы выхода. Какова максимальная кинетическая энергия образовавшихся фотоэлектронов?

- 1) 30 эВ      2) 15 эВ      3) 10 эВ      4) 5 эВ

6. Поверхность металла освещают светом, длина волны которого меньше длины волны  $\lambda_k$ , соответствующей красной границе фотоэффекта для данного вещества. При увеличении интенсивности света

- 1) фотоэффект не будет происходить при любой интенсивности света  
2) будет увеличиваться количество фотоэлектронов  
3) будет увеличиваться максимальная энергия фотоэлектронов  
4) будет увеличиваться как максимальная энергия, так и количество фотоэлектронов

7. Длина волны красного света почти в 2 раза больше длины волны фиолетового света. Энергия фотона из пучка красного света по отношению к энергии фотона из пучка фиолетового света

- 1) больше в 4 раза      3) меньше в 4 раза  
2) больше в 2 раза      4) меньше в 2 раза



8. Металлическую пластину освещали монохроматическим светом одинаковой интенсивности: сначала красным, потом зелёным, затем синим. В каком случае максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов была наименьшей?

- 1) при освещении красным светом
- 2) при освещении зелёным светом
- 3) при освещении синим светом
- 4) во всех случаях одинаковой

9. Чему равна энергия фотона, соответствующего световой волне с частотой  $6,3 \cdot 10^{14}$  Гц?

- 1)  $10^{-27}$  Дж
- 2)  $1,35 \cdot 10^{23}$  Дж
- 3)  $3 \cdot 10^{-19}$  Дж
- 4)  $4,2 \cdot 10^{-19}$  Дж

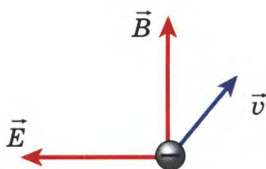
10. Согласно постулату теории относительности в инерциальных системах отсчёта при одинаковых начальных условиях одинаково протекают

- 1) только оптические явления
- 2) только электрические явления
- 3) только механические явления
- 4) любые физические явления

### Часть 2\*

1. Красная граница фотоэффекта для вещества катода соответствует частоте  $\nu_k = 6,6 \cdot 10^{14}$  Гц. При облучении катода светом с частотой  $\nu$  фототок прекращается при напряжении между анодом и катодом  $U = 1,4$  В. Определите  $\nu$ . ( $3,2 \cdot 10^{14}$  Гц)

2. Какие максимальные скорость и импульс получают электроны, вырванные из натрия излучением с длиной волны 66 нм, если работа выхода составляет  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж? ( $2,4 \cdot 10^6$  м/с;  $2,2 \cdot 10^{-24} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ )

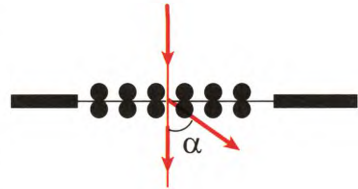


**Рис. 148.** Схематичное изображение к заданию 3

3. Электроны, вылетевшие с катода фотоэлемента под действием света горизонтально в северном направлении, попадают в электрическое и магнитное поля. Электрическое поле направлено горизонтально на запад, а магнитное — вертикально вверх (рис. 148). Какой должна быть работа выхода, чтобы в момент попадания самых быстрых электронов в область полей действующая на них сила была направлена на восток? Частота света  $6,2 \cdot 10^{14}$  Гц, напряжённость электрического поля  $3 \cdot 10^2$  В/м, индукция магнитного поля  $10^{-3}$  Тл. ( $A > 2,3$  эВ)



4. При исследовании структуры мономолекулярного слоя вещества пучок электронов, имеющих одинаковую скорость, направляется перпендикулярно исследуемому слою. В результате дифракции на молекулах, образовавших периодическую решётку, часть электронов отклоняется на определённые углы, образуя дифракционные максимумы (рис. 149). Какую энергию имеют падающие электроны, если первый дифракционный максимум соответствует отклонению электронов на угол  $\alpha = 50^\circ$  от первоначального направления, а период молекулярной решётки составляет 0,215 нм? (55 эВ)



**Рис. 149.** Схематичное изображение к заданию 4





## Глава V. Физика атома и атомного ядра

### § 24. Модели строения атома. Постулаты Бора



1. Какие явления указывают на сложное строение атома?

1. Электрический ток в различных средах, фотоэффект, естественная радиоактивность.

2. Какую силу называют силой Лоренца?

2. Сила, которая действует на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле.

3. Как устроен атом?

3. В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого движутся электроны.



В 1896 г. французский учёный **А. Беккерель** обнаружил, что атомы урана являются источником особого рода лучей, которые могут проникать сквозь непрозрачные предметы, а также засвечивать фотопластинку. Это явление было названо **естественной радиоактивностью**. На интенсивность радиоактивного излучения не влияли ни давление, ни температура, ни какие-либо другие физические факторы.



**А. Беккерель**  
(1852–1908)



**П. Кюри**  
(1859–1906)



**М. Кюри**  
(1867–1934)



**Э. Резерфорд**  
(1871–1937)



В 1898 г. супруги **П. Кюри** и **М. Кюри**, используя урановую руду, получили два новых радиоактивных элемента. Один из них назвали **радием**, а другой — **полонием**.

В 1899 г. английский физик **Э. Резерфорд** произвёл опыт по исследованию физической природы радиоактивного излучения. Он поместил радиоактивное вещество в свинцовый сосуд с узким выходом. На пути выходящего из сосуда излучения Резерфорд поставил фотопластинку. Всю установку Резерфорд поместил в сильное магнитное поле (рис. 150).

Если радиоактивное излучение представляет собой поток частиц с положительным зарядом, то на каждую частицу в магнитном поле будет действовать сила Лоренца, и весь пучок отклонится **влево**.

Если это поток частиц, имеющих отрицательный заряд, то сила Лоренца, действующая на каждую частицу, заставит отклониться все частицы **вправо**.

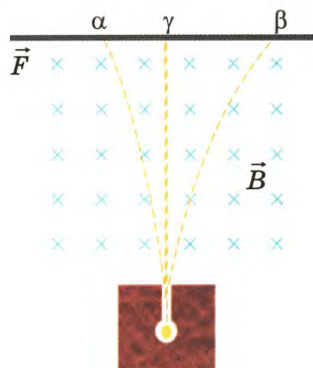
Если это поток частиц, не имеющих заряда, или это не поток частиц, а электромагнитное излучение, то в этом случае сила Лоренца действовать не будет, и излучение **не должно отклоняться** ни вправо, ни влево.

Результат опыта оказался неожиданным: радиоактивное излучение разделилось на три части, которые назвали первыми тремя буквами греческого алфавита:  **$\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениями**.

Более поздние исследования показали, что  $\alpha$ -излучение — это поток частиц, имеющих положительный заряд, равный двум элементарным зарядам. Масса  $\alpha$ -частицы равна примерно массе четырёх атомов водорода. Проникающая способность этого излучения очень мала — оно полностью задерживается листом бумаги толщиной 0,1 мм.

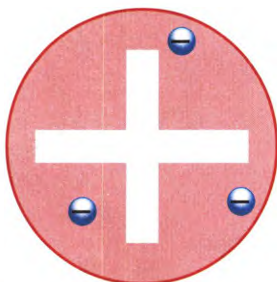
$\beta$ -частицы — это электроны, имеющие очень большую скорость. Эти частицы сильно отклоняются в электрическом и магнитном полях. Проникающая способность  $\beta$ -излучения больше, чем  $\alpha$ -излучения: оно полностью задерживается цинковой пластинкой толщиной в несколько миллиметров.

$\gamma$ -излучение — это электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны ( $10^{-11}$ — $10^{-13}$  м). Это излучение не отклоняется ни электрическим, ни магнитным полем. Проникающая способность  $\gamma$ -излучения очень велика: слой свинца толщиной в 1 см уменьшает интенсивность  $\gamma$ -лучей лишь в 2 раза.



**Рис. 150.**  
 $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения





— электрон

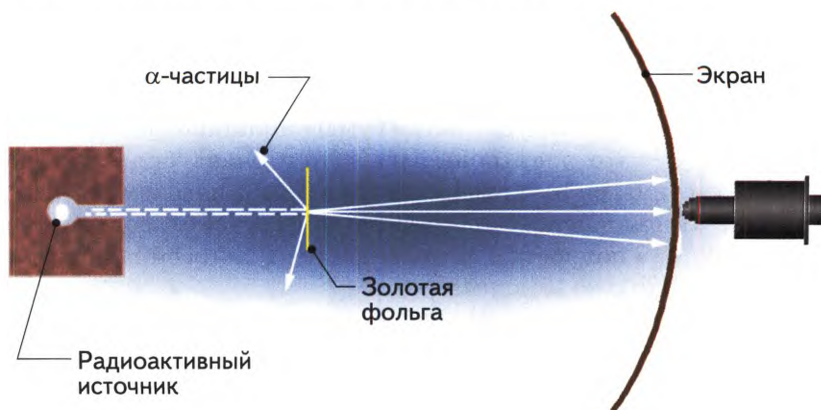
**Рис. 151.** Модель атома Томсона

После открытия явления радиоактивности остро встал вопрос о строении атома. Необходимо было построить такую модель атома, которая позволяла бы объяснить все опытные факты: термоэлектронную эмиссию, фотоэффект, естественную радиоактивность, излучение и поглощение энергии атомом и т.д. Одной из моделей, которая длительное время удовлетворяла физиков, является модель атома Томсона. Атом, согласно этой модели, это сплошное образование, имеющее пространственный положительный заряд. Электроны вкраплены в атом как изюмины в кекс (рис. 151). Электроны совершают колебательные движения. В начале века почти все физики приняли модель Томсона.

Но 7 марта 1911 г. Манчестерское философское общество услышало доклад Э. Резерфорда «Рассеяние альфа-частиц и строение атома». Э. Резерфорд провёл серию опытов, целью которых было уточнение модели строения атома. Узкий пучок  $\alpha$ -частиц направлялся на очень тонкую золотую фольгу (около 400 нм). Если модель атома Томсона верна, то ни одна  $\alpha$ -частица через фольгу не пролетит — на её пути окажется не менее тысячи тяжёлых атомов золота.

Если частица всё-таки пролетит, то, попав на люминесцирующий экран, она даст вспышку — сцинтилляцию. Эту вспышку можно будет увидеть в микроскоп (рис. 152).

Многочисленные опыты дали следующие результаты.



**Рис. 152.** Опыт Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц золотой фольгой





Большинство  $\alpha$ -частиц пролетало через фольгу, не меняя направления ( $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $2^\circ$ ).

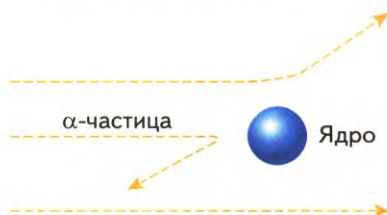
Лишь некоторые частицы, пролетая сквозь фольгу, отклонялись на небольшой угол ( $\varphi < 90^\circ$ ).

Были и такие частицы, которые оказались отброшенными на угол  $\varphi > 90^\circ$ .

Полученные результаты позволили построить модель атома, которую сегодня называют **моделью атома Резерфорда** или ядерной моделью атома. Согласно этой модели атом имеет следующее строение:

- В центре атома находится массивное ядро, имеющее положительный заряд (лёгкие электроны не могут изменить направление движения сравнительно тяжёлых и очень быстрых  $\alpha$ -частиц). Атомные ядра расположены на сравнительно больших расстояниях друг от друга, поэтому лишь некоторые  $\alpha$ -частицы испытывают значительные отклонения.
- Вокруг ядра по круговым орбитам движутся электроны, число которых равно заряду ядра, выраженному в элементарных зарядах  $e$ , и равно порядковому номеру элемента в Периодической системе **Д.И. Менделеева**.
- Порядок размера ядра составляет  $10^{-15}$  м, а порядок размера атома —  $10^{-10}$  м, то есть ядро в 100 000 раз меньше самого атома.

Отклонения от прямолинейной траектории испытывали те  $\alpha$ -частицы, которые пролетали в непосредственной близости от одного из ядер золота или испытывали «лобовое» соударение (рис. 153). Это происходило крайне редко из-за очень малых размеров ядра по сравнению с размерами атома.



**Рис. 153.** Взаимодействия  $\alpha$ -частиц с ядром атома золота

Однако ядерная модель строения атома не укладывалась в рамки законов классической физики. Электрон, обращаясь вокруг ядра (двигаясь ускоренно), должен излучать электромагнитные волны. Теряя энергию, электрон должен довольно быстро упасть на ядро. При этом атом перестанет существовать.

Между тем и то и другое противоречит опыту.



**Н. Бор**  
(1885—1962)

Выход из создавшегося затруднительного положения предложил датский учёный **Нильс Бор**. В 1913 г. он создал теорию строения атома водорода, в основу которой положил два постулата.

**1. Электроны движутся вокруг ядра только по стационарным орбитам. При этом атом не излучает энергию и не поглощает её.**

Постулат никогда не отвечает на вопрос «почему?». Если построенная на некоторых постулатах теория не может объяснить новые опытные факты, то постулаты, а следовательно, и теорию надо пересмотреть.

По теории Бора, ближайшая к ядру орбита ( $n = 1$ ) соответствует **основному** стационарному состоянию атома. Более удалённые от ядра стационарные орбиты ( $n = 2, 3, 4...$ ) соответствуют **возбуждённому** состоянию атома, т.е. состоянию с более высокой энергией. В основном состоянии атом имеет минимальный запас энергии и может находиться сколько угодно долго. Время жизни электрона в возбуждённом состоянии составляет  $10^{-8}$  с. За это время электрон успевает совершить около 100 млн оборотов вокруг ядра. Затем электрон скачком переходит на нижнюю орбиту, излучая фотон с энергией  $h\nu$ , соответствующей разности энергий между энергетическими уровнями.

Различные возможные стационарные состояния атома определяются соотношением:  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$ , где  $m$  — масса электрона,  $v$  — скорость электрона,  $r$  — радиус круговой орбиты,  $n$  — целое число (номер стационарной орбиты),  $h$  — постоянная Планка. Таким образом, первый постулат Бора является **условием квантования орбит**.

**2. Поглощение атомом фотона с энергией  $h\nu$  сопровождается переходом электрона на одну из более удалённых от ядра стационарных орбит. Излучение атомом фотона сопровождается переходом электрона с более удалённой от ядра стационарной орбиты на менее удалённую:**

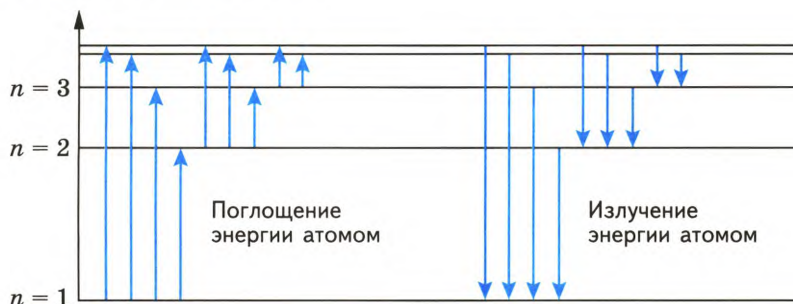
$$h\nu = E_2 - E_1$$

Таким образом, частота излучения зависит не от скорости движения электрона по орбите, а от разности энергии атома при нахождении электрона на различных стационарных орбитах.





Схемы поглощения и излучения энергии атомом показаны на рисунке 154. Горизонтальные линии соответствуют уровням энергии атома при движении электрона по различным стационарным орбитах. Ниже всех располагается уровень, соответствующий энергии  $E$  основного состояния атома.



**Рис. 154.** Поглощение и излучение энергии атомом

Вертикальные линии соответствуют квантам поглощаемой энергии (стрелки направлены снизу вверх) и квантам излучаемой энергии (стрелки направлены сверху вниз). При этом соблюдается важное правило: самопроизвольный переход электрона на более высокий энергетический уровень невозможен.

Постулаты Бора позволили объяснить явление люминесценции, определить радиус атома водорода ( $0,53 \cdot 10^{-10}$  м — боровский радиус) и энергии стационарных состояний атома. Это дало возможность вычислить частоты излучаемых атомом электромагнитных волн и объяснить линейчатые спектры испускания и поглощения атома водорода, найти скорость электрона при его движении вокруг ядра в атоме водорода ( $2,3 \cdot 10^6$  м/с).

**Недостатком теории Бора** явилось совмещение классической механики и электродинамики с квантовыми представлениями.

В физике назрела необходимость создания квантовой механики и электродинамики. Бор так и не смог построить теорию атома гелия и других элементов. Как выяснилось впоследствии, движение электронов в атоме имеет очень мало общего с движением планет по орбитам.

1. В чём заключается явление естественной радиоактивности?
2. Как был установлен сложный состав радиоактивного излучения?
3. Сравните  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения: заполните таблицу 7, перечертив её в тетрадь. Для выполнения задания воспользуйтесь дополнительными источниками информации.







Таблица 7

Параметр сравнения	$\alpha$ -излучение	$\beta$ -излучение	$\gamma$ -излучение
Кем и когда открыто			
Что собой представляет			
Скорость распространения			
Как ведёт себя излучение при прохождении в магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции			
Ионизирующая способность			
Проникающая способность			

- Опишите опыт Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц.
- Опишите модель атома Резерфорда.
- Почему модель атома Резерфорда называют ещё ядерной или планетарной?
- Почему ядерная модель строения атома не укладывалась в рамки законов классической физики?
- Как Н. Бор решил проблемы модели атома Резерфорда?
- Что позволила объяснить и вычислить теория Бора? Какие недостатки она имела?
- Что происходит с электроном при поглощении атомом кванта энергии?
- В каком случае атом излучает энергию?
- В каком случае излучаемая атомом энергия больше: при переходе электрона с третьей стационарной орбиты на вторую или при переходе со второй стационарной орбиты на первую?



13. По каким формулам можно вычислить частоту и длину волны фотона, излучаемого при переходе атома из возбуждённого состояния с энергией  $E_1$  в основное с энергией  $E_0$ ?
14. Разделите текст параграфа на смысловые части и составьте его план.
15. \*Используя Интернет и другие источники информации, подготовьте сообщение по теме «Квантовая теория атома водорода, объяснение спектров излучения и поглощения атома водорода. Недостатки теории Бора».
- 16 (I). Найдите изменение энергии атома водорода при испускании им волн частотой  $4,57 \cdot 10^{14}$  Гц. ( $\sim 3 \cdot 10^{-19}$  Дж)
- 17 (I). На сколько уменьшилась энергия атома при излучении им фотона с длиной волны  $6,62 \cdot 10^{-7}$  м? ( $\sim 3 \cdot 10^{-19}$  Дж)



## § 25. Спектры и спектральный анализ

- |   |  |
|---|--|
| <p>1. Что такое спектр?</p> <p>2. Что такое дисперсия света?</p> <p>3. Что является причиной дисперсии света?</p> | <p>1. Окрашенная полоска, возникающая при прохождении белого света через трёхгранную призму, с постепенным переходом цветов от красного к фиолетовому.</p> <p>2. Явление разложения белого света в спектр при прохождении через трёхгранную призму.</p> <p>3. Зависимость показателя преломления света от длины волны.</p> |
|---|--|



Спектр, полученный Ньютоном в результате преломления солнечного света при его прохождении через трёхгранную призму (§ 15), называется **сплошным** или **непрерывным**. Сплошной спектр даёт свет, источником которого являются раскалённые твёрдые тела или жидкости. Для наблюдения спектров служит прибор, называемый **спектроскопом**.



Простейший спектроскоп состоит из трёх частей: **объектива**, **трёхгранной призмы** и **окуляра**. Объектив преобразует расходящийся от узкой щели пучок белого света в параллельный пучок. Трёх-



гранная призма (рис. 155) преломляет свет, из неё выходят цветные пучки. Линза окуляра фокусирует прошедшие через призму параллельные цветные пучки и даёт на экране множество частично перекрывающихся друг друга цветных изображений щели — **спектр**.



Рис. 155. Устройство спектроסקоп

Если вместо экрана поместить фотопластинку, то можно фотографировать спектр, тогда прибор будет называться **спектрографом**.

Нагретый до высокой температуры разреженный газ даёт **линейчатый спектр излучения**. Он представляет собой ряд цветных полос на тёмном фоне. На рисунке 156 показан линейчатый спектр излучения атома водорода.



Рис. 156. Линейчатый спектр излучения атома водорода

Тщательные исследования спектров излучения различных разреженных газов (то есть спектров излучения атомов) показали, что каждому газу присущ вполне определённый линейчатый спектр.

Спектральные линии можно разделить по группам (сериям). Линии, принадлежащие одной серии, связаны определённой закономерностью. Так, в видимой части спектра водорода швейцарский физик **И.Я. Бальмер** обнаружил серию линий, частоты которых можно выразить эмпирической формулой:

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

где  $n = 3, 4, 5, \dots$ ;  $R$  — постоянная Ридберга.  $R = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ .





Рассчитанные по данной формуле частоты и длины волн указаны в таблице 8.

Таблица 8

$n$	$\nu \cdot 10^{14}$ Гц	$\lambda$ , нм	Цвет	Энергия фотона, эВ
3	4,6	656	Красная	1,88
4	6,2	486	Голубая	2,54
5	6,9	434	Синяя	2,84
6	7,3	410	Фиолетовая	3,0

Первая линия имеет ярко-красный цвет. В формуле Бальмера ей соответствует  $n = 3$ . Это означает, что фотон испускается при переходе электрона с третьего энергетического уровня на второй. Вторая линия — голубая ( $n = 4$ ): электрон перешёл с четвёртого энергетического уровня на второй. Третья линия — синяя ( $n = 5$ ), четвёртая — фиолетовая ( $n = 6$ ).

На рисунке 157 схематически изображены уровни энергии водородного атома и указаны соответствующие им значения энергии в электрон-вольтах ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Энергия взаимодействия электрона с ядром на большом расстоянии считается равной нулю. При приближении электрона к ядру энергия уменьшается, так как электрон и ядро имеют электрические заряды противоположного знака. Расчёты показывают, что энергия основного состояния равна  $-13,55 \text{ эВ}$ .

В спектре водорода имеется ещё несколько серий: одна — в ультрафиолетовой части спектра (серия Лаймана) и несколько — в инфракрасной.

Третий вид спектров — спектры **поглощения**. Спектр поглощения возникает при прохождении света от раскалённого твёрдого или жидкого источника через холодный (неизлучающий) газ.

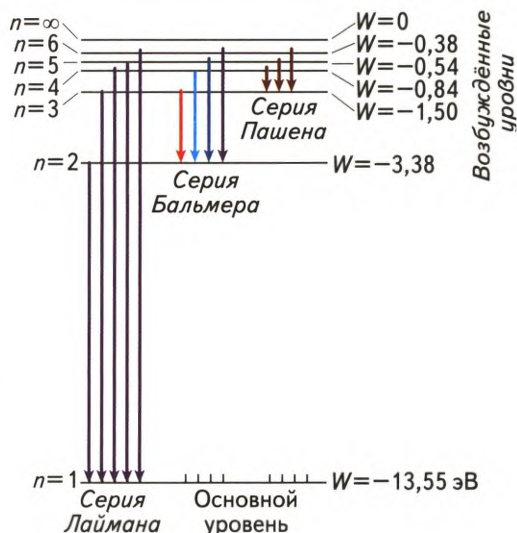
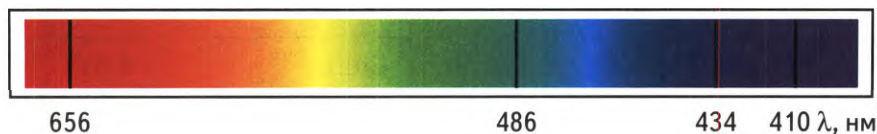


Рис. 157. Уровни энергии атома водорода



Он представляет собой ряд чёрных линий на фоне сплошного спектра. Каждый газ имеет свой характерный спектр, причём тёмные линии в спектре поглощения газа в точности соответствуют цветным линиям в спектре излучения этого газа. Это означает, что из всего набора длин волн проходящих через газ фотонов поглощаются и возбуждают при этом атомы только те фотоны, которые потом, при переходах атомов в основное состояние, будут излучаться.

Спектр поглощения атома водорода показан на рисунке 158.



**Рис. 158.** Спектр поглощения атома водорода

Линейчатые спектры позволяют определить химический состав излучающего (или поглощающего) вещества.

**Определение химического состава вещества по его линейчатому спектру называется спектральным анализом.**

Спектральный анализ по сравнению с химическим анализом имеет ряд преимуществ.

- Достаточно очень небольшого количества вещества (несколько сот атомов), чтобы обнаружить его присутствие.
- Вещество при спектральном анализе не вступает в химические реакции, поэтому может быть использовано многократно.
- Спектральный анализ позволяет определять химический состав небесных тел. Так, гелий сначала был обнаружен на Солнце, только потом, через 26 лет, на Земле.

Постулаты Бора позволяют объяснить ещё одно интересное явление — люминесценцию.

**Люминесценцией называют свечение тела под действием падающего на него электромагнитного излучения большей частоты или под действием другого источника возбуждения атомов этого тела.**

Атомы вещества переходят в возбуждённое состояние за счёт энергии, передаваемой им посторонним источником. Таким источ-





ником может оказаться излучение с большей частотой (ультрафиолетовое, рентгеновское). В атомах, поглотивших фотон с большой энергией, происходит переход электронов на более высокий энергетический уровень. При возвращении в основное состояние атом излучает два-три фотона с меньшей энергией, один из которых может соответствовать видимому излучению.

Возбуждение атомов может производиться также электрическим полем (электролюминесценция), бомбардировкой электронами вещества (катодолюминесценция), при протекании химических реакций (хемилюминесценция).

1. Как устроен спектроскоп? Чем он отличается от спектрографа?
2. Что представляет собой сплошной (непрерывный) спектр? Что необходимо для его наблюдения?
3. Что представляет собой линейчатый спектр излучения? Какие тела дают такой спектр?
4. Что представляет собой линейчатый спектр поглощения? Какие условия необходимы для образования такого спектра?
5. Каков цвет линий в видимой части спектра излучения атома водорода?
6. Можно ли рассчитать энергию фотонов, излучаемых атомом водорода в видимой части спектра, по рисунку 158?
7. Объясните появление чёрных линий в спектре поглощения.
8. Что такое спектральный анализ?
9. В чём состоят преимущества спектрального анализа перед химическим анализом?
10. Что такое люминесценция?
11. Используя Интернет и другие источники информации, подготовьте сообщение (презентацию) по одной из тем: «Открытие спектрального анализа», «Использование спектрального анализа в астрономии. Спектр Солнца», «Люминесценция и её использование».
- 12 (I). Воспользовавшись рисунком 157, рассчитайте длину волны, излучаемой атомом водорода, при переходе электрона с третьего энергетического уровня на второй.
- 13 (I). Рассчитайте частоту излучения атома водорода при переходе электрона с четвёртого энергетического уровня на второй.







## § 26. Методы наблюдения и регистрации частиц



1. Что такое люминесценция?

1. Свечение тел под действием падающего на них излучения или под действием другого источника возбуждения атомов.

2. Что представляет собой перегретая жидкость?

2. Неустойчивое состояние жидкости при температуре выше температуры кипения этой жидкости.

3. Что представляет собой перенасыщенный пар?

3. Неустойчивое состояние пара, плотность которого выше плотности насыщенного пара при данной температуре.

4. Как обнаруживались  $\alpha$ -частицы в опытах Резерфорда по рассеянию этих частиц?

4. С помощью люминесцирующего экрана, на котором при падении этих частиц появлялись вспышки-сцинтилляции.



Почти все устройства для наблюдения и регистрации частиц основаны на способности этих частиц либо возбуждать, либо ионизировать атомы. Такие устройства представляют собой макроскопическую систему, которая находится в неустойчивом состоянии. Действия, производимые заряженной частицей, переводят эту систему в новое, устойчивое состояние.

### Метод сцинтилляций

Этот метод был использован Резерфордом в опытах по рассеянию  $\alpha$ -частиц золотой фольгой. Попадая на люминесцирующий экран, заряженная частица вызывает его кратковременное свечение — **сцинтилляцию**. В опытах Резерфорда сцинтилляции наблюдались в микроскоп. В настоящее время используются сцинтилляционные счётчики, в которых вспышка на экране по световоду передаётся на фотоумножитель, который позволяет получать усиление сигнала в миллионы раз. Сцинтилляционные счётчики регистрируют почти 100% попавших в них заряженных частиц.



### Счётчик Гейгера

Этот прибор представляет собой металлическую или стеклянную трубку, покрытую изнутри металлическим слоем. Металлический слой служит катодом. Внутри трубки протянута металлическая нить (анод), проходящая по оси трубки (рис. 159).

Трубку заполняют инертным газом, обычно аргоном. Заряженная частица, пролетая в газе, отрывает от атомов аргона электроны. Сильное электрическое поле ускоряет образовавшиеся при ионизации электроны и положительные ионы до энергий, достаточных для ионизации новых атомов аргона. Возникает лавина электронов и ионов, в результате чего ток через счётчик резко возрастает. При этом увеличивается падение напряжения на резисторе  $R$ , сигнал с которого усиливается и подаётся на громкоговоритель или электромагнитный счётчик. Увеличение напряжения на резисторе  $R$  ведёт к автоматическому уменьшению напряжения между анодом и катодом: лавинный разряд прекращается, счётчик готов к регистрации новой заряженной частицы. Это явление называется ударной ионизацией.

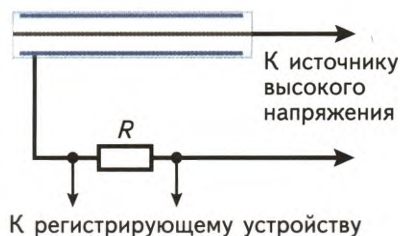


Рис. 159. Счётчик Гейгера

### Камера Вильсона

Камера Вильсона была создана в 1912 г. Она представляет собой герметически закрытый цилиндр с поршнем (рис. 160). Цилиндр заполнен парами спирта, воды или эфира, близкими к насыщению.

При резком опускании поршня пар адиабатически охлаждается и становится перенасыщенным. Это неустойчивое состояние вещества: любая пылинка или ион вещества могут стать центрами конденсации пара.

Если в этот момент в камеру проникает заряженная частица, то при своём движении она создаёт цепочку ионов. Эти ионы становятся центрами конденсации пара: вокруг них образуются мельчайшие капельки сконденсированной жидкости. В результате траектория частицы — **трек** — становится видимой.

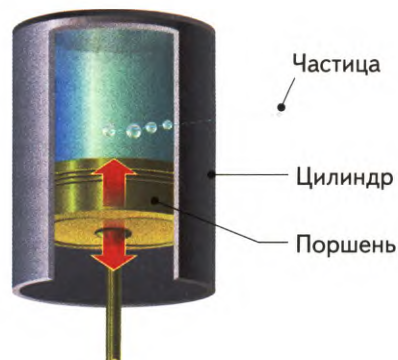


Рис. 160. Камера Вильсона





Российские физики **П.Л. Капица** и **Д.В. Скобельцын** предложили помещать камеру Вильсона в магнитное поле. Тогда под действием силы Лоренца траектория частицы будет искривляться. По направлению силы Лоренца можно определить знак электрического заряда частицы, а по радиусу кривизны траектории частицы можно определить её удельный заряд, равный отношению заряда частицы к её массе.

### Пузырьковая камера

Отличие этой камеры от камеры Вильсона состоит в том, что рабочим веществом в ней является не перенасыщенный пар, а находящаяся под большим давлением жидкость (жидкий водород или жидкий пропан). При понижении давления жидкость переходит в состояние, которое называют **перегретой жидкостью**.

Частица с большой энергией образует при движении в этой жидкости цепочку ионов, которые являются центрами вскипания жидкости. Появляется трек, состоящий из пузырьков пара.

Так как плотность жидкости много больше плотности пара, треки частиц в пузырьковой камере оказываются короткими: частица застревает в камере. Это позволяет наблюдать последовательные превращения частиц и вызываемые ими реакции.

### Метод толстослойных фотоэмульсий

Действие заряженных частиц на фотопластинку позволило **А. Беккерелю** в 1896 г. открыть явление естественной радиоактивности. Быстрые заряженные частицы, пронизывая кристаллы бромистого серебра, отрывают электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. После проявления фотопластинки цепочка зёрен серебра образует трек частицы. По длине и толщине трека можно определить энергию и массу частицы.

Этот метод предназначен для изучения частиц с высокими энергиями.

Мы рассмотрели далеко не все методы и не все приборы, служащие для обнаружения и регистрации заряженных частиц. Особенно сложны современные приборы для обнаружения маложивущих и очень редких частиц.



1. Какие действия, производимые заряженными частицами, используются в устройствах для наблюдения и регистрации этих частиц?
2. Перечертите таблицу 9 в тетрадь и заполните её.





Таблица 9

Название прибора, метода	Назначение	Принцип действия
Метод сцинтилляций		
Счётчик Гейгера		
Камера Вильсона		
Пузырьковая камера		
Метод толстослойных эмульсий		

3. Чем отличается пузырьковая камера от камеры Вильсона? В чём её преимущество?
4. Какое физическое явление лежит в основе метода сцинтилляций?

## § 27. Состав ядра атома

1. Имеет ли ядро атома электрический заряд?

2. Как взаимодействуют частицы, имеющие одноимённые заряды?

3. Что такое ядерная реакция?

1. Ядро атома имеет положительный электрический заряд.

2. Эти частицы отталкиваются. Силу их взаимодействия можно рассчитать по закону Кулона.

3. Ядерная реакция — это взаимодействие частицы или атомного ядра с другим атомным ядром, приводящее к превращению этого ядра в новое ядро.



В 1919 г. **Э. Резерфорд** впервые осуществил ядерную реакцию. Он бомбардировал  $\alpha$ -частицами ядра атомов азота. Для регистрации частиц, получившихся в результате реакции, он использовал камеру Вильсона.





**Д. Чедвик**  
(1891—1974)

Анализируя треки в камере Вильсона, Резерфорд пришёл к выводу, что эти треки оставлены новыми, неизвестными ранее частицами. Их масса оказалась близкой к массе атома водорода, а электрический заряд равен элементарному заряду, но со знаком «плюс».

Эти частицы были названы **протонами** ( $p$ ). Масса протона равна  $1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг или 1 а.е.м. (атомная единица массы).

В 1932 г. ученик Резерфорда **Д. Чедвик**, бомбардируя  $\alpha$ -частицами ядра атомов бериллия, обнаружил частицы, обладающие очень большой проникающей способностью. Причиной такого свойства вновь открытых частиц является отсутствие у этих частиц электрического заряда. Эти частицы назвали **нейтронами** ( $n$ ). Масса нейтрона близка к массе протона.

Нейтроны не улавливаются камерой Вильсона, поэтому для их обнаружения потребовалась парафиновая пластинка (рис. 161). Парафин содержит много атомов водорода, которые выбиваются нейтронами и затем улавливаются камерой Вильсона.



**Рис. 161.** Схема открытия нейтрона



**Д.Д. Иваненко**  
(1904—1994)

Сразу после открытия нейтрона в 1932 г. русский физик **Д.Д. Иваненко** и немецкий физик **В. Гейзенберг** предложили протонно-нейтронную модель ядра атома. В этой модели предполагается, что ядра всех элементов состоят из **нуклонов**: протонов и нейтронов.

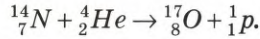
Число нуклонов  $A$  (суммарное количество протонов и нейтронов), входящих в состав ядра, называется **массовым числом ядра**.

Число протонов в ядре определяет его заряд, который равен  $+Ze$ . Число  $Z$  определяет порядковый номер химического элемента в Периодической системе Менделеева и называется **зарядовым числом ядра**.

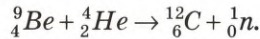


Число нейтронов в ядре равно  $N = A - Z$ .

Для обозначения ядер применяется символ  ${}^A_ZX$ , где  $X$  — химический символ элемента. Массу одного протона и массу одного нейтрона обычно округляют до 1 а.е.м. Тогда ядерная реакция, при которой был открыт протон, запишется следующим образом:



Реакция, при которой был открыт нейтрон:



Приведённые примеры показывают, что в результате ядерных реакций образуются новые химические элементы (в наших примерах кислород и углерод).



**В. Гейзенберг**  
(1901—1976)

**При ядерных реакциях и радиоактивных распадах выполняются законы сохранения зарядового и массового чисел, т.е. сумма зарядовых и массовых чисел частиц после реакции равна сумме этих чисел до реакции.**

В рассмотренных реакциях сумма массовых чисел (18 в первой реакции и 13 во второй) и сумма зарядовых чисел (соответственно 9 и 6) остаются неизменными.

Между протонами в атомном ядре действуют кулоновские силы отталкивания, но, несмотря на это, ядра большинства элементов являются устойчивыми образованиями. Ядро не разрушается под действием кулоновских сил, потому что одновременно с этими силами между частицами, входящими в состав ядра, действуют силы особого рода — **ядерные силы**. Перечислим некоторые особенности ядерных сил:

- они очень велики: в сотни раз превышают силы электромагнитного взаимодействия; поэтому взаимодействие нуклонов в ядре получило название **сильного взаимодействия**;
- ядерное взаимодействие носит характер притяжения; оно удерживает нуклоны на расстояниях примерно  $10^{-15}$  м;
- ядерные силы являются чрезвычайно **короткодействующими**; при расстояниях между нуклонами примерно  $2 \cdot 10^{-15}$  м их действие уже не обнаруживается;
- действие ядерных сил не зависит от того, имеет нуклон электрический заряд или не имеет; взаимодействие двух протонов





посредством ядерных сил не отличается от взаимодействия двух нейтронов и от взаимодействия протона с нейтроном;

- по современным представлениям, сильное взаимодействие обусловлено тем, что нуклоны постоянно обмениваются частицами, получившими название мезонов ( $\pi$ -мезоны, или пионы).



1. Когда и как был открыт протон?
2. Когда и как был открыт нейтрон?
3. Каков состав ядра атома?
4. Используя справочник, найдите и занесите основные сведения о протоне и нейтроне в таблицу 10, перечертив её в тетрадь.

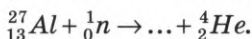
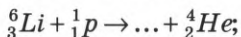
Таблица 10

Название частицы	Обозначение	Заряд, Кл	Масса, кг	Масса, а.е.м.	Кто и когда открыл
Протон					
Нейтрон					

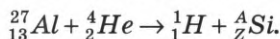
5. Какие величины, характеризующие ядро, сохраняются при ядерных реакциях?
6. Назовите химический элемент, в ядре атома которого содержатся:
  - а)  $7p + 7n$ ; б)  $51p + 71n$ ; в)  $101p + 155n$ .
7. Определите состав ядер элементов: свинца  $^{206}\text{Pb}$  и урана  $^{238}\text{U}$ .



- 8 (I). Допишите ядерные реакции:



- 9 (I). Ядро  $^{226}_{91}\text{Ra}$  претерпело  $\alpha$ -распад. Какой химический элемент при этом образовался?
- 10 (I). Ядро  $^{226}_{91}\text{Ra}$  испытывает  $\beta$ -распад. Какой химический элемент при этом образуется?
- 11 (I). Произошла следующая ядерная реакция:



Определите зарядовое ( $Z$ ) и массовое ( $A$ ) числа ядра кремния.



- 12 (III). Определите плотность ядерного вещества в атоме железа. Во сколько раз плотность ядерного вещества больше плотности железа? Средний объем, занимаемый одним нуклоном,  $\approx 2 \cdot 10^{-38} \text{ см}^3$ .  
( $\approx 10^{11} \text{ кг/м}^3$ ; в  $10^{13}$  раз)

## § 28. Радиоактивность

1. Назовите составные части радиоактивного излучения.

2. Какую реакцию называют радиоактивным распадом?

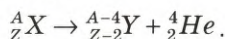
3. Как изменяются заряд и масса ядра при  $\alpha$ -распаде?

4. Как изменяются заряд и масса ядра при  $\beta$ -распаде?

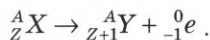
1.  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение.

2. Радиоактивный распад — это самопроизвольное испускание атомным ядром одной или нескольких  $\alpha$ - и (или)  $\beta$ -частиц, приводящее к превращению этого ядра в новое ядро.

3. Заряд ядра уменьшается на 2 единицы, а масса уменьшается на 4 единицы:



4. Заряд ядра увеличивается на единицу, а массовое число не изменяется:



Открытая Беккерелем радиоактивность называется **естественной** радиоактивностью. Рассмотрим несколько подробнее составные части радиоактивного излучения.

**Альфа-распад.** Это явление состоит в том, что ядра некоторых радиоактивных элементов самопроизвольно испускают  $\alpha$ -частицы.

Распад протекает по следующей схеме: буквой  $X$  обозначен химический символ распадающегося (материнского) ядра, буквой  $Y$  — химический символ образующегося (дочернего) ядра. Атомный номер дочернего ядра на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы меньше, чем у исходного вещества.





Альфа-распаду подвержены только тяжёлые ядра. Скорости, с которыми  $\alpha$ -частицы (то есть ядра атома гелия) вылетают из материнского ядра, очень велики, порядка  $10^7$  м/с. Кинетическая энергия составляет несколько МэВ. Пролетая через вещество,  $\alpha$ -частица постепенно теряет свою энергию, затрачивая её на ионизацию молекул вещества, и в конце концов останавливается.

Альфа-распад обычно сопровождается возникновением  $\gamma$ -лучей.

Ядро, как и атом, может находиться в состоянии с наименьшей энергией и в возбуждённом состоянии. Возникающее в результате  $\alpha$ -распада дочернее ядро часто оказывается возбуждённым. За время, равное примерно  $10^{-9}$  с, ядро переходит в основное состояние, испуская  $\gamma$ -квант.  $\left({}_Z^AX\right)^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$ . Здесь  $\left({}_Z^AX\right)^*$  — возбуждённое ядро.

Испускание  $\gamma$ -кванта не сопровождается распадом атома.  $\gamma$ -квант излучается не атомом, а ядром. Гамма( $\gamma$ )-излучением может сопровождаться и  $\beta$ -распад.

**Бета-распад** состоит в том, что ядра некоторых элементов самопроизвольно испускают электроны и одновременно нейтральную частицу с очень малой массой — **электронное антинейтрино**  $\bar{\nu}_e$ . (волнистой линией сверху символа обозначают античастицу). Массовое число дочернего ядра равно массовому числу материнского ядра, а заряд дочернего ядра больше на единицу. Как ядро может испускать электрон, если электронов в ядре нет? В определённых условиях в ядре происходит распад нейтрона на протон и электрон, появившийся электрон вылетает из ядра:  ${}_1^0n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}_e$ .

Этот процесс наблюдается только в ядрах с большим числом нейтронов. Следует обратить внимание, что электрон и антинейтрино не входят в состав ядра атома, а рождаются в процессе  $\beta$ -распада, подобно тому, как фотон не входит в состав атома, а возникает при переходе электрона из квантового состояния с большей энергией в квантовое состояние с меньшей энергией.

Интересна история открытия электронного антинейтрино.

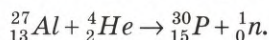
Если рассчитать энергию, которую уносит при  $\beta$ -распаде электрон, энергию материнского и энергию дочернего ядра, то создается впечатление, что нарушается закон сохранения энергии. В 1931 г. австрийский физик **В. Паули** высказал предположение, что в процессе  $\beta$ -распада возникает ещё какая-то частица, которая и уносит часть энергии распада. На основе этой гипотезы итальянский физик **Э. Ферми** разработал теорию  $\beta$ -распада. Частицу, появляющуюся вместе с электроном и предсказанную Паули, стали называть электронным антинейтрино. Антинейтрино не имеет заряда, поэтому обладает высочайшей проникающей способностью.





В настоящее время существование этой частицы доказано экспериментально.

В 1923 г. **Фредерик и Ирен Жолио-Кюри**, облучая нерадиоактивные вещества  $\alpha$ -частицами, обнаружили, что некоторые из них после облучения становятся радиоактивными. Радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях, получила название **искусственной радиоактивности**. Например, при бомбардировке  $\alpha$ -частицами ядер алюминия образуется радиоактивный фосфор:



Экспериментальные исследования показали, что на явление радиоактивности не оказывают влияние никакие внешние воздействия: нагревание, давление, агрегатное состояние, электрические и магнитные поля и т.д.

Скорость распада ядер подчиняется закону, который называется **законом радиоактивного распада** и выражается следующей математической формулой:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

В этой формуле  $N_0$  — число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за начальный,  $N$  — число радиоактивных ядер в момент времени  $t$ ,  $T$  — период полураспада.

**Период полураспада — это время, в течение которого распадается половина первоначально имеющихся радиоактивных ядер.**

Период полураспада  $T$  для одного и того же радиоактивного элемента не зависит от внешних факторов и является постоянной величиной. Он может составлять доли секунды и сотни тысяч и миллиарды лет. Периоды полураспада некоторых радиоактивных элементов указаны в таблице 11.

Таблица 11

Элемент	$T$	Элемент	$T$
Уран ${}_{92}^{235}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет	Торий ${}_{90}^{234}\text{Th}$	21,4 дня
Радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$	1622 года	Радон ${}_{86}^{222}\text{Rn}$	3,8 дня
Полоний ${}_{84}^{214}\text{Po}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$ с	Висмут ${}_{83}^{210}\text{Bi}$	4,97 дня



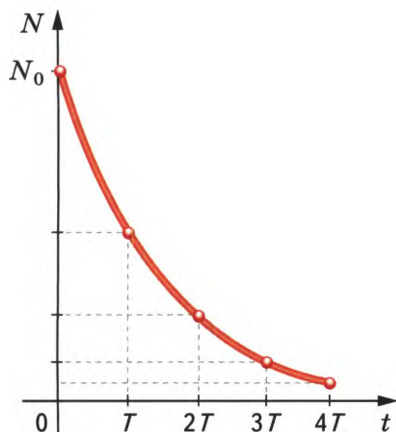
\* Для вывода закона радиоактивного распада воспользуемся следующими рассуждениями.

За время  $t = T$  распалось  $1/2 N_0$  ядер, осталось  $N = 1/2 N_0$  ядер.

По прошествии времени  $t = 2T$  осталось  $N = 1/4 N_0$  или  $\frac{1}{2^2} N_0$  ядер.

По прошествии времени  $t = 3T$  осталось  $1/8 N_0$  ядер, или  $\frac{1}{2^3} N_0$  ядер.

Следовательно, по прошествии времени  $\frac{t}{T}$  останется  $\frac{1}{2^{t/T}} N_0$  ядер или  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ , что и требовалось доказать.



**Рис. 162.** График зависимости числа нераспавшихся ядер от времени

На рисунке 162 показан график зависимости числа нераспавшихся ядер радиоактивного вещества от времени.

Закон радиоактивного распада является статистическим законом. Он выполняется тем точнее, чем больше начальное число радиоактивных ядер  $N_0$ . Если начальное число ядер невелико, например несколько десятков, то ничего определённого о числе ядер, которые распадутся за время, равное периоду полураспада, сказать нельзя.

Радиоактивное излучение может представлять опасность для здоровья живых организмов. Альфа-частицы,  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -лучи, проникая в живую клетку, производят ионизацию молекул и атомов. Это нарушает жизнедеятельность клеток живой ткани и отрицательно сказывается на здоровье человека и других живых организмов. Характер отрицательного воздействия

радиации на человека зависит от поглощённой его телом энергии и от массы его тела.

**Энергия излучения, поглощённая тканями организма и рассчитанная на единицу массы, называется поглощённой дозой излучения  $D$ .**

В СИ единицей поглощённой дозы излучения является 1 грэй (1 Гр). Поглощённая доза излучения равна 1 Гр, если вещество массой 1 кг поглотило энергию излучения 1 Дж.

Естественный фон окружающей среды составляет за год дозу облучения примерно 0,002 Гр.



При облучении мягких тканей живых организмов рентгеновским или  $\gamma$ -излучением поглощённую дозу измеряют в рентгенах (Р).  $1 \text{ Р} \approx 0,01 \text{ Гр}$ . Ниже в таблице 12 указаны ориентировочные значения поглощённой дозы излучения и последствия этой дозы для человека.

Таблица 12

Доза облучения, Гр	Последствия облучения
До 0,25	Каких-либо последствий в состоянии здоровья человека не обнаруживается
0,5—1	Незначительные обратимые процессы. Изменение состава крови
1—2,5	Лёгкая форма лучевой болезни. Возможна потеря трудоспособности
2,5—4	Лучевая болезнь средней тяжести. Нетрудоспособность. Возможен смертельный исход
4—6	Тяжёлая форма лучевой болезни. Смертность 50%
6—10	Смертельная доза

Лучевая болезнь проявляется как малокровие, язвы, выпадение волос, тяжёлые поражения глаз, горла и т.д. Возникают различные длительные заболевания, приводящие к истощению организма, сильно снижается сопротивляемость инфекционным заболеваниям.

Предельной годовой поглощённой дозой рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, не причиняющей заметного вреда человеческому организму, является доза 0,05 Гр.

Действие радиации приводит к раннему старению и сокращению продолжительности жизни людей. Особенно опасно повреждение при облучении клеток, несущих генетическую информацию. Это вызывает мутацию и приводит к тяжёлым наследственным аномалиям в последующих поколениях.

Следует учесть также, что при одинаковой поглощённой дозе излучения разные виды излучения вызывают разные биологические эффекты. Так, биологический эффект от поглощения некоторой дозы  $\alpha$ -излучения почти в 20 раз больше, чем эффект от такой же дозы  $\gamma$ -излучения. Различна также чувствительность разных частей





тела человека к воздействию радиоактивного излучения. Наиболее чувствительными к облучению являются костный мозг, селезёнка, лимфатические железы, слизистая оболочка кишечника.

При работе с любыми источниками радиации необходимо предусмотреть радиационную защиту для всех людей от лиц, непосредственно работающих с источниками радиации, до населения, живущего вблизи этих источников. Основные методы защиты: удаление от источника радиации, сокращение времени пребывания в зоне радиации и использование экранирования — преград из материалов, поглощающих излучение.



1. Сравните виды радиоактивного распада: заполните таблицу 13, перечертив её в тетрадь.

Таблица 13

Вид распада	$\alpha$ -распад	$\beta$ -распад
Особенности распада		
Правило смещения при распаде		
Примеры		

2. Как возникает  $\gamma$ -квант?
3. Чем искусственная радиоактивность отличается от естественной?
4. Что такое период полураспада?
5. Почему закон радиоактивного распада применим только для большого числа радиоактивных ядер?
6. Период полураспада ядер составляет 45 суток. Что это значит?
7. Что называется поглощённой дозой излучения?
8. Какие последствия возможны при поглощённой дозе излучения 100 рентген?
9. Назовите основные методы радиационной защиты.
10. Разделите текст параграфа на смысловые части и составьте его план.
11. Используя Интернет и другие источники информации, ответьте на вопросы.
  - а) Что такое естественный радиационный фон?
  - б) Какие источники ионизирующего излучения формируют естественный радиационный фон?
  - в) Надо ли бояться естественного радиационного фона?



- г) Как можно снизить воздействие естественного радиационного излучения на организм?
- д) В каком случае применяется йодная профилактика?
- е) Какую роль играет атмосфера и магнитосфера Земли в защите всего живого от воздействия солнечной радиации?
- ж) Как решается проблема радиационной защиты космонавтов во время их пребывания в космосе?
- 12 (I). Период полураспада радия 1600 лет. Через какое время число атомов радия уменьшится в 4 раза? **(3200 лет)**
- 13 (I). Какая доля радиоактивных ядер некоторого элемента распадается за время, равное двум периодам полураспада? **(75%)**
- 14 (I). Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найти период полураспада. **(4 дня)**
- 15 (II). Определите период полураспада радона, если за сутки из одного миллиона ядер распадается 175 000. **(3,3 · 10<sup>5</sup> с)**



## § 29. Радиоактивные изотопы. Энергия связи атомных ядер

1. Какие радиоактивные элементы вам известны?

1. Уран, радий, полоний, радон, калий и др.

2. Чему равна масса ядра атома кислорода?

2. По Периодической системе Менделеева она равна 16 а.е.м.

3. Какова, согласно теории относительности, связь между массой и энергией?

3. Полученное А. Эйнштейном соотношение:  $E = mc^2$ .



В ядерной реакции, приведённой в § 27, было получено ядро атома кислорода с массовым числом 17, тогда как в Периодической системе Менделеева указана масса 16.

Существуют элементы, которые ничем не отличаются по своим химическим свойствам, но имеют разные массы ядер и отличаются по своей радиоактивности. Такие элементы носят название **изотопов**.



**Изотопы — атомы одного и того же элемента, но с разными количествами нейтронов в ядре.**





Так,  $^{17}\text{O}$  — один из изотопов кислорода.

В настоящее время обнаружено существование изотопов у всех химических элементов. Изотопы могут быть как радиоактивными, так и нерадиоактивными — стабильными. В естественном состоянии каждое вещество является смесью изотопов в различных пропорциях. Так, водород имеет три изотопа: **протий** — изотоп с массовым числом 1, **дейтерий** — изотоп с массовым числом 2, **три-тий** — изотоп с массовым числом 3.

Дейтерий стабилен и при соединении с кислородом образует **тяжёлую воду**, физические свойства которой отличаются от свойств обычной воды. Так, тяжёлая вода при нормальном атмосферном давлении кипит ( $101,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и замерзает ( $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) при более высокой температуре. Плотность тяжёлой воды равна  $1100\text{ кг/м}^3$ , из-за чего она и называется тяжёлой. Тритий — это  $\beta$ -радиоактивный изотоп с периодом полураспада около 12 лет.

Атомные массы изотопов всегда близки к целым числам, а атомные массы химических элементов в некоторых случаях сильно отличаются от целых чисел. Например, относительная атомная масса ртути равна 200,59, хлора — 35,453. Это говорит о том, что в естественных условиях любое вещество представляет собой смесь изотопов.

Радиоактивные изотопы нашли широчайшее применение в науке и технике. **Метод меченых атомов** даёт возможность исследования процессов кровообращения, эффективности фосфорных удобрений, процесса износа поршневых колец и т.д. В сельском хозяйстве используется воздействие радиоактивного излучения на семена растений с целью повышения урожайности, для выведения новых сортов.

Радиоактивный изотоп углерода применяется для определения возраста древних предметов органического происхождения. В медицине радиоактивные изотопы используются как для постановки диагноза, так и для терапевтических целей. Гамма ( $\gamma$ )-излучение кобальта используется для лечения раковых заболеваний.

Ядра большинства элементов являются очень прочными образованиями. Чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, надо совершить определённую работу.

**Энергия, равная работе, которую надо совершить при полном расщеплении ядра на составляющие его нуклоны, называется энергией связи атомного ядра.**

Как рассчитать энергию связи ядра атома? Масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих это ядро протонов и нейтронов.





Если из суммы масс составляющих ядро протонов и нейтронов вычесть массу ядра, то получится величина, которую называют **дефектом масс**:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

Чтобы рассчитать энергию связи ядра, надо использовать полученное А. Эйнштейном соотношение между массой и энергией. Энергия связи пропорциональна дефекту масс:

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta mc^2.$$

Чем меньше масса ядра при одном и том же числе нуклонов, тем больше энергия связи, тем прочнее атомное ядро. В таблице 14 приведена энергия покоя нуклонов и энергия покоя ядер некоторых изотопов в МэВ, что позволяет рассчитать энергию связи этих изотопов.

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Таблица 14

Ядро		Энергия, МэВ	Ядро		Энергия, МэВ
Нейтрон	${}_0^1n$	939,6	Бериллий	${}_4^8\text{Be}$	7455,3
Протон	${}_0^1p$	938,3	Бериллий	${}_4^9\text{Be}$	8392,8
Дейтерий	${}_1^2\text{H}$	1875,6	Бор	${}_5^{10}\text{B}$	9324,4
Тритий	${}_1^3\text{H}$	2809,4	Азот	${}_7^{14}\text{N}$	13 040,3
Гелий	${}_2^4\text{He}$	3727,4	Кислород	${}_8^{15}\text{O}$	13 971,3
Литий	${}_3^6\text{Li}$	5601,5	Кислород	${}_8^{17}\text{O}$	15 830,6
Литий	${}_3^7\text{Li}$	6533,8	Фосфор	${}_{15}^{30}\text{P}$	27 917,1

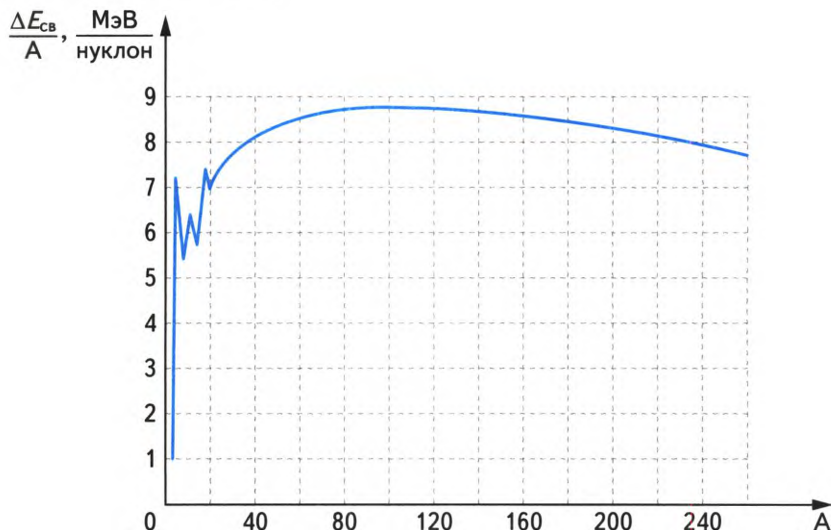
Энергия связи атомного ядра тяжёлого элемента, например урана-238, всегда больше энергии связи ядра атома более лёгкого элемента, например железа-55. Ведь, отщепляя по одному нуклону от начального числа 238, мы в конце концов дойдём до массового чис-



ла 55, но на этом работа по расщеплению ядра ещё не заканчивается. Важно знать, какая энергия связи атомного ядра приходится на одну ядерную частицу — протон или нейтрон.

**Энергия связи ядра атома, приходящаяся на один нуклон, называется удельной энергией связи.**

Зависимость удельной энергии связи от массового числа ядра показана на рисунке 163.



**Рис. 163.** Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Для самых лёгких ядер удельная энергия связи минимальна. Так, на один нуклон ядра дейтерия приходится энергия связи 1,1 МэВ/нуклон. Самое большое значение — около 9 МэВ — она принимает для ядер с массовым числом 50—90. Самая большая удельная энергия связи у нуклона изотопа железа  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ , она равна 8,8 МэВ/нуклон. Затем она плавно понижается до значения, равного примерно 8 МэВ на нуклон (7,6 МэВ/нуклон — изотоп урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ).

Удельная энергия связи лёгких ядер меньше, потому что ядерные силы используются не полностью. При малых размерах ядра каждая дополнительная частица (протон или нейтрон) притягивает к себе все остальные и одновременно сама притягивается этими частицами — ядро становится более прочным.

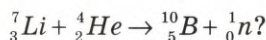


Значительное увеличение массы, а значит, и размеров ядра также приводит к уменьшению удельной энергии связи. Причиной является короткодействующий характер ядерных сил, а также взаимодействие протонов в ядре посредством электростатических сил.

1. Какие вещества называют изотопами?
2. Перечислите изотопы водорода. Что такое тяжёлая вода?
3. Где используются радиоактивные изотопы?
4. Что называется энергией связи атомных ядер?
5. Что такое дефект масс?
6. Как рассчитать энергию связи?
7. Что такое удельная энергия связи?
8. Используя рисунок 163, расскажите о зависимости удельной энергии связи атомных ядер от массового числа.
9. Почему удельная энергия связи лёгких ядер и самых тяжёлых ядер меньше, чем удельная энергия связи химических элементов из середины Периодической системы Менделеева?
10. Как изменяется полная энергия системы из нескольких свободных покоящихся протонов и нейтронов в результате соединения их в атомное ядро?



- 11 (I). Поглощается или выделяется энергия при следующей реакции:



- 12 (I). Вычислите энергию связи ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ . ( $\approx 28$  МэВ)
- 13 (I). Найдите удельную энергию связи в ядрах лития  ${}^6_3\text{Li}$  и азота  ${}^{14}_7\text{N}$ . ( $\approx 5,3$  МэВ;  $7,5$  МэВ)
- 14 (I). Энергия покоя протона — 938,3 МэВ, нейтрона — 939,6 МэВ, ядра кислорода (O) — 15 830,6 МэВ. Чему равна энергия связи ядра кислорода  ${}^{17}_8\text{O}$ ?
- 15 (II). Определите дефект массы изотопа лития (Li). Масса протона равна  $1,672 \cdot 10^{-27}$  кг, нейтрона —  $1,675 \cdot 10^{-27}$  кг, масса ядра изотопа лития —  $11,654 \cdot 10^{-27}$  кг.
- 16 (II). Массы протона, нейтрона и ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  равны соответственно 1,007825 а.е.м., 1,008665 а.е.м. и 2,013553 а.е.м. Какова энергия связи нуклонов в ядре дейтерия? Ответ выразите в МэВ и округлите до целых. 1 а.е.м. соответствует 931 МэВ. (3 МэВ)
- 17 (II). Какая минимальная энергия требуется для расщепления ядра азота  ${}^{14}_7\text{N}$  на протоны и нейтроны? (105 МэВ)





## § 30. Ядерная энергия



1. Какие фундаментальные взаимодействия, существующие в природе, вам известны?

2. В чём особенности ядерных сил?

3. Какие ядра атомов обладают самой большой удельной энергией связи?

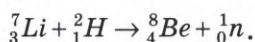
1. Гравитационные, электромагнитные и сильные взаимодействия.

2. Они значительно превышают электромагнитные силы, но действуют на очень малых расстояниях между нуклонами.

3. Ядра с массовым числом 50—80.



Рассмотрим один из примеров ядерной реакции:



Выделяется или поглощается энергия при этой реакции? Если выделяется, то каков энергетический выход этой реакции? Найдём суммарную энергию изотопов лития и дейтерия (до реакции) и суммарную энергию продуктов реакции (табл. 15).

Таблица 15

Энергия связи до реакции, МэВ	Энергия связи после реакции, МэВ
6533,8 + 1875,6	7455,3 + 939,6
8409,4	8394,9
Выделяется	8409,4 – 8394,9 = 14,5 МэВ

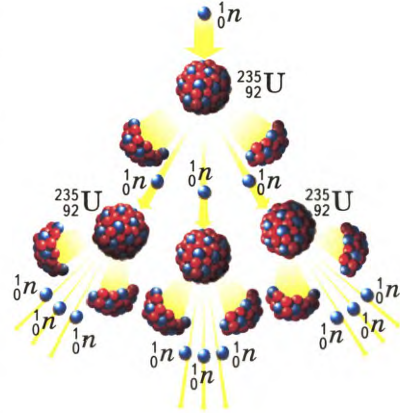
Так как суммарная энергия частиц до реакции больше суммарной энергии продуктов реакции, делаем вывод: в процессе данной реакции энергия **выделяется**, энергетический выход данной реакции составляет 14,5 МэВ.

Поскольку максимальной удельной энергией связи обладают элементы середины Периодической системы Менделеева, возможны два принципиально различных способа получения ядерной энергии: **деление тяжёлых ядер и синтез лёгких ядер**.



Первый способ осуществляется в процессе **цепной ядерной реакции**. Ядро изотопа урана-235 или плутония-239 при захвате нейтрона становится неустойчивым и разывается на два примерно равных радиоактивных осколка. Эта ядерная реакция идёт с выделением энергии.

Самое замечательное в этой реакции то, что, кроме двух осколков, выделяются два или три новых нейтрона, каждый из которых может вызвать самопроизвольное деление другого ядра урана. Количество делящихся ядер и количество нейтронов, способных вызвать деление новых ядер, нарастает лавинообразно (рис. 164). Такая реакция протекает при взрыве атомной бомбы.



**Рис. 164.** Цепная ядерная реакция

Рассчитаем энергию, которая освобождается при делении только одного ядра урана. Удельная энергия связи ядра урана составляет 7,5 МэВ. Для разобщения всех нуклонов, составляющих ядро урана-238, надо затратить энергию  $E_1 = 7,5 \cdot 238 = 1785$  МэВ. При объединении этих нуклонов в два новых ядра с массовыми числами 119, для которых удельная энергия связи равна 8,6 МэВ, выделится энергия, равная сумме энергий связи новых ядер:  $E_2 = 2 \cdot 8,6 \cdot 119 = 2046,8$  МэВ.

В результате выделится энергия  $\Delta E = E_2 - E_1 \approx 260$  МэВ\*.

Энергия, которая освобождается при делении всех ядер, содержащихся в 1 кг урана-235, равна примерно  $2,3 \cdot 10^7$  кВт·ч. Такая энергия выделяется при сгорании 2 000 000 кг бензина или 2 500 000 кг каменного угля.

Для протекания цепной ядерной реакции необходимо, чтобы коэффициент размножения нейтронов был больше единицы ( $K > 1$ ).

**Коэффициент размножения нейтронов равен отношению числа нейтронов, вызывающих деление ядер на одном из этапов реакции к числу нейтронов, вызвавших деление ядер на предыдущем этапе реакции:**

$$K = \frac{N_i}{N_{i-1}}.$$

\* Более точный расчёт даёт около 208 МэВ.





Этот коэффициент зависит от ряда факторов: от природы и количества делящегося вещества и от геометрической формы занимаемого веществом объёма. Так, при шарообразной форме потеря нейтронов через поверхность будет наименьшей.

Для чистого урана-235 критическая масса составляет около 40 кг при шарообразной форме куска урана. Если масса ядерного горючего меньше критической, то  $K < 1$  и реакция деления затухает. Если масса горючего больше критической, то  $K > 1$ , бурное развитие реакции может привести к взрыву — такая реакция осуществляется при взрыве атомной бомбы. Если масса ядерного горючего равна критической, то  $K = 1$  и цепная реакция идёт с постоянной интенсивностью. Такая реакция имеет место в ядерных реакторах.

**Масса делящегося вещества, в которой цепная реакция идёт с коэффициентом  $K = 1$ , называется критической массой данного вещества.**



**Э. Ферми**  
(1901—1954)

Первый ядерный реактор был сооружён и испытан в США в 1942 г. под руководством итальянского физика **Э. Ферми**. В нашей стране первый ядерный реактор построен в 1946 г. под руководством **И.В. Курчатова**. В 1954 г. введена в эксплуатацию первая в мире атомная электростанция в г. Обнинске.

Управление цепной ядерной реакцией в **ядерном реакторе** (рис. 165) осуществляется путём введения в ядерное горючее 1 стержней 4, содержащих кадмий или бор, которые являются сильными поглотителями нейтронов.

Сначала стержни, поглощающие нейтроны, выдвигаются из котла с ядерным горючим, и цепная реакция идёт при  $K > 1$ . Затем, когда нейтроны размножатся в достаточном количестве, стержни 4 вдвигаются в котёл и, поглощая нейтроны, замедляют цепную реакцию.

В дальнейшем глубина погружения стержней автоматически удерживается так, чтобы  $K = 1$ . При этом число нейтронов, образующихся в единицу времени, остаётся постоянным.

Цепная реакция ведётся на медленных нейтронах, которые хорошо поглощаются ядрами урана-235, вызывая их деление. В качестве **замедлителя** нейтронов 2 используются **графит** или **тяжёлая вода**. Осколки урановых ядер, образующиеся в процессе цепной



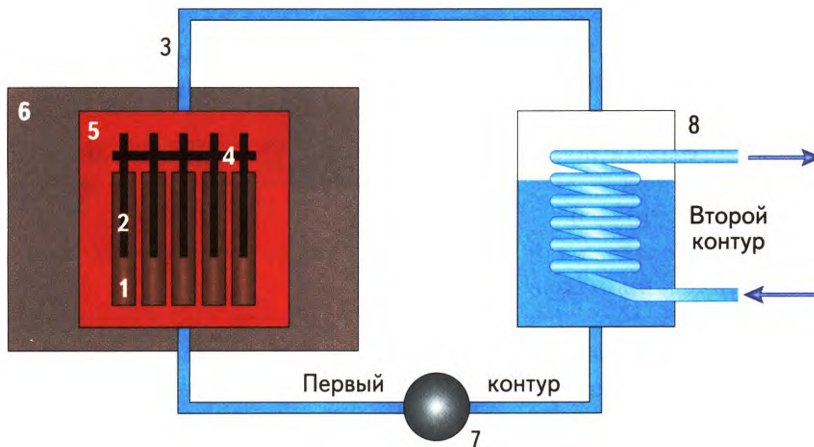


Рис. 165. Схема ядерного реактора

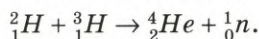
реакции, затормаживаются замедлителем, отдавая ему свою кинетическую энергию, поэтому температура в активной зоне реактора повышается до 800—900 К. Посредством **теплоносителя 3** (тяжёлая вода или расплавленный натрий, циркулирующие по трубам) теплота отводится из активной зоны реактора во **второй контур 8**. Это теплообменник, в котором перегоняемый насосом **7** теплоноситель разогревает воду, обращая её в пар. Пар приводит в действие паровые турбины. Цифрой **5** на рисунке 165 показан **отражатель нейтронов**, поглощающий  $\gamma$ -излучение, а цифрой **6** — **железобетонная защита**.

Наряду с выделением энергии в ядерном реакторе происходит образование и накопление нового ядерного топлива — **плутония**  $^{239}_{94}\text{Pu}$ .

В современных реакторах ядерным топливом является  $^{238}_{92}\text{U}$ , обогащённый ураном  $^{235}_{92}\text{U}$  до 5 %.

Ядро урана-238, поглотив медленный нейтрон, испускает  $\gamma$ -фотон и превращается в ядро радиоактивного изотопа  $^{239}_{92}\text{U}$ . В свою очередь, это ядро испускает  $\beta$ -частицу и превращается в ядро трансуранового элемента плутония, который является хорошим ядерным топливом.

Выделением ядерной энергии сопровождается также **синтез двух или нескольких ядер**. Одной из реакций этого типа является синтез ядер дейтерия и трития с образованием ядра гелия:



Рассчитаем энергетический выход этой реакции (табл. 16).



Таблица 16

Энергия связи до реакции, МэВ	Энергия связи после реакции, МэВ
1875,6 + 2809,4	3727,4 + 939,6
4685,0	4667,0
Энергетический выход: 18 МэВ	

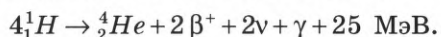
Простой расчёт показывает, что если такой реакции подвергнутся все ядра, содержащиеся в 1 кг смеси дейтерия с тритием, то выделится колоссальная энергия, порядка  $7,2 \cdot 10^{14}$  Дж. Эта энергия примерно в 8 раз больше той, которая выделяется при реакции деления 1 кг урана.

Для объединения двух ядер в одно они должны, преодолев кулоновскую силу отталкивания, сблизиться на расстояние  $10^{-15}$  м — дальнейшее сближение обеспечат ядерные силы. Следовательно, объединяемые ядра должны обладать большой кинетической энергией, а именно энергией порядка 0,01 МэВ. Рассчитаем, до какой температуры надо нагреть смесь дейтерия с тритием, чтобы средняя кинетическая энергия теплового движения атомов смеси была равной 0,01 МэВ.

$$E = \frac{3kT}{2} \Rightarrow T = \frac{2E}{3k}; \quad T = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-15}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} = 7,7 \cdot 10^7 \text{ К} = 77\,000\,000 \text{ К}.$$

В земных условиях такие высокие температуры создаются только при взрыве атомной бомбы. Осуществление управляемой термоядерной реакции встречается с большими трудностями: необходимо обеспечить регулируемое нагревание плазмы до десятков миллионов кельвинов и изолировать разогретую плазму от стенок всякого вещественного сосуда. Возможно, разогретая плазма будет удерживаться посредством тороидального магнитного поля.

Все условия для протекания термоядерных реакций имеются в недрах Солнца и других звёзд. Одна из таких реакций состоит из нескольких последовательных ядерных превращений, в результате которых четыре протона объединяются в ядро гелия. При этом испускаются  $\gamma$ -фотон, два нейтрино и два позитрона:



Расчёты показывают, что запас водорода на Солнце обеспечит протекание термоядерных реакций в течение многих миллиардов лет.





1. Укажите две принципиально различных возможности получения ядерной энергии.
2. Что изображено на рисунке 164?
3. Как протекает цепная ядерная реакция?
4. Какие условия необходимы для осуществления цепной ядерной реакции?
5. Что такое критическая масса ядерного горючего?
6. По рисунку 165 опишите устройство и работу ядерного реактора.
7. Какие ядерные реакции называют термоядерным синтезом?
8. Почему для протекания реакции синтеза ядер необходима очень высокая температура?
9. Какую роль играют термоядерные реакции, протекающие в недрах звёзд?
10. Используя Интернет и другие источники информации, подготовьте сообщение (презентацию), найдите видеозаписи по одной из тем: «Создание Э. Ферми первого ядерного реактора», «Создание и испытание первой атомной бомбы в США», «Как в СССР создавали первую атомную бомбу?», «Ядерная гонка вооружений: причины и последствия», «Какие страны имеют на вооружении ядерное оружие?», «Как устроены атомная и термоядерная бомбы?», «Почему произошла атомная бомбардировка Хиросимы и Нагасаки и каковы её последствия?», «Развитие атомной энергетики СССР и России», «Плюсы и минусы АЭС», «Экологические проблемы ядерной энергетики», «Авария на Чернобыльской АЭС и её последствия», «Проекты использования атомных двигателей на транспорте», «Атомная энергия: благо или опасность?», «Термоядерная энергетика: миф или реальность?».
- 11 (II). Определите энергетический выход следующей ядерной реакции:  $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^7_3\text{Li}$ . (~2,8 МэВ)
- 12 (II). Определите энергетический выход следующей ядерной реакции:  $^6_3\text{Li} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$ . (~22,4 МэВ)
- 13 (II). Вычислите энергию связи ядра дейтерия (в МэВ). (2,3 МэВ)
- 14 (II). Найдите удельную энергию связи в ядре лития  $^7_3\text{Li}$ . (5,6 МэВ)
- 15 (III). Мощность первой атомной электростанции в г. Обнинске 5000 кВт при кпд 17%. Считая, что при каждом акте распада выделяется в реакторе 200 МэВ энергии, определите расход урана-235 в сутки. (31 г)







## § 31. Элементарные частицы



1. Какие микрочастицы вам известны?

2. С какими фундаментальными взаимодействиями, существующими в природе, вы знакомы?

3. Приведите пример превращения одной элементарной частицы в другую.

1. Электрон, протон, нейтрон,  $\alpha$ -частица, фотон, нейтрино, пион.

2. С гравитационными, электромагнитными, сильными.

3.  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e$  — реакция распада нейтрона с образованием протона, электрона и антинейтрино.



**Элементарными называются частицы, которым на современном уровне знаний нельзя приписать определённую внутреннюю структуру.**

Их нельзя представить состоящими из каких-либо других частиц. Элементарные частицы характеризуются **массой покоя, электрическим зарядом, средним временем жизни** и некоторыми другими величинами. По значению массы покоя элементарные частицы можно разделить на 4 класса:

**Фотоны** — масса покоя равна нулю.

**Лептоны** — масса покоя больше нуля, но меньше либо равна массе электрона. Из известных нам частиц к этому классу относятся **электроны, нейтрино** и их античастицы.

**Мезоны** — масса покоя составляет несколько сот масс электрона. Эти частицы являются неустойчивыми (время жизни порядка  $10^{-8}$  с).

**Пионы ( $\pi$ -мезоны)** являются частицами, которыми обмениваются нуклоны на расстояниях  $10^{-15}$  м, благодаря этому обмену обеспечивается сильное взаимодействие между нуклонами внутри ядра (действие ядерных сил).

**Барионы** — масса покоя равна массе протона или больше массы протона, но меньше массы дейтрона; среди барионов различают **нуклоны** и более тяжёлые частицы — **гипероны**. Из известных нам частиц к этому классу относятся протоны и нейтроны, входящие в состав ядра. Протон стабилен, а время жизни свободного нейтрона составляет около 15 минут.



Все частицы, участвующие в сильном взаимодействии, принято называть **адронами**. Адронами являются **мезоны**, **барионы** и **резонансы**.

В 60-е гг. прошлого века была открыта группа частиц, названных **странными**:  $K$ -мезонов и гиперонов, масса которых больше массы нуклонов. В 70-е гг. к ним прибавилась большая группа частиц с ещё большими массами, их называли **очарованными**. Кроме того, открыты чрезвычайно короткоживущие частицы со временем жизни порядка  $10^{-23}$  с. Эти частицы называли **резонансами**. Число этих частиц уже более четырёхсот.

Рассматривая элементарные частицы, можно заметить следующие особенности:

1. Только три из элементарных частиц — электрон, протон и нейтрон — можно назвать основными. Из них построены атомы, а значит, и весь окружающий нас мир.

2. Заряд элементарной частицы, выраженный в элементарных зарядах, равен либо 1, либо  $-1$ , либо 0. Многозарядных частиц нет.

3. Большинство элементарных частиц нестабильны и имеют очень малое время жизни.

4. Каждой частице соответствует её **античастица**.

В 20-х гг. прошлого столетия английский физик **П. Дирак** предсказал существование **антиэлектрона** — частицы, масса которой равна массе электрона, а заряд положительный. Эту частицу назвали **позитроном**. В 1932 г. американский физик **К. Андерсон** обнаружил позитрон в космических лучах. В дальнейшем было установлено, что позитрон может появиться в результате взаимодействия  $\gamma$ -кванта с тяжёлым ядром, причём позитрон всегда появляется вместе с электроном. На рисунке 166 показано рождение электрон-позитронной пары. В вакууме и электрон и позитрон стабильны, но при встрече друг с другом они **аннигилируют**, порождая два фотона с большой энергией.

В 1955 г. экспериментально обнаружен **антипротон**, который отличается от протона знаком заряда. В настоящее время античастицы обнаружены у всех частиц.

Если ядро атома составить из антипротонов и антинейтронов, а оболочку — из позитронов, то получится **антиатом** антивещества. В 1969 г. в нашей стране получен **антигелий**. При встрече антивещества



**Рис. 166.** Рождение пары электрон-позитрон





с веществом происходит аннигиляция, при которой высвобождается колоссальная энергия, равная энергии покоя аннигилирующих частиц и античастиц.

Основным источником наших знаний об элементарных частицах является изучение результатов столкновения частиц, например электронов или протонов, которые разгоняются в современных ускорителях до скоростей, близких к скорости света. Так, ускоритель в г. **Серпухове** под Москвой позволяет получать протоны с энергией до 76 000 МэВ. Однако если не считать **Большой адронный коллайдер**, единственным источником частиц со сверхвысокой энергией остаются **космические лучи**.

Из мирового пространства на Землю непрерывно падает поток атомных ядер, в основном протонов, средняя энергия которых  $10^4$  МэВ, энергия отдельных частиц достигает  $10^{18}$  МэВ. Это **первичные космические лучи**.

В атмосфере Земли частицы первичных космических лучей испытывают неупругие столкновения с ядрами атомов, в результате чего возникает **вторичное излучение**, в котором встречаются все известные в настоящее время элементарные частицы.

Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем больше рождается новых частиц, причём новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части сталкивающихся частиц.

**Все элементарные частицы могут превращаться друг в друга.**

В 1964 г. американскими физиками **М. Гелл-Манном** и **Дж. Цвейгом** была предложена модель, согласно которой все частицы, участвующие в сильных взаимодействиях (адроны), построены из первичных частиц — **кварков**. Кварки имеют дробный электрический заряд  $+\frac{2}{3}e$  или  $-\frac{1}{3}e$ . Ядерные частицы протоны и нейтроны состоят из трёх кварков. В свободном состоянии кварки пока не обнаружены, но их существование доказывается опытами по рассеянию быстрых электронов на протонах и нейтронах.

В мире элементарных (субатомных) частиц существует глубокий и рациональный порядок, в основе которого — фундаментальные физические взаимодействия.

**Электромагнитное взаимодействие.** Переносится фотонами. Радиус действия не ограничен. Его интенсивность примерно в 100 раз меньше, чем сильного. В нём принимают участие только частицы, имеющие электрический заряд.

**Сильное взаимодействие.** Этот вид взаимодействия называют ядерным, потому что он обеспечивает связь нуклонов в ядре. Сильное взаимодействие связывает кварки в барионы (протоны, нейтроны и пр.) и мезоны. Наибольшее расстояние, на котором проявляет-





ся сильное взаимодействие, составляет примерно  $10^{-15}$  м. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, носят название **адронов**.

**Слабое взаимодействие.** Оно ответственно за все виды  $\beta$ -распадов ядер, за многие распады элементарных частиц и за все процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим. Его интенсивность в  $10^{14}$  раз меньше, чем сильного.

**Гравитационное взаимодействие.** В нём принимают участие все без исключения микрочастицы. Радиус действия не ограничен. Из-за малых масс частиц гравитационное взаимодействие примерно в  $10^{39}$  раз слабее сильного взаимодействия. В ядерной физике роль гравитационного взаимодействия пока неизвестна.

Каждое из взаимодействий переносится своим типом **бозонов**:

**фотон** — электромагнитные взаимодействия, **гравитон** (пока не обнаружен) — силы тяготения между всеми телами, имеющими массу.

Восемь **глюонов** переносят сильные взаимодействия, связывающие кварки. Промежуточные векторные бозоны переносят слабые взаимодействия.

При энергии  $10^9$  эВ объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Можно предположить, что при энергии порядка  $10^{15}$  ГэВ должно достигаться объединение с ними сильных взаимодействий, а при энергии  $10^{19}$  ГэВ к ним присоединится и гравитационное взаимодействие. Однако ускорителей, на которых можно получать такие энергии и проверить эти теории, пока нет.

В приведённой ниже таблице 17 представлена классификация самых распространённых элементарных частиц.

Таблица 17

Частица	Анти-частица	Обозначение	Электрический заряд, Кл	Масса, МэВ	Время жизни, с
Фотон		$\gamma$	0	0	$\infty$
Лептоны					
Электрон	Позитрон	$e^-, e^+$	$\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$	0,511	$\infty$
Нейтрино (электронное)	Анти-нейтрино	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	0	$\infty$



Окончание табл. 17

Частица	Анти-частица	Обозначение	Электрический заряд, Кл	Масса, МэВ	Время жизни, с
Протон	Анти-протон	$p, \bar{p}$	$\pm 1,6 \cdot 10^{-19}$	938,26	$\rightarrow \infty$
Нейтрон	Анти-нейтрон	$n, \bar{n}$	0	939,55	$1 \cdot 10^3$



1. Какие частицы называются элементарными?
2. Относится ли к элементарным  $\alpha$ -частица?
3. Составьте классификацию элементарных частиц по массе покоя.
4. Какими особенностями обладают элементарные частицы?
5. Что такое античастица? Приведите примеры античастиц.
6. Что происходит при встрече антивещества с веществом?
7. Что представляют собой космические лучи?
8. Что представляют собой кварки?
9. Опишите виды взаимодействий между элементарными частицами.



## Структура и содержание главы «Физика атома и атомного ядра»





**Задания для повторения главы V****Часть 1**

1. Между источником радиоактивного излучения и детектором помещён слой картона толщиной 2 мм. Какое излучение может пройти через него?

- 1) только  $\alpha$     2) только  $\beta$     3)  $\alpha$  и  $\beta$     4)  $\beta$  и  $\gamma$

2. Какая из строчек таблицы 18 правильно отражает структуру ядра  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ ?

Таблица 18

	$p$ — число протонов	$n$ — число нейтронов
1	13	14
2	13	27
3	27	13
4	27	40

- 1) 1    2) 2    3) 3    4) 4

3. Из ядра  ${}_{88}^{224}\text{Ra}$  образуется ядро  ${}_{84}^{216}\text{Po}$  в результате

- 1) одного  $\alpha$ -распада и одного  $\beta$ -распада  
2) двух  $\beta$ -распадов  
3) двух  $\alpha$ -распадов  
4) одного  $\alpha$ - и двух  $\beta$ -распадов

4. Из какого ядра после одного  $\alpha$ -распада и одного  $\beta$ -распада образуется ядро  ${}_{83}^{211}\text{Bi}$ ?

- 1)  ${}_{84}^{216}\text{Po}$     2)  ${}_{84}^{215}\text{Po}$     3)  ${}_{80}^{215}\text{Hg}$     4)  ${}_{86}^{219}\text{Rn}$

5.  $\beta$ -излучение — это

- 1) «вторичное» радиоактивное излучение при начале цепной реакции  
2) поток нейтронов, образующихся в цепной реакции  
3) электромагнитные волны  
4) поток электронов

6. Какие заряд  $Z$  и массовое число  $A$  будет иметь ядро элемента, получившегося из ядра изотопа урана после одного  $\alpha$ -распада и двух  $\beta$ -распадов?

- 1)  $Z = 234$     2)  $Z = 92$     3)  $Z = 88$     4)  $Z = 234$   
 $A = 92$      $A = 234$      $A = 234$      $A = 94$



7. Э. Резерфорд объяснил результаты своих экспериментов по рассеянию  $\alpha$ -частиц на металлической фольге тем, что

- 1) положительный заряд атома сосредоточен в небольшой части его объёма
- 2) электроны движутся в атоме по стационарным орбитам
- 3) двигаясь по стационарным орбитам, электроны не излучают электромагнитные волны
- 4) в атоме нет положительного заряда

8. Протон был открыт при

- 1) бомбардировке ядер азота  $\alpha$ -частицами
- 2) бомбардировке ядра бериллия
- 3) исследовании естественной радиоактивности
- 4) исследовании фотоэффекта

9. В сильном взаимодействии участвуют

- 1) адроны    2) лептоны    3) бозоны    4) электроны

10. В каком случае поглощается фотон с наибольшей длиной волны (рис. 167)?

- 1) 1    2) 2    3) 3    4) 4

### Часть 2\*

1. Образец, содержащий радий, испускает  $\alpha$ -частицы, обладающие импульсом  $10^{-19}$  кг·м/с и скоростью  $1,5 \cdot 10^7$  м/с. За  $1/2$  часа выделяется энергия 450 Дж. Сколько  $\alpha$ -частиц испускает образец за 1 с? Энергией отдачи ядер,  $\gamma$ -излучением и релятивистскими эффектами пренебречь. ( $3,34 \cdot 10^{11}$  с $^{-1}$ )

2. В сосуде находится разреженный атомарный водород. Атом водорода в основном состоянии ( $E_1 = -13,6$  эВ) поглощает фотон и ионизируется. Электрон, вылетевший из атома в результате ионизации, движется вдали от ядра со скоростью 1000 км/с. Какова частота поглощённого фотона? Энергией теплового движения атомов водорода пренебречь. ( $4 \cdot 10^{15}$  Гц)

3. Препарат активностью  $1,7 \cdot 10^{11}$  частиц в секунду помещён в медный контейнер массой 0,5 кг. На сколько повысилась температура контейнера за 1 ч, если известно, что данное радиоактивное вещество испускает  $\alpha$ -частицы с энергией 5,3 МэВ? Считать, что энергия всех  $\alpha$ -частиц полностью переходит во внутреннюю энергию контейнера. Теплоёмкостью препарата и теплообменом с окружающей средой пренебречь. (2,7 К)

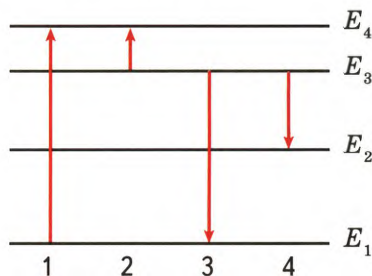


Рис. 167. Схематичное изображение к заданию 10



4. При реакции образуется ядро трития и протон и выделяется 4,03 МэВ энергии. Какую кинетическую энергию уносит протон, если суммарный импульс исходных частиц равен нулю, а их кинетическая энергия пренебрежимо мала по сравнению с выделившейся?

(3,02 МэВ)

5. Пациенту ввели внутривенно  $V_0 = 1 \text{ см}^3$  раствора, содержащего радиоактивный изотоп. Через некоторое время у пациента взяли пробу крови того же объёма. Её активность была в  $n = 7560$  раз

меньше активности исходного раствора. Во сколько раз это время меньше периода полураспада изотопа, если общий объём крови пациента  $V = 6 \text{ л}$ ?

(3)

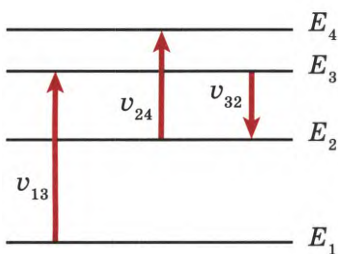


Рис. 168. Схематичное изображение к заданию 6

6. На рисунке 168 представлены несколько энергетических уровней электронной оболочки атома и указаны частоты фотонов, излучаемых и поглощаемых при переходах между этими уровнями. Какова максимальная длина волны фотонов, излучаемых атомом при любых возможных переходах между уровнями  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и  $E_4$ , если  $\nu_{13} = 7 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ,  $\nu_{24} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ,  $\nu_{12} = 3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ?

(1500 нм)





### § 32. Космические исследования. Солнечная система

1. Какую систему мира называют геоцентрической?

2. Какую систему мира называют гелиоцентрической?

3. Перечислите планеты в порядке их удаления от Солнца.

4. Что такое спектральный анализ?

1. В центре Вселенной находится Земля. Вокруг неё движутся по круговым орбитам Луна, Солнце и планеты.

2. В центре Солнечной системы находится Солнце. Вокруг него движутся по орбитам Земля и другие планеты.

3. Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

4. Определение химического состава вещества по его линейчатому спектру.



Рассматриваемые в данной главе понятия относятся к древнейшей из наук — **астрономии**.

**Астрономия изучает движение, строение и эволюцию небесных тел и их систем.**



Долгое время в основе астрономии лежали наблюдения, производимые с поверхности Земли при помощи оптических **телескопов**, которые позволяли обнаруживать слабые источники света, а также увеличивали угол зрения, под которым виден небесный объект.

Представления о небесных телах и системах этих тел чрезвычайно обогатились после того, как учёные получили возможность изучать весь спектр их электромагнитного излучения. Для этого учёным слу-



Рис. 169. Радиотелескоп



Рис. 170. Старт космической ракеты

жат разные типы телескопов: инфракрасные, рентгеновские, гамма- и радиотелескопы (рис. 169). Существует даже специальный телескоп, предназначенный для изучения Солнца.

В последнее время огромное количество ценной информации учёные получают благодаря внеатмосферным наблюдениям при помощи орбитальных телескопов, таких как «Кеплер», «Хаббл» и т.д.

Ценные и разнообразные сведения о небесных светилах даёт **спектральный анализ**. Он позволяет определить качественный и количественный химический состав светила, его температуру, наличие и значение индукции магнитного поля, скорость движения по лучу зрения и некоторые другие сведения.

В астрономии используется и **радиолокация**. Как известно, поверхность Венеры невозможно увидеть из-за плотной атмосферы, поэтому для изучения её рельефа был применён метод радиолокации.

Особое место в методах изучения небесных тел и космической среды занимают исследования в области космонавтики (космические исследования). Наша страна была первой, запустившей в 1957 г. в космос искусственный спутник Земли. Первым человеком, совершившим полёт в космос в 1961 г., был гражданин нашей страны **Ю.А. Гагарин**.

Интенсивное развитие космонавтики сделало возможным:

- создание внеатмосферных искусственных спутников Земли (рис. 170) разного назначения; это метеорологические и навигационные спутники, космические телекоммуникационные системы, исследование природных ресурсов, охрана окружающей среды, космические системы аварийного спасения и др.; космические аппараты наблюдают за ледовыми заторами, лесными пожарами и другими стихийными бедствиями и техногенными катастрофами;
- создание искусственных спутников Луны и ближайших к Земле планет;

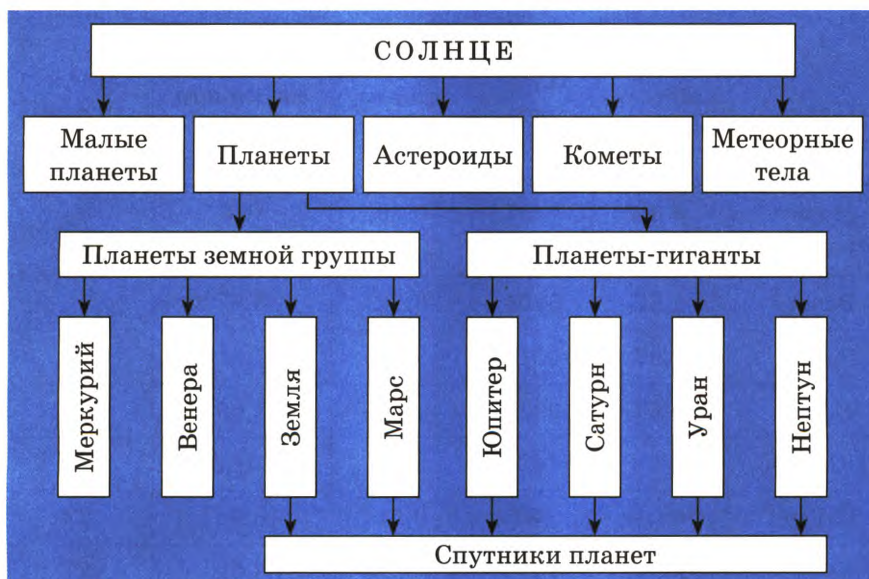




- запуск на Луну и соседние планеты зондов, управляемых с Земли и передающих ценнейшую для нас информацию о температуре, давлении, составе атмосферы и т.д.;
- высадку людей на Луне;
- создание орбитальных космических станций, оборудованных научными лабораториями;
- использование космической техники в решении задач национальной безопасности.

**В Солнечную систему входит Солнце, 8 планет с их спутниками, малые планеты (планетоиды), кометы, астероиды и бесчисленные метеорные тела.**

Состав Солнечной системы можно отобразить в виде схемы (рис. 171). Масса Солнечной системы (рис. 172) сосредоточена практически в Солнце. На долю планет приходится лишь 0,1% массы Солнца. Масса Солнца в 333 тысячи раз больше массы Земли, поэтому сила притяжения к Солнцу очень велика.



**Рис. 171.** Состав Солнечной системы

Средние плотности планет, а также их средние расстояния от Солнца в астрономических единицах (а.е.) указаны в таблице 19. Астрономической единицей называют расстояние от Солнца до





**Земли (около 150 млн км). Тогда расстояние от Земли до Луны (около 300 000 км) будет составлять примерно 0,002 а.е.**

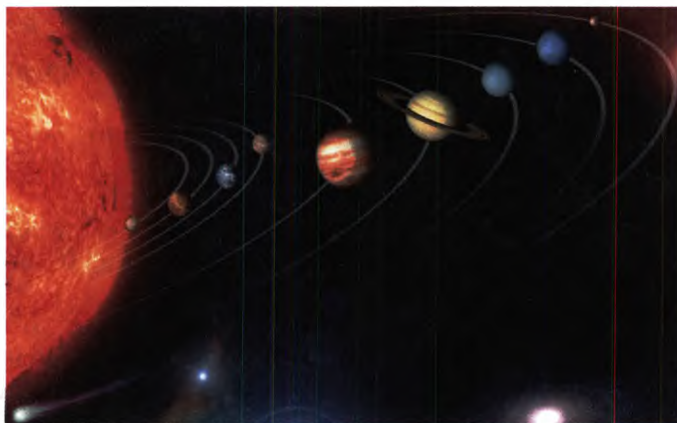


Рис. 172. Схема Солнечной системы

Таблица 19

Планета	Масса, $\times 10^{24}$ кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Расстояние от Солнца, а.е.	Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	Число спутников
Меркурий	0,33	5427	0,39	3,7	—
Венера	4,87	5204	0,72	8,87	—
Земля	5,97	5515	1	9,81	1
Марс	0,64	3934	1,52	3,69	2
Юпитер	1899	1326	5,19	23,12	79
Сатурн	568,46	687	9,51	8,96	62
Уран	86,83	1318	19,24	8,69	27
Нептун	102,43	1638	30,0	11,00	14

Существует несколько гипотез возникновения Земли и других планет. По гипотезе российского академика **О.Ю. Шмидта**, «сырьём» для Солнечной системы послужило огромное холодное



газопылевое облако. Вначале сформировалось центральное тело — Солнце, которое ещё было холодным газовым шаром и которое своим притяжением постепенно закручивало и сплющивало газопылевое облако. Орбиты частиц стали круговыми с движениями в одном направлении. Крупные частицы притягивали к себе мелкие, их масса быстро росла. Так возникло несколько планет. Холодные на поверхности, планеты стали разогреваться изнутри за счёт ядерных реакций. Как только масса будущей планеты достигает 1—2 масс Земли, она становится способной захватить атмосферу. Процесс образования планет длился миллионы лет.

В начале XVII в. немецкий учёный **Иоганн Кеплер**, обобщив свои многолетние наблюдения, установил три закона движения планет.



И. Кеплер

### 1. Каждая планета обращается вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Эллипсом называется плоская замкнутая кривая. Сумма расстояний от каждой точки этой кривой до двух точек, называемых фокусами, является постоянной. На рисунке 173 в одном из фокусов находится Солнце. Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется **перигелием**, самая далёкая от него — **афелием**.

### 2. Радиус-вектор планеты за одинаковые промежутки времени описывает равные площади.

На рисунке 173 равные площади окрашены в синий цвет. За одинаковые промежутки времени длины дуг, описанные планетой, различны, следовательно, и скорость планеты при её движении по орбите изменяется: она больше, когда планета находится ближе к Солнцу, и меньше, когда планета дальше от Солнца.

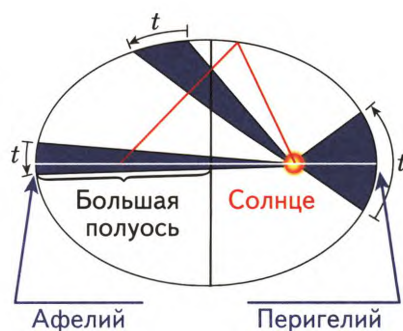


Рис. 173. Объяснение законов Кеплера

### 3. Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.



Если большую полуось орбиты одной планеты обозначить через  $a_1$ , а период её обращения вокруг Солнца — через  $T_1$ ; большую полуось орбиты другой планеты — через  $a_2$ , а период её обращения — через  $T_2$ , то третий закон Кеплера можно выразить в виде следующей формулы\*:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3.$$

Орбиты большинства планет мало отличаются от окружностей. Возьмём вместо большой полуоси  $a$  радиус окружности  $R$ . Так как гравитационное взаимодействие планеты с Солнцем обеспечивает центростремительное ускорение планеты, можно написать следующее равенство:

$$\frac{mv^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{R}}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{GM}.$$

Если радиус орбиты и период обращения одной планеты равны  $R_1$  и  $T_1$ , а другой планеты —  $R_2$  и  $T_2$ , то получим:

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2 R_1^3}{GM}; \quad T_2^2 = \frac{4\pi^2 R_2^3}{GM}; \quad \frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3},$$

что и требовалось получить.

Третий закон Кеплера позволяет рассчитать расстояние от планеты до Солнца, используя расстояние от Земли до Солнца (1 а.е.) и период обращения Земли вокруг Солнца (1 год).

$$R_{\text{п}} = \sqrt[3]{\frac{R_3^3 \cdot T_{\text{п}}^2}{T_3^2}}.$$



1. Опишите методы, используемые в астрономии.
2. Каково значение космических исследований?
3. Какие небесные тела входят в состав Солнечной системы?
4. Чем отличаются планеты-гиганты от планет земной группы?
5. Что представляют собой кометы?
6. Почему хвост кометы всегда направлен от Солнца?
7. Как, по гипотезе О.Ю. Шмидта, возникли Земля и другие планеты?
8. По каким орбитам обращаются планеты вокруг Солнца?
9. Не противоречит ли второй закон Кеплера закону сохранения механической энергии?

\* Эту формулу легко получить, используя закон всемирного тяготения.





10. Как, используя третий закон Кеплера, доказать, что сила гравитационного взаимодействия планеты с Солнцем обратно пропорциональна квадрату расстояния планеты от Солнца?
11. Используя третий закон Кеплера и таблицу 18, рассчитайте, сколько земных лет длится год на Марсе.
12. Используя таблицу 18, составьте самостоятельно задачу, запишите полное условие, краткое условие и решение.
13. Период обращения планеты Нептун вокруг Солнца составляет примерно 165 лет. Определите расстояние от Нептуна до Солнца в астрономических единицах. **(30 а.е.)**



### § 33. Природа Солнца и звёзд. Физические характеристики звёзд

- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Что такое световой год?</li> <li>2. Как называется ближайшая к нам звезда?</li> <li>3. Чему равно расстояние от Солнца до ближайшей к нему звезды Проксима Центавра?</li> <li>4. При каких условиях протекает реакция синтеза атомных ядер?</li> <li>5. Какую скорость называют второй космической скоростью?</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Расстояние, которое проходит свет за время, равное одному году.</li> <li>2. Солнце.</li> <li>3. 4,3 световых года.</li> <li>4. Термоядерные реакции. Они протекают при температурах, составляющих миллионы кельвинов.</li> <li>5. Скорость, которую надо сообщить телу, чтобы траекторией его движения в поле тяготения планеты была парабола, т.е. чтобы оно навсегда ушло от планеты.</li> </ol> |
|--|--|



Солнце — центральное и самое массивное тело Солнечной системы. Его масса в 333 000 раз больше массы Земли и в 720 раз больше





массы всех планет, вместе взятых. Как и все звёзды, Солнце — раскалённый газовый шар. Оно состоит в основном из водорода (около 70%) и гелия. На все остальные элементы, вместе взятые, приходится не более 2% массы Солнца.

Массу Солнца можно рассчитать, используя третий закон Кеплера, если известны радиус орбиты Земли ( $1,5 \cdot 10^{11}$  м) и период её обращения вокруг Солнца (1 год  $\approx 3,15 \cdot 10^7$  с).

$$T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{MG} \Rightarrow M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}; M = \frac{4 \cdot 9,86 \cdot 3,375 \cdot 10^{33}}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{15}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг.}$$

Другой важной характеристикой Солнца и других звёзд является **светимость** ( $L$ ), равная мощности полного излучения звезды.

Известно, что на площадку в  $1 \text{ м}^2$ , поставленную перпендикулярно к солнечным лучам за пределами земной атмосферы, приходится 1,4 кВт лучистой энергии Солнца. Чтобы найти светимость Солнца, надо это число умножить на площадь поверхности шара, радиус которого равен расстоянию от Земли до Солнца. Тогда  $L = L_0 \cdot 4\pi R^2$ ;  $L = 1,4 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 2,25 \cdot 10^{22} = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$

Такой будет мощность излучения шара, размер которого равен размеру Солнца, если температура этого шара будет равна 6000 К.

Светимость других звёзд будем рассматривать в отношении к светимости Солнца.

**Видимый угловой диаметр** Солнца составляет в среднем  $1/_{107}$  радиана. Это означает, что диаметр Солнца равен  $1/_{107}$  а.е.  $\cdot D = 1/_{107} \cdot 1,5 \cdot 10^{11} = 1,4 \cdot 10^9$  м, т.е. в 109 раз больше диаметра Земли. Зная массу Солнца и его диаметр, легко рассчитать среднюю **плотность** Солнца. Она равна:

$$\rho = \frac{3M}{4\pi R^3}; \rho \approx 1400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Однако в наружных слоях Солнца плотность в миллионы раз меньше, а в центре Солнца в сотни раз больше средней плотности.

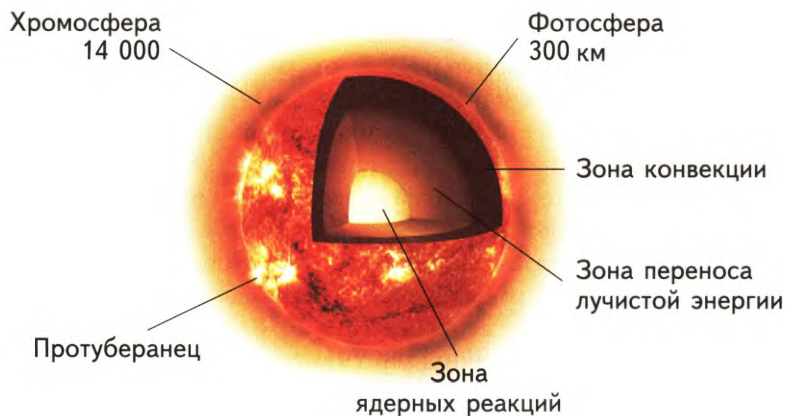
Под действием гравитационных сил в центре Солнца создаётся огромное давление — около 2000 млрд атмосфер. Из газовых законов известно, что давление пропорционально температуре и плотности газа. Расчёты показывают, что в центре Солнца температура равна примерно 15 000 000 К.

Главным «топливом» на Солнце служит водород. Протоны имеют одноимённые заряды, поэтому при их сближении резко увеличиваются кулоновские силы отталкивания. Однако при очень высоких температуре и давлении энергии теплового движения частиц столь велики, а частицам так тесно, что наиболее быстрые из них всё же сближаются друг с другом настолько, что оказываются в сфере вли-



яния ядерных сил. В результате происходит цепочка превращений, которая завершается возникновением нового ядра, состоящего из двух протонов и двух нейтронов, — **ядра гелия**. В результате количество гелия в центральной области (ядре) Солнца постепенно **увеличивается**, а водорода — **уменьшается**. С момента образования Солнца за 5 млрд лет примерно треть водорода уже превратилась в гелий.

Поток энергии, которая возникает в центре Солнца в результате термоядерных реакций, передаётся во внешние слои и распределяется на всё большую поверхность, поэтому температура солнечных газов по мере удаления от центра Солнца убывает — сначала медленно, а в наружных слоях очень быстро. В зависимости от температуры и от характера протекающих процессов Солнце можно условно разделить на 4 области (рис. 174).



**Рис. 174.** Строение Солнца

**Ядро** — центральная область, в которой давление и температура обеспечивают протекание термоядерных реакций. Радиус этой области равен примерно  $\frac{1}{3}$  радиуса Солнца.

**Лучистая зона.** В ней энергия передаётся от слоя к слою в результате последовательных поглощения и излучения квантов электромагнитной энергии.

**Зона конвекции.** Она занимает область от лучистой зоны до самой видимой границы Солнца. Здесь происходит конвекция вещества, при этом температура вещества быстро понижается.

**Атмосфера,** которая начинается от зоны конвекции и простирается далеко за пределы видимого диска Солнца.



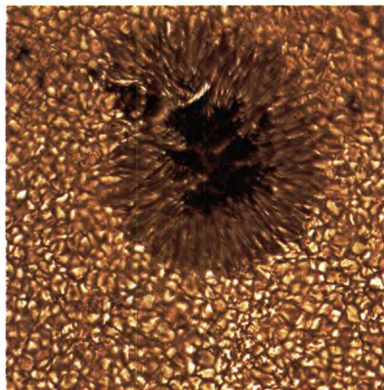


Рис. 175. Грануляция и пятно

Самый глубокий слой атмосферы, толщиной 200—300 км, называется **фотосферой**. В фотосфере температура убывает от 8000 до 4000 К из-за ухода излучения в межпланетное пространство. Убывание температуры приводит к тому, что в видимом спектре Солнца наблюдаются тёмные линии поглощения — **фраунгоферовы линии**.

Фотосфера имеет зернистую структуру, которую называют **грануляцией**. На рисунке 175 показан участок фотосферы. Размеры гранул составляют 1000—2000 км. Картина грануляции не является застывшей: гранулы живут не более 10 минут. Одни гранулы исчезают, другие появляются.

На фоне грануляции можно наблюдать более контрастные объекты: **солнечные пятна и факелы**. Пятна — это места выхода в солнечную атмосферу сильных магнитных полей. Они могут иметь разные размеры: от 1000 км до размеров, превышающих поперечное сечение Земли. Температура пятен примерно на 1500 К ниже температуры окружающего вещества. Пятна образуют группы, картины групп пятен всё время меняются.

Практически все пятна окружены яркими полями, которые называются **факелами**. Температура в факелах выше температуры окружающего вещества примерно на 2000 К. Количество пятен и факелов характеризует **солнечную активность**, максимумы которой повторяются в среднем через каждые 11 лет.

Фотографии Солнца, полученные во время полного солнечного затмения (рис. 176), позволяют увидеть внешнюю часть солнечной



Рис. 176. Солнечная корона

атмосферы — **солнечную корону**. Корона прослеживается до расстояний, в 10 и более раз превышающих радиус Солнца. Солнечная корона прогрета примерно до 2 млн кельвинов — это полностью ионизированная плазма, создающая в основном рентгеновское излучение.

На внутренних слоях солнечной короны возникают **протуберанцы** — струи горячего вещества. Одни протуберанцы в течение многих часов висят



над солнечной поверхностью, другие быстро поднимаются на сотни тысяч километров и так же быстро падают вниз.

Некоторые протуберанцы, пробыв долгое время без заметных изменений, внезапно как бы взрываются, и вещество их со скоростью в сотни километров в секунду выбрасывается в межпланетное пространство.

Солнечная корона является источником непрерывного потока частиц, в основном **протонов**, который называют солнечным ветром. Частицы солнечного ветра покидают корону со скоростью более 800 км/с.

При максимальной солнечной активности возрастает число мощных протуберанцев, увеличивается число пятен и их размеры, происходит резкое увеличение ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений.

Всё многообразие солнечных явлений: грануляционная структура поверхности, пятна, корона, протуберанцы, солнечный ветер — свойственно, видимо, и другим звёздам. Поэтому физика солнечных явлений имеет огромное значение для развития астрофизики в целом.

В начале XX в. была разработана спектральная классификация звёзд. Основные классы в ней обозначаются латинскими буквами (*O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, *M*), они отличаются набором наблюдаемых спектральных линий и плавно переходят один в другой. Вдоль этой последовательности уменьшается температура и изменяется цвет звёзд — от голубого до красного. Звёзды, относящиеся к классам *O*, *B* и *A*, называются горячими или ранними, *F* и *G* — солнечными, *K* и *M* — холодными или поздними.

Различные характеристики звёзд (масса, светимость, температура и др.) взаимосвязаны. Большой интерес представляет сопоставление светимости звёзд с их температурой и цветом. Эта зависимость представлена на диаграмме Герцшпрунга — Рассела (рис. 177). По оси ординат на этой диаграмме откладываются логарифмы светимостей, а по оси абсцисс — спектральные классы, или соответствующие им логарифмы температур, или цвет. Точки, которые

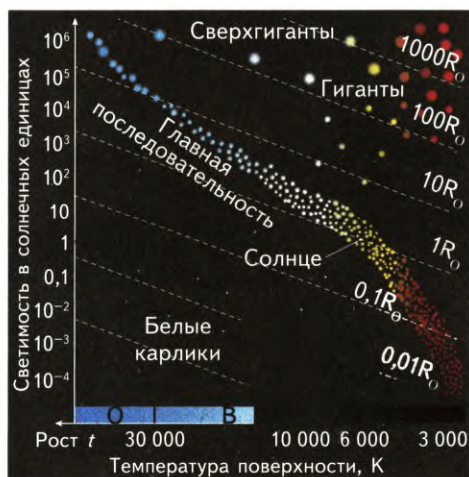


Рис. 177. Диаграмма Герцшпрунга—Рассела





соответствуют звёздам с известными характеристиками, располагаются вдоль некоторых линий — последовательностей. **Большинство звёзд располагаются вдоль наклонной линии, которая идёт слева сверху вправо вниз. Это главная последовательность.** На ней крестиком отмечено положение Солнца, которое как звезда на этой последовательности относится к **жёлтым карликам**.

Вверху расположены самые яркие звёзды — **последовательность гигантов**. Цвет и температура у них различны, а светимость почти одинакова. Примерно от середины диаграммы вправо вверх идёт последовательность **красных гигантов**. Внизу располагаются **белые карлики**.

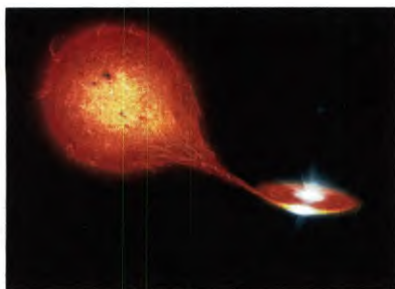
Для звёзд главной последовательности имеется связь между массой звезды и её светимостью. Чем больше масса звезды, тем больше её светимость.

Место звезды на рассмотренной диаграмме определяется её массой и возрастом, следовательно, диаграмма отражает эволюцию звёзд.

Диаграмма Герцшпрунга—Рессела не даёт представления о том, как часто встречаются звёзды разного типа. Эта частота в разных частях Вселенной различна, но сверхгигантов и белых карликов везде очень мало, большинство звёзд относится к главной последовательности. Строение звёзд главной последовательности аналогично строению Солнца, строение звёзд других типов имеет свои отличительные особенности.

### Красные гиганты и сверхгиганты

Особенностью этих звёзд является отсутствие ядерных реакций в самом центре. В самых внешних слоях ядра, где температура около 15 млн кельвинов, из водорода в процессе ряда превращений образуется гелий.



**Рис. 178.** Красный гигант и белый карлик

Глубже, где температура выше, из гелия образуется углерод, потом из углерода образуется кислород. В самых глубоких слоях этих звёзд при термоядерных реакциях образуется железо. Создание более тяжёлых химических элементов требует затрат энергии.

Звёзды **Бетельгейзе** и **Антарес** в сотни раз больше Солнца по диаметру, а массы гигантов больше солнечной всего лишь в десятки раз. В результате даже средняя плотность красных сверхгигантов в тысячи раз меньше плотности нашего воздуха при нормальных условиях (рис. 178).





### Белые карлики

В современной теории эволюции звёзд белые карлики (рис. 179) рассматриваются как конечный этап жизни средних и лёгких звёзд, масса которых в несколько раз меньше массы Солнца. После того как в центральных областях стареющей звезды выгорит весь водород, ядро сжимается, а сама звезда сильно расширяется и становится красным гигантом. Образовавшаяся разреженная оболочка, очень слабо связанная с ядром, постепенно рассеивается в пространстве, остаётся очень компактная горячая звезда, состоящая в основном из ядер гелия. Излучает эта звезда в основном в ультрафиолетовом диапазоне.

У яркого Сириуса есть спутник — белый карлик. Его размер примерно равен размеру Луны, а масса сравнима с массой Солнца. Следовательно, плотность этой звезды около  $3 \cdot 10^{10}$  кг/м<sup>3</sup> — почти в 2 млн раз больше плотности ртути!



Рис. 179. Белый карлик в созвездии Млечный Путь

### Нейтронные звёзды и чёрные дыры

После того как звезда исчерпает свои источники энергии, она начинает остывать и сжиматься. При этом давление составляющих звезду газов сильно увеличивается. Если масса звезды сравнима с массой Солнца, то есть сравнительно невелика, то сжатие останавливается — звезда превращается в белый карлик.

Если масса звезды больше некоторой критической массы, то гравитационные силы приводят к дальнейшему сжатию этой звезды. Благодаря превращению пары электрон—протон в нейтрон, количество нейтронов увеличивается, а электроны вытесняются из звезды, пока вся звезда не окажется состоящей из одних нейтронов. Огромная звёздная масса сосредоточивается в шаре радиусом всего в несколько километров.

Плотность такой нейтронной звезды невообразимо велика — она составляет около  $10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>.

Наконец, звезда сжимается до такой степени, что свет не может преодолеть её притяжение — возникает **чёрная дыра** (рис. 180). Существование таких необычных объектов было предсказано



Рис. 180. Рождение чёрной дыры



ещё в конце XVIII в. астрономом и математиком **П. Лапласом**. Чтобы некоторое тело покинуло навсегда планету или звезду, это тело должно иметь по меньшей мере скорость, которую называют **второй космической скоростью**. Её можно рассчитать по формуле:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Чтобы вторая космическая скорость была равна скорости света, звезда должна иметь радиус  $R_g = \frac{2GM}{c^2}$ . Если радиус будет ещё меньше, то даже свет не сможет покинуть звезду. Этот предельный радиус называют **гравитационным радиусом**. В то же время такие объекты захватывают вещество, находящееся в окружающем пространстве. На рисунке 181 можно увидеть, как невидимая звезда в созвездии Лебеда своим тяготением вбирает в себя вещество из находящейся близко звезды.



**Рис. 181.** Чёрная дыра втягивает газ из соседней звезды



**Рис. 182.** Двойные звёзды

### Двойные звёзды

При «рождении» звезды из газового облака вследствие турбулентности могут образоваться «звёзды-двойняшки» (рис. 182). Так, в созвездии Большой Медведицы вторая звезда от края «ручки» ковша является двойной — при нормальном зрении это можно увидеть даже невооружённым глазом. Эти «напарницы» **Мицар** и **Алькор** находятся на расстоянии, в 20 тыс. раз превышающем расстояние от Земли до Солнца, период их обращения длится миллионы земных лет. Другие же двойные звёзды близки друг к другу и обращаются вокруг общего центра масс за считанные минуты.

Двойные звёзды не всегда похожи одна на другую: они могут иметь разную массу, цвет, а значит, и температуру. Так, вокруг красного исполина **Антареса**, диаметр которого превышает диаметр Солнца в 500 раз, кружится





ослепительно голубая звезда, которая втрое меньше Солнца, но ярче его почти в 20 раз.

### Новые и сверхновые звёзды

Многие новые звёзды являются компонентами тесных двойных систем, одна из которых — звезда типа нашего Солнца, а другая — белый карлик. Из-за близости этих звёзд плазма нормальной звезды перетекает к другой, более компактной.

Гравитационное сжатие приводит к повышению температуры и возникновению термоядерных реакций, имеющих взрывной характер. Термоядерный взрыв разбрасывает вещество оболочки, разлёт и свечение которой воспринимается как рождение новой звезды. Ежегодно в нашей Галактике вспыхивает около сотни новых звёзд.

**Сверхновая звезда** — это настоящий взрыв, когда большая часть звезды разлетается с громадной скоростью. Оставшаяся часть сжимается (коллапсирует) в нейтронную звезду или чёрную дыру.

Сверхновые играют большую роль в эволюции звёзд: они являются финалом жизни звёзд, масса которых составляет 8—10 масс Солнца.

1. Что такое звезда?
2. Какой химический состав имеет Солнце?
3. Что такое светимость?
4. Почему светимость Солнца и других звёзд с течением времени не изменяется?
5. Какие области можно выделить во внутреннем строении Солнца?
6. Каково строение атмосферы Солнца?
7. Что представляют собой гранулы и солнечные пятна?
8. Что представляет собой диаграмма Герцшпрунга—Рессела?
9. К какому спектральному классу звёзд относится Солнце?
10. Используя Интернет, подготовьте презентацию по одной из тем: «Красные гиганты», «Белые карлики», «Двойные звёзды», «Нейтронные звёзды», «Чёрные дыры», «Новые и сверхновые звёзды», «Планетарные туманности».
- 11 (II). Определите плотность нейтронной звезды, имеющей радиус 10 км и массу, равную массе Солнца. ( $\sim 2 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>)
- 12 (II). Рассчитайте гравитационный радиус для звезды, масса которой равна массе Солнца. (3 км)
- 13 (III). Определите светимость Полярной звезды, если на поверхности Земли она создаёт освещённость  $E = 3,8 \cdot 10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup>, а расстояние от Земли до этой звезды около 650 св. лет. ( $\sim 9 \cdot 10^{29}$  Вт)







## § 34. Происхождение и эволюция звёзд



1. Что такое звезда?

1. Космический объект, представляющий собой массивный газовый раскалённый шар, внутри которого протекают термоядерные реакции.

2. По каким параметрам сравнивают звёзды?

2. Масса, радиус, температура, светимость, цвет или спектральный класс.



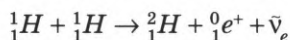
Все химические элементы, из которых состоит окружающий нас мир, образовались в ходе звёздной эволюции. Звезда образуется под действием гравитационных сил из гигантского газового молекулярного облака. Масса вещества, сосредоточенного в облаках, состоящих из газов в молекулярной форме, составляет значительную часть массы каждой звёздной системы — **галактики**.



**Рис. 183.** Звёздообразующая туманность в галактике Треугольника

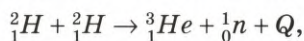
«Рождение звезды» — это процесс образования гидростатически равновесного объекта, излучение которого поддерживается за счёт собственных источников энергии. «Смерть» звезды — это катастрофическое нарушение равновесия, ведущее к её разрушению или невероятному сжатию (коллапсу).

Холодное разреженное облако межзвёздного газа (*рис. 183*) сжимается под действием гравитационных сил и постепенно принимает форму шара. При сжатии за счёт энергии гравитации температура в центре шара сильно повышается. Когда масса вещества будущей звезды достигает 0,1 массы Солнца, температура в её центре доходит до 1 млн кельвинов, и в жизни этой протозвезды начинается новый этап — **реакции термоядерного синтеза**. Однако эти реакции пока сильно отличаются от реакций в звёздах типа Солнца. Протекающие в ядре Солнца реакции синтеза:





требуют более высокой температуры  $\sim 10$  млн кельвинов. Но при 1 млн кельвинов эффективно протекает реакция слияния дейтерия:



где  $Q = 3,26$  МэВ — выделяющаяся энергия.

Непрозрачность протозвёздного вещества приводит к тому, что в звезде начинают возникать конвекционные потоки газа. Горячее вещество поднимается от центра протозвезды к периферии, а холодное опускается к центру и поставляет новые ядра дейтерия. Протозвезда разогревается и разбухает. Действие гравитационных сил, а также выделяемая при реакциях синтеза дейтерия энергия приводят к дальнейшему повышению температуры в центре звезды.

Когда температура в центре звезды повышается до 10—15 млн кельвинов, кинетические энергии сталкивающихся ядер водорода оказываются достаточными для преодоления кулоновских сил отталкивания — происходят ядерные реакции горения водорода. Увеличивающееся давление в центре звезды противодействует гравитационному сжатию. Звезда приобретает стабильные размеры и светимость, которые для звезды с массой, близкой к солнечной, не меняются в течение миллиардов лет. В таком состоянии звезда пребывает большую часть жизни, находясь на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга—Ресселла, пока не закончатся запасы топлива в её ядре.

Если начало жизненного пути для всех звёзд протекает почти одинаково, то дальнейшая судьба каждой звезды почти полностью определяется её массой. Поэтому рассмотрим отдельно эволюцию звёзд малой массы (менее 0,5 массы Солнца), промежуточной массы (1—5 масс Солнца) и звёзд большой массы (более 8 солнечных масс).

### Звёзды малой массы

Какими прибывают эти звёзды на главную последовательность, достоверно никто не знает, потому что время их пребывания в ряду молодых очень велико — превышает возраст Вселенной. Все представления об эволюции этих звёзд держатся на численных расчётах. По мере сжатия звезды начинает увеличиваться давление электронного газа. Это давление сначала останавливает рост температуры в центре звезды, затем начинает её понижать. Энергии, выделяющейся в ходе ядерных реакций, не хватает, чтобы компенсировать её расходы на излучение. Такие звёзды получили название **коричневых карликов**. Их судьба — постепенное остывание с остановкой всех ядерных реакций.





## Звёзды среднего размера

Светимость и цвет звезды зависят от температуры её поверхности, которая определяется массой. Звёзды промежуточной массы, такие как Солнце, остаются на главной последовательности в среднем 10 млрд лет. Как только истощается запас водорода в ядре, звезда уходит с главной последовательности. Истощение запаса водорода в больших и горячих звёздах происходит гораздо быстрее, чем в маленьких и более холодных (рис. 184).

Внешние слои вследствие гравитационного притяжения начинают сжимать звезду. Давление и температура в ядре повышаются значительно сильнее, чем на фазе формирования протозвезды. Коллапс продолжается до тех пор, пока температура не приблизится к 100 млн кельвинов и

не начнутся термоядерные реакции с участием гелия.

Очень горячее ядро становится причиной чудовищного расширения звезды. Её размер увеличивается приблизительно в 100 раз — звезда становится **красным гигантом**. Фаза горения гелия продолжается несколько миллионов лет. Когда красным гигантом станет наше Солнце, его диаметр окажется больше диаметра земной орбиты (рис. 185).



Рис. 184. Жизненный путь звезды средней массы



Рис. 185. Жизненный путь звёзд средней и большой масс





При достижении звездой средней величины фазы красного гиганта её внешние слои продолжают расширяться, а ядро сжиматься — начинаются реакции синтеза углерода из гелия. Синтез освобождает много энергии, и звезда живёт ещё около миллиарда лет. Изменения в величине испускаемой энергии заставляют звезду проходить через периоды неустойчивости, включающие в себя изменения температуры, перемены в размере и выпуске энергии. Возникают сильные звёздные ветры и интенсивные пульсации. Такие звёзды называют звёздами позднего типа. Вследствие сильных пульсаций внешние слои могут получить кинетическую энергию, достаточную для выброса из звезды и образования планетарной туманности. В центре туманности (рис. 186) остаётся ядро звезды, которое превращается в белый гелиевый карлик.



**Рис. 186.** Туманность Кошачий Глаз, сформировавшаяся после гибели звезды солнечной массы

Судьба центральной части зависит от её исходной массы. Если масса мала, то звезда закончит свою эволюцию как **белый карлик**.

При большей массе — как **нейтронная звезда**, при ещё большей массе — как **чёрная дыра**. Но большинство звёзд, в том числе Солнце, заканчивают эволюцию, сжимаясь до тех пор, пока давление вырожденных электронов не уравнивает гравитацию. В этом состоянии, когда размер звезды уменьшается в сотни раз, а плотность становится в миллион раз больше плотности воды, звезда является белым карликом. Она лишена источников энергии и, постепенно остывая, становится тёмной и невидимой.

#### Сверхмассивные звёзды ( $M > 5M_{\odot}$ )

После того как образовался красный сверхгигант, ядро вследствие сил гравитации продолжает сжиматься. По мере сжатия ядра увеличиваются температура и плотность. Начинается новая последовательность термоядерных реакций. В этих реакциях синтезируются тяжёлые элементы, что временно сдерживает коллапс ядра (рис. 187).

В итоге, по мере образования всё более тяжёлых химических элементов Периодической системы, из кремния синтезируется железо-56. Ядро железа-56 обладает максимально удельной энергией связи, поэтому образование более тяжёлых ядер с выделением энергии невозможно. Давление в ядре больше не может противоосто-

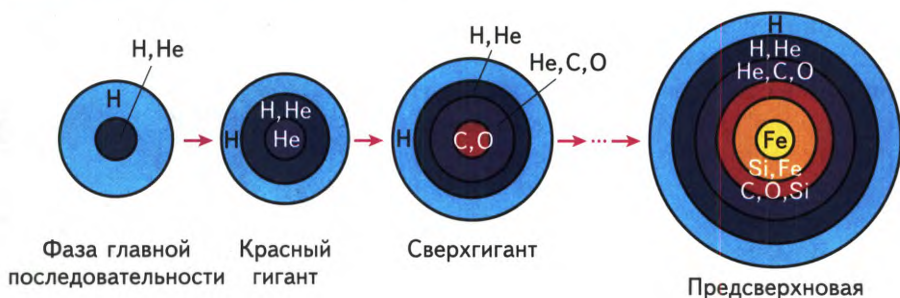


Рис. 187. Синтез элементов в ядре звезды большой массы

ять колоссальной силе гравитации — происходит коллапс ядра. Температура поднимается настолько, что начинается расщепление ядер железа на нейтроны, протоны и  $\alpha$ -частицы. Происходит эффективное превращение пары протон + электрон в пару нейтрон + нейтрино. Нейтрино быстро покидают ядро, унося энергию. Распад железа ещё более охлаждает ядро.



Рис. 188. Взрыв сверхновой

Звезда окончательно теряет устойчивость. За несколько секунд ядро коллапсирует в нейтронную звезду или чёрную дыру — происходит **взрыв сверхновой** с выделением огромной энергии (рис. 188).

Вспышки сверхновых были зафиксированы в 1054, 1572, 1604 гг. В 1885 г. появление сверхновой звезды было отмечено в туманности Андромеды. Её блеск превышал блеск всей Галактики и оказался в 4 млрд раз более интенсивным, чем блеск Солнца.

Вспышки сверхновых имеют фундаментальное значение для обмена веществом между звёздами и межзвёздной средой, для распространения химических элементов во Вселенной, а также для рождения первичных космических лучей.



1. Из чего и как образуется звезда?
2. За счёт какой энергии повышается температура в центре протозвезды?
3. В каком случае звезда занимает место на главной последовательности?





4. Какие ядерные реакции происходят в ядре звезды, находящейся на главной последовательности?
5. Каков жизненный путь звезды, имеющей малую массу по сравнению с массой Солнца?
6. Что происходит со звездой средней массы в середине и в конце жизненного цикла?
7. Что происходит с гигантской звездой в конце жизненного цикла?
8. Используя Интернет, сделайте подборку фотографий звёзд (с подписями), находящихся на разных этапах эволюции. Работу можно оформить в виде презентации.

## § 35. Галактики. Наша Галактика

Какие галактики вам известны?

Большое и Малое Магеллановы  
Облака, туманность Андромеды,  
Млечный Путь



**Галактика** включает в себя не только громадное скопление звёзд. Это гигантская гравитационно связанная система звёзд и звёздных скоплений, межзвёздного газа и пыли и тёмной материи. Все эти объекты вращаются вокруг общего центра масс.



**Галактики** — чрезвычайно далёкие объекты, расстояния до ближайших из них принято измерять в мегапарсеках\*, а до далёких — в единицах красного смещения  $z$ . Из-за удалённости галактик различить на небе невооружённым глазом можно только три из них: **Большое и Малое Магеллановы Облака** (видны в Южном полушарии) и **туманность Андромеды** (видна в Северном полушарии).

К началу 90-х гг. XX в. насчитывалось не более 30 галактик, в которых удалось увидеть отдельные звёзды. После запуска космического телескопа «Хаббл» и ввода в строй 10-метровых наземных телескопов число галактик, в которых удалось различить отдельные звёзды, резко возросло.

Классифицируя галактики по их видимой форме и свойствам входящих в них звёзд, можно выделить три основные группы галактик: эллиптические ( $E$ ), спиральные ( $S$ ) (рис. 189) и неправильные ( $Ir$ ).

\* 1 парсек (1 пс) составляет 3,26 световых года.  $1 \text{ пс} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км}$ .  $1 \text{ Мпс} = 3 \cdot 10^{19} \text{ км}$ .





Рис. 189. Спиральная галактика

***E*-галактики** состоят из очень старых звёзд, в ***Ir*-галактиках** основной вклад в излучение вносят звёзды, значительно моложе Солнца, а в ***S*-галактиках** присутствуют звёзды всех возрастов. Возраст галактик примерно одинаков — около 10 млрд лет. Если в ***E*-галактиках** звёздообразование почти полностью прекратилось миллиарды лет назад, то в спиральных системах образование звёзд продолжается, но не так активно, как в начале их жизни. В ***Ir*-галактиках** образование новых звёзд идёт сейчас так же активно, как и миллиарды лет назад.

Эта классификация была предложена американским астрономом **Э.П. Хабблом** ещё в 20-х гг. прошлого века.

В строении галактик можно выделить две составляющие: сферический компонент и массивный звёздный диск. В сферической подсистеме звёзды концентрируются ближе к центру. При удалении от центра плотность вещества быстро падает. Типичная ***E*-галактика** выглядит как сферическая подсистема в чистом виде: звёздный диск в ней полностью или почти полностью отсутствует. ***E*-галактики** почти лишены межзвёздного газа, скорость вращения вокруг центра масс невелика. Массы самых крупных эллиптических галактик достигают  $10^{13} M_{\odot}$ .

В ***S*-галактиках** имеется как сферический компонент, так и массивный звёздный диск, светимость которого в большинстве случаев больше светимости сферической части. У обычных спиральных галактик непосредственно от центральной части, ядра, отходят несколько спиральных рукавов.



**Э.П. Хаббл**  
(1885—1953)



У пересечённых спиральных галактик (рис. 190) ядро пересекается по диаметру поперечной полосой (баром). Спиральные ветви начинаются от концов бара.

Рождение звёзд происходит почти исключительно в дисках галактик. Межзвёздный газ, постоянно пополняемый тем газом, который сбрасывают с себя стареющие звёзды, в такой Галактике, как наша, имеет массу, составляющую несколько миллиардов масс Солнца. Этот газ постепенно сгущается в плотные облака, которые дают начало молодым звёздам. Характер движения звёзд и газа неодинаков: газ вращается быстрее, чем старые звёзды. Характерные скорости вращения газа в галактиках составляют 150—300 км/с.

Массы спиральных галактик составляют от  $10^{10}$  до  $10^{12} M_{\odot}$ .

В неправильных (*Ir*)-галактиках практически отсутствует сферический компонент: все звёзды заключены в толстом диске. Существенная доля массы такой галактики приходится на межзвёздный газ. Примерами неправильных галактик могут служить **Большое и Малое Магеллановы Облака**. Это самые близкие к нам галактики, их можно видеть невооружённым глазом в Южном полушарии неба (рис. 191).

Если галактики при своём движении близко подходят друг к другу, то они испытывают сильное гравитационное взаимодействие (рис. 192). Некоторые звёзды могут переходить от одной галактики к другой. При очень близком прохождении галактик они могут слиться друг с другом, отдав межзвёздному газу избыток энергии. Взаимодействие галактик можно увидеть на рисунке 193.

Теоретические расчёты показывают, что крошечная область галактики, её активное ядро, является источником фантастического количества энергии. Мощность выделяемой энергии в отдельных случаях



Рис. 190. Спиральная галактика с перемычкой

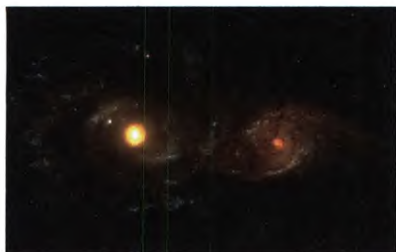


Рис. 191. Большое Магелланово Облако



Рис. 192. Галактика Антенна — пара взаимодействующих галактик





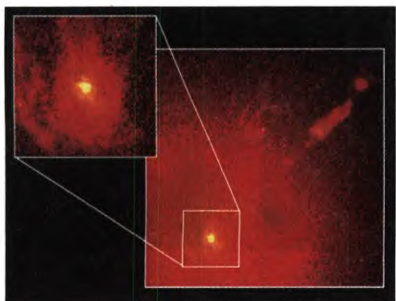
**Рис. 193.** Взаимодействие галактик

превышает  $10^{36}$  Вт, что в десятки миллиардов раз превышает полную мощность излучения Солнца во всех диапазонах спектра ( $4 \cdot 10^{26}$  Вт). Основная энергия ядра выделяется в одних случаях в виде оптического и инфракрасного излучения, а в других — в виде радиоволн (радиогалактика) и потоках быстрых частиц.

Размер ядра по космическим меркам очень мал, меньше Солнечной системы, а энергия, зарождаемая в нём, чудовищна — такую энергию не могут выделить никакие ядерные реакции. Единственным источником такой энергии может быть выделение гравитационной энергии газа, попадающего в область массивной чёрной дыры. Свободно падающее на неё вещество разгоняется в окрестности дыры до околосветовых скоростей и закручивается вокруг неё в плотный и чрезвычайно горячий диск, по размерам сопоставимый с размерами Солнечной системы. В этом диске рождаются мощные потоки коротковолнового излучения и происходит ускорение протонов и электронов до высоких энергий.

Для объяснения высокой энергетической активности ядра достаточно, чтобы каким-либо путём к чёрной дыре устремлялось и исчезало в её окрестности ежегодно около одной солнечной массы вещества.

**Чёрные дыры присутствуют в ядрах почти всех галактик.**



**Рис. 194.** Ядерная часть радиогалактики М 87

Примером галактики с высокой активностью ядра может служить радиогалактика М 87. На рисунке 194 показана фотография ядерной части этой галактики, сделанная с космического телескопа «Хаббл». Во врезке — увеличенное изображение ядра, на котором хорошо виден газовый околоядерный диск, а также выброс вещества со скоростью около 3000 км/с, масса выброса около  $10^5 M_{\odot}$ .

Самыми мощными источниками радио- и рентгеновского излучения являются **квазары** (квазизвёздные радиоисточники). Светимость одного из самых мощных квазаров 3С 273 в созвездии Девы (рис. 195)

достигает  $10^{12} L_{\odot}$ . Квазары являются также мощными источниками инфракрасного, рентгеновского и гамма-излучения. Размеры же





квазаров сравнительно невелики — они сравнимы с размерами Солнечной системы.

Все квазары удаляются от нас с огромными скоростями. По современным представлениям, квазары являются активными ядрами галактик.

Галактики существуют в виде групп (несколько галактик), скоплений (сотни галактик) и облаков галактик (тысячи галактик). Одиночные галактики во Вселенной встречаются крайне редко. Средние расстояния между галактиками в скоплениях в 10—20 раз больше, чем размеры самых крупных галактик. Гигантские галактики имеют размеры до 18 млн световых лет. Пространство между галактиками заполнено пылью, газом и разного рода излучениями.

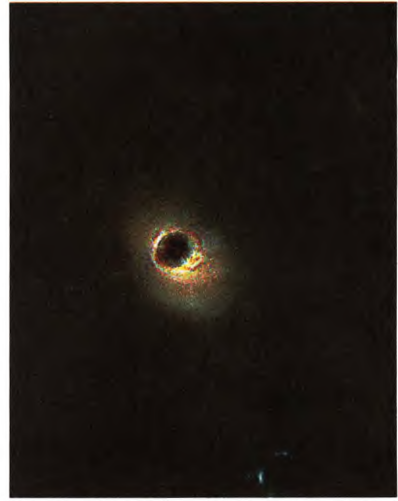


Рис. 195. Квазар 3C 273

В безлунную ночь на звёздном небе хорошо видна широкая светлая полоса — **Млечный Путь** (рис. 196). Эта белёсая полоса напоминает пролитое молоко. По древнегреческим мифам — это молоко пролил младенец Геркулес, когда кормился грудью богини Юноны. Даже в хороший бинокль можно увидеть, что Млечный Путь состоит из бесчисленного множества далёких звёзд. Млечный Путь проходит через оба полушария и замыкается в кольцо.

Все звёзды, которые составляют Млечный Путь и которые мы видим на звёздном небе, составляют большую спиральную звёздную систему, которую мы называем нашей Галактикой или просто Галактикой (с заглавной буквы). Наша Солнечная система тоже входит в состав Галактики — она расположена на периферии одной из её спиральных ветвей. Примерное расположение Солнца в Галактике можно рассмотреть на рисунке 197.

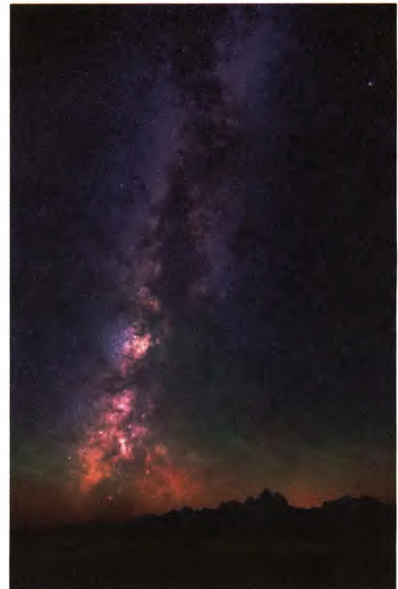
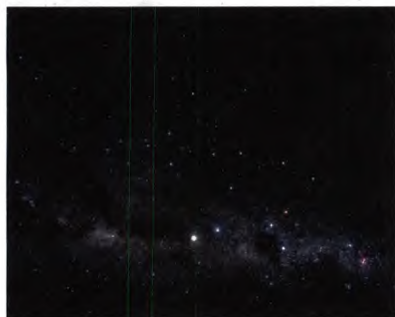


Рис. 196. Млечный Путь

В самом центре нашей Галактики находится чёрная дыра (в созвездии Стрельца),



**Рис. 197.** Положение Солнца в Галактике



**Рис. 198.** Звёзды Млечного Пути

вокруг которой вращаются все звёзды Галактики. Солнце находится на расстоянии 33 000 световых лет от центра Галактики и совершает один оборот вокруг чёрной дыры за 200 млн лет.

В Галактике более 500 млрд звёзд, среднее расстояние между которыми составляет около 5 световых лет. В центре Галактики плотность звёзд значительно выше и расстояния между ними значительно меньше. На рисунке 198 показана фотография небольшого участка звёздного неба в центре Млечного Пути.

Кроме отдельных звёзд главной последовательности, красных гигантов и белых карликов, двойных и кратных звёзд в Галактике имеются ещё и скопления звёзд. **Рассеянные скопления**, похожие на скопления звёзд **Плеяды** (рис. 199), содержащие несколько сотен звёзд, и **шаровые скопления** (рис. 200), состоящие из сотен тысяч и миллионов звёзд.

В плоскости диска Галактики имеются громадные области, заполненные тёмной пылевой и газовой материей, поглощающей и ослабляющей свет далёких звёзд.



**Рис. 199.** Рассеянное скопление звёзд



**Рис. 200.** Шаровое скопление звёзд





Плотные тёмные пылевые облака можно увидеть благодаря отражению ими света ярких звёзд (рис. 201).

Кроме звёзд, газа и пыли наша Галактика пронизывается космическими лучами. Это релятивистские протоны, электроны и ядра атомов химических элементов. Под действием магнитных полей эти частицы движутся по запутанным траекториям. Источниками космических лучей являются взрывы сверхновых. Заряженные частицы космических лучей при движении в магнитном поле излучают радиоволны, которые исследуются с помощью радиотелескопов.

Все объекты Галактики обращаются вокруг её центра масс. Солнце движется со скоростью 220 км/с, совершая один оборот за 200 млн лет. Полная масса Галактики оценивается в несколько сотен миллиардов масс Солнца. Чётких границ Галактика не имеет, её диаметр составляет приблизительно 98 000 световых лет.



**Рис. 201.** Пылевые облака в отражённом свете ярких звёзд

1. Какие элементы входят в состав галактик?
2. На какие группы делятся галактики по своей форме?
3. Каковы особенности *E*-галактик? *S*-галактик? *Ir*-галактик?
4. Что представляет собой активное ядро галактики?
5. Что представляют собой квазары?
6. Что такое Млечный Путь?
7. Где расположена в Галактике Солнечная система?
8. Что представляют собой космические лучи?
9. Каковы размеры и масса Галактики?
10. Найдите в Интернете фотографии галактик разных типов (с подписями). Работу оформите в виде презентации.



## § 36. Вселенная. Расширение Вселенной

1. Остаются ли неизменными расстояния между галактиками?

2. В каких единицах обычно выражаются расстояния до галактик?

1. Эти расстояния увеличиваются.

2. В мегапарсеках (Мпк), световых годах.







Для изучения физических свойств галактик используются методы **спектрального анализа излучения**. В физике хорошо известен эффект **Доплера**, согласно которому при движении источника волн к наблюдателю частота воспринимаемых колебаний увеличивается, а длина волны уменьшается. При движении источника волн от наблюдателя длина принимаемой волны увеличивается.

**Э.П. Хаббл** заметил, что линии в спектрах всех известных галактик смещены к красному краю спектра (по отношению к спектру Солнца). Это явление было названо **красным смещением**. Красное смещение  $z$  для каждого космического объекта равно отношению смещения отдельной спектральной линии  $\Delta\lambda$  к длине волны  $\lambda_0$  спектральной линии, наблюдаемой в лаборатории:  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ .

При малых смещениях скорость космического объекта может быть найдена по формуле Доплера:  $v = cz$ ;  $c$  — скорость света в вакууме.

После того как были определены расстояния до галактик с известным красным смещением, Э.П. Хаббл установил закон, носящий теперь его имя:

**Все галактики удаляются от нас со скоростями, прямо пропорциональными расстояниям до них (закон Хаббла).**

$$v = Hr$$

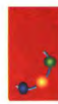
где  $H$  — **постоянная Хаббла**. Её значение зависит от выбора единиц входящих в формулу величин. Если расстояния брать в мегапарсеках (Мпк), а скорость — в километрах в секунду, то постоянная Хаббла будет равна:

$$H = 75 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}.$$

Таким образом, зная красное смещение, можно найти скорость, с которой удаляется галактика, а зная скорость удаления галактики, можно рассчитать расстояние до неё.

В Средние века считалось, что Вселенная ограничена сферой неподвижных звёзд. Открытие И. Ньютоном закона всемирного тяготения приводило к интересному следствию: если Вселенная конечна, то всемирное тяготение должно привести со временем к стягиванию всех объектов Вселенной в единую очень тесную систему.

Большой вклад в развитие представлений о Вселенной внесла созданная А. Эйнштейном общая теория относительности. Она обобщает теорию тяготения Ньютона на большие массы и скорости движения, сравнимые со скоростью света.



Согласно этой теории, гравитационное взаимодействие передаётся с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме. Пространство в этой теории не является евклидовым. Время не имеет абсолютного характера. В рамках общей теории относительности космологическую модель Вселенной впервые рассмотрел российский математик **А.А. Фридман**.

Фридман предложил три модели Вселенной.

1. Вселенная расширяется, но скорость расширения замедляется и в конце концов расширение прекращается. После этого Вселенная начинает сжиматься. Это модель **замкнутой Вселенной**.

2. Вселенная расширяется бесконечно, пространство искривлено и бесконечно. Это модель **открытой Вселенной**.

3. Пространство плоское и бесконечное.

Будущее Вселенной зависит от средней плотности вещества в ней. Расчёты показывают, что критическая плотность вещества  $\rho_{кр} = 10^{-26} \text{ кг/м}^3$ . Если средняя плотность Вселенной больше критической, то расширение Вселенной в будущем сменится сжатием. Если средняя плотность равна или меньше критической, то расширение никогда не прекратится. Грубые расчёты показывают, что средняя плотность вещества во Вселенной в разы меньше критической, но, возможно, имеется «скрытая масса», которая может внести в расчёты существенные коррективы. Поэтому вывод о бесконечном расширении Вселенной делать пока преждевременно.

Оценим время, которое прошло с момента начала расширения Вселенной. Воспользуемся законом Хаббла.

$$t_{\text{вс}} = \frac{r}{v} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = 4,2 \cdot 10^{17} \text{ с} = 13 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Следовательно, 13 млрд лет назад всё вещество Метагалактики было сосредоточено в небольшом объёме, плотность вещества была невообразимо высокой, не существовало ни звёзд, ни галактик, ни планет.

В настоящее время существует несколько космологических моделей, объясняющих процесс рождения Вселенной. Наиболее непротиворечивой является **теория Большого взрыва**, разработанная **Г.А. Гамовым** и дополненная американскими учёными **А. Гуттом** и **П. Стейнхардтом**, а также российским физиком **А.Д. Линде**.

В 1948 г. Г.А. Гамов выдвинул предположение, что Вселенная образовалась в результате гигантского взрыва, который произошёл примерно 15 млрд лет назад. Тогда всё вещество и вся энергия Вселенной были сконцентрированы в одном сверхплотном сгустке. Это начальное состояние называют **сингулярностью**. Имеются гипотезы, пытающиеся объяснить причины Большого взрыва.





Эволюция Вселенной происходила поэтапно и сопровождалась дифференциацией и усложнением её структур. Эти этапы различаются характеристиками взаимодействия элементарных частиц и называются **эрами**.

**Адронная эра.** Температура понизилась, прекратилось свободное существование кварков, появились все четыре фундаментальных взаимодействия.

**Лептонная эра.** Температура ещё понизилась. Главными элементами были лептоны. В конце этой эры вещество стало прозрачным для нейтрино.

**Эра излучения.** Продолжалась 1 млн лет. Температура Вселенной снизилась с 10 млрд кельвинов до 3000 К. На протяжении этого этапа происходило соединение протонов и нейтронов. К его концу Вселенная стала прозрачной для фотонов, излучение отделилось от вещества и образовало **реликтовое излучение**. Это излучение открыто в 1965 г. Оно не связано ни с одним из небесных тел и равномерно заполняет всю видимую Вселенную.

Затем примерно 500 тыс. лет не происходило никаких качественных изменений — шло медленное остывание и расширение Вселенной. Спустя 1 млрд лет после образования Вселенной из случайных уплотнений вещества стали появляться звёзды и галактики.

Рождение звёзд в галактике происходит непрерывно. Этот процесс компенсирует непрерывно происходящую смерть звёзд. Так, наше Солнце считается звездой второго поколения. Источник собственного свечения звёзд — термоядерные реакции превращения водорода в гелий. С момента начала таких реакций звезда переходит на главную последовательность, в соответствии с которой будут с течением времени изменяться её характеристики: светимость, температура, радиус, масса и химический состав.



1. Почему происходит красное смещение линий спектров далёких галактик?
2. Сформулируйте закон Хаббла.
3. Какие модели Вселенной предложены А.А. Фридманом?
4. Каков возраст Вселенной?
5. Что представляет собой теория Большого взрыва?
6. Назовите этапы развития Вселенной.





## Структура и содержание главы «Строение Вселенной»





## Задания для повторения главы VI

1. В состав Солнечной системы входят: Солнце, планеты, спутники планет, астероиды, квазары, кометы, метеорные тела. Укажите лишний объект.

- 1) астероиды      2) кометы      3) квазары      4) Солнце

2. Небесные тела Солнечной системы: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. Какой из этих объектов не является планетой?

- 1) Уран      2) Плутон      3) Сатурн      4) Земля

3. Чему равна одна астрономическая единица?

- 1) 340 000 км      3) 300 000 км  
2) 150 000 000 км      4) одному световому году

4. Чему равно расстояние от Земли до Луны?

- 1) 340 000 км      3) 300 000 км  
2) 150 000 000 км      4) одному световому году

5. Что является главным «топливом» Солнца и других звёзд главной последовательности?

- 1) водород      2) гелий      3) кислород      4) кремний

6. К какому типу звёзд относится наше Солнце?

- 1) белый карлик      3) красный гигант  
2) жёлтый карлик      4) нейтронная звезда

7. Расположите элементы звезды в порядке от центра к периферии: 1 — зона конвекции, 2 — ядро, 3 — атмосфера, 4 — зона переноса лучистой энергии.

- 1) 1-2-3-4      3) 2-3-4-1  
2) 4-3-2-1      4) 2-4-1-3

8. Какая звезда имеет наименьшую плотность?

- 1) красный гигант      3) белый карлик  
2) нейтронная звезда      4) чёрная дыра

9. К какому типу галактик относится наша Галактика?

- 1) Е-галактика      3) S-галактика  
2) Ir-галактика      4) карликовая галактика

10. Каков возраст Вселенной?

- 1) 15 млрд лет      3) 15 млн лет  
2) 4,5 млрд лет      4) 100 000 лет

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### План описания физической величины\*

1. Название величины.
2. Что характеризует (показывает)?
3. Обозначение.
4. Формула для расчёта величины.
5. Единицы физической величины в СИ.
6. Способ измерения величины (прибор).
7. \*Другие внесистемные единицы величины.
8. \*В честь кого так названа единица?
9. \*Величина скалярная или векторная?
10. \*Другие формулы, в которые входит данная величина.

### План описания физического опыта

1. Цель опыта.
2. Гипотеза относительно ожидаемых результатов.
3. Схема или рисунок экспериментальной установки.
4. Ход опыта.
5. Результат.
6. Анализ результата и вывод.

### План описания физического явления

1. К какой группе физических явлений относится изучаемое явление?
2. Условия протекания явления.
3. Связь явления с другими явлениями.
4. Объяснение явления.
5. Примеры использования явления на практике (или проявления в природе).
6. Устранение негативных последствий явления на практике.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Как сравнить объекты?

**Сравнение** — мыслительная операция, при которой устанавливаются сходства и различия между объектами. Основанием для срав-

---

\* Звёздочкой помечены пункты, не обязательные при описании величины.



нения бывают, как правило, существенные признаки сравниваемых объектов.

*Алгоритм выполнения операции «сравнение»*

1. Выделить у объектов признаки, по которым будет производиться сравнение (составить план сравнения).
2. Выявить сходные признаки у объектов.
3. Выявить различные признаки у объектов.
4. Сделать вывод.

Объектами для сравнения в физике могут быть, например, физические величины, формулы, явления, приборы, устройства и т.д.

При сравнении двух физических величин в качестве признаков, по которым будет производиться сравнение, удобно взять пункты плана описания физической величины, а при сравнении физических явлений — пункты плана описания физического явления.

Работу по сравнению объектов удобно оформлять в виде таблицы 20.

*Таблица 20*

Сравниваемые признаки (параметры, элементы)	Объект № 1	Объект № 2
Вывод:		

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Ресурсы Интернета по физике и астрономии

[www.krugosvet.ru](http://www.krugosvet.ru) — энциклопедия «Кругосвет».

[www.astronet.ru](http://www.astronet.ru) — «Астронет» (сайт по астрономии).

[www.elementy.ru](http://www.elementy.ru) — «Элементы» (все новости науки для детей).

[www.sfiz.ru](http://www.sfiz.ru) — проект «Вся физика».

[www.kvant.mccme.ru](http://www.kvant.mccme.ru) — полный архив журнала «Квант».

[www.afizika.ru](http://www.afizika.ru) — сайт «Занимательная физика».

[www.physics03.narod.ru](http://www.physics03.narod.ru) — «Физика вокруг нас».

[www.school-collection.edu.ru](http://www.school-collection.edu.ru) — сайт цифровых образовательных ресурсов.

[www.sci-lib.com/physics](http://www.sci-lib.com/physics) — обзор новостей по физике.

# Оглавление

Введение .....	3
----------------	---

## **Электродинамика (Продолжение)**

### **Глава I. Электромагнетизм. .... 4**

§ 1. Магнитное поле тока. Индукция магнитного поля . . . .	4
§ 2. Сила Лоренца .....	12
§ 3. Электромагнитная индукция .....	18
§ 4. Самоиндукция. ....	25
§ 5. Переменный ток .....	31
§ 6*. Индуктивное и ёмкостное сопротивления. Электрический резонанс .....	35
§ 7. Трансформатор. Производство и передача электроэнергии .....	40
Лабораторная работа 1. ....	44
Задания для повторения главы I .....	46

### **Глава II. Электромагнитные колебания и волны. .... 49**

§ 8. Свободные электромагнитные колебания .....	49
§ 9*. Автоколебательная система .....	53
§ 10. Электромагнитные волны .....	56
§ 11. Радиопередача и радиоприём .....	62
Лабораторная работа 2. ....	70
Задания для повторения главы II .....	72

### **Глава III. Волновые свойства света .....** 74

§ 12. Скорость света и её опытное определение. ....	74
§ 13. Законы отражения и преломления света. Полное внутреннее отражение .....	77
§ 14. Линзы .....	83
§ 15. Дисперсия света .....	92
§ 16. Интерференция света .....	95
§ 17. Дифракция света .....	100
§ 18. Поляризация света .....	105
§ 19. Шкала электромагнитных волн .....	108
Лабораторная работа 3. ....	114
Лабораторная работа 4. ....	115

Лабораторная работа 5. ....	116
Лабораторная работа 6. ....	117
Задания для повторения главы III . ....	119
<b>Глава IV. Современные физические теории . ....</b>	<b>122</b>
§ 20. Постулаты специальной теории относительности . ....	122
§ 21. Некоторые следствия из постулатов Эйнштейна . ....	125
§ 22. Фотоэффект . ....	130
§ 23. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм. Давление света . ....	135
Задания для повторения главы IV . ....	141
<b>Глава V. Физика атома и атомного ядра . ....</b>	<b>144</b>
§ 24. Модели строения атома. Постулаты Бора . ....	144
§ 25. Спектры и спектральный анализ . ....	151
§ 26. Методы наблюдения и регистрации частиц . ....	156
§ 27. Состав ядра атома . ....	159
§ 28. Радиоактивность . ....	163
§ 29. Радиоактивные изотопы. Энергия связи атомных ядер . ....	169
§ 30. Ядерная энергия . ....	174
§ 31. Элементарные частицы. ....	180
Задания для повторения главы V . ....	186
<b>Глава VI. Строение Вселенной . ....</b>	<b>189</b>
§ 32. Космические исследования. Солнечная система . ....	189
§ 33. Природа Солнца и звёзд. Физические характеристики звёзд . ....	195
§ 34. Происхождение и эволюция звёзд . ....	204
§ 35. Галактики. Наша Галактика . ....	209
§ 36. Вселенная. Расширение Вселенной . ....	215
Задания для повторения главы VI . ....	220
Приложение 1 . ....	221
Приложение 2 . ....	221
Приложение 3 . ....	222