

Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик



Физика

11

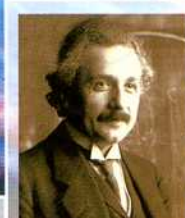
К Л А С С

Ч А С Т Ь

1

УЧЕБНИК

БАЗОВЫЙ
И УГЛУБЛЁННЫЙ
УРОВНИ



$$E = mc^2$$



ИЗДАТЕЛЬСТВО



МНЕМОЗИНА

Л. Э. Генденштейн
Ю. И. Дик

Физика

11

КЛАСС

в двух частях

ЧАСТЬ

1

УЧЕБНИК

для учащихся
общеобразовательных организаций

**БАЗОВЫЙ
И УГЛУБЛЁННЫЙ
УРОВНИ**

Под редакцией В. А. Орлова

*Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации*



Москва 2014

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
Г34

Генденштейн Л. Э.

Г34 Физика. 11 класс. В 2 ч. Ч. 1 : учебник для учащихся общеобразовательных организаций (базовый и углублённый уровни) / Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик ; под ред. В. А. Орлова. — М. : Мнемозина, 2014. — 384 с. : ил.

ISBN 978-5-346-02898-7

В учебнике изложены основы электродинамики, оптики, квантовой физики, атомной физики, астрофизики и элементы теории относительности. Учебник предназначен для изучения физики на базовом и углублённом уровнях в соответствии с ФГОС. Используется системно-деятельностный подход в обучении, способствующий формированию универсальных учебных действий. Многие задания погружены непосредственно в текст параграфа, поэтому параграфы можно использовать как сценарии уроков. В каждой главе имеется раздел «Готовимся к ЕГЭ. Ключевые ситуации в задачах». Цветные иллюстрации делают учебник наглядным, доступным и интересным для учащихся.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

Учебное издание

Генденштейн Лев Элевич, Дик Юрий Иванович

ФИЗИКА

11 класс

В двух частях

Часть 1

УЧЕБНИК

для учащихся общеобразовательных организаций
(базовый и углублённый уровни)

Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Школьная».
Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,0. Тираж 5000 экз. Заказ № 3873.

Издательство «Мнемозина».
105043, Москва, ул. 6-я Парковая, 29б.
Тел.: 8 (499) 367 5418, 367 6781.
E-mail: ioc@mnezina.ru
www.mnezina.ru

ИНТЕРНЕТ-магазин.
Тел.: 8 (495) 783 8284, 783 8286.
www.shop.mnezina.ru

Отпечатано в ОАО «Первая Образцовая типография»,
филиал «Ульяновский Дом печати».
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14.

ISBN 978-5-346-02877-2 (общ.)
ISBN 978-5-346-02898-7 (ч. 1)

© «Мнемозина», 2014
© Оформление. «Мнемозина», 2014
Все права защищены

ИЗУЧАЕМ ФИЗИКУ ВМЕСТЕ

Расскажи мне — и я забуду,
Покажи мне — и я запомню,
Вовлеку меня — и я научусь.

Конфуций

Изучить физику — это значит научиться решать задачи!

Почему физику считают самым трудным школьным предметом? Конечно, из-за *задач*!

Однако, если вы *научитесь* решать задачи по физике, она превратится из самого трудного предмета в самый *интересный*. Ведь решение задач требует смекалки, а кто из вас не любит компьютерных игр или детективных историй, где нужна смекалка и где догадка доставляет радость!

Надеемся, что этот учебник станет вашим добрым помощником в *обучении решению задач*. Живая ткань физики не разрезана здесь на «теорию» и «задачи» (давайте, мол, сначала выучим теорию, а потом будем применять её к решению задач).

Дело в том, что разделение физики на «теорию» и «задачи» *искусственно*: ведь все физические *теории* учёные строили, решая конкретные *задачи*, а *понять* теорию можно, только решая *задачи*!

Мы предлагаем вам изучать физику **ВМЕСТЕ**. Вы скоро убедитесь, что *сами* можете легко вывести большинство формул (мы будем всё время *помогать* вам!). И тогда вы действительно *поймёте* их и научитесь ими пользоваться.

Вместе с вами мы *будем исследовать* ситуации, лежащие в основе подавляющего большинства экзаменационных задач. Таких ситуаций (мы называем их *ключевыми*) во много раз меньше, чем разных задач. Поэтому исследовать все ключевые ситуации *можно*, а *запомнить* решения всех задач невозможно.

Научившись *исследовать*, вы не растеряетесь на экзамене перед *новой* задачей, потому что с помощью исследования можно решить даже довольно трудную задачу. «Подстановкой формул» тут не обойтись: надо *понимать*, о каких явлениях идёт речь и каковы их особенности. *Заучив* же решения даже тысяч задач, вы не сможете решить новую задачу, отличающуюся от заученных. А такие задачи будут!

Как построен этот учебник?

Учебник является *двухуровневым* и предназначен для изучения физики на базовом и углублённом уровнях. В связи с этим главы учебника *разделены на две части*.

Первая часть главы соответствует *базовому* уровню. Она содержит все необходимые описания опытов, факты и формулы. Эта часть предназначена *всем* учащимся.

Вторая часть главы под рубрикой «*Готовимся к ЕГЭ: ключевые ситуации в задачах*» предназначена тем, кто изучает физику на *углублённом* уровне (или, занимаясь на базовом уровне, готовится сдавать ЕГЭ по физике). Изучая вторую часть главы, вы сможете принять участие в *совместном* исследовании ключевых ситуаций.

В тексте каждого параграфа содержится много заданий. Их достаточно для тех, кто изучает физику на базовом уровне. Дополнительные задания, помещённые в конце параграфов, предназначены в основном для углублённого изучения физики.

Действуй!

Сколько бы вы ни *смотрели* на игру в футбол, вы не сможете после этого играть *сами*. *Научиться* чему-либо можно только *действуя*: другого способа научиться *нет!*

Поэтому сразу берите ручку и начинайте *вместе с нами* решать задачи буквально с первой страницы учебника.

Мы всё время будем рядом: к трудным задачам мы подобрали более простые подготовительные, ко многим заданиям даём подсказки и указания.

Не сдавайтесь, и вы научитесь решать задачи!

Углубить и расширить свои знания, а также узнать о других учебных проектах можно с помощью интернет-ресурсов, приведённых на стр. 367.

Часть 1

УЧЕБНИК

Электродинамика

Глава 1 **Магнитное поле**

Глава 2 **Электромагнитная индукция**

Колебания и волны

Глава 3 **Колебания**

Глава 4 **Волны**

Оптика

Глава 5 **Геометрическая оптика**

Глава 6 **Волновая оптика**

Теория относительности

Глава 7 **Элементы теории относительности**

Квантовая физика

Глава 8 **Кванты и атомы**

Глава 9 **Атомное ядро и элементарные частицы**

Астрономия и астрофизика

Глава 10 **Солнечная система**

Глава 11 **Звёзды, галактики, Вселенная**



**§ 1. МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ****1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

Свойства постоянных магнитов уже знакомы вам из курса физики основной школы. Вспомнить их вам помогут следующие задания.

- ?** 1. На рисунке 1.1 схематически изображены опыты по взаимодействию двух полюсовых магнитов. Какой цифрой обозначен северный полюс расположенного справа магнита на рисунках *а* и *б*?

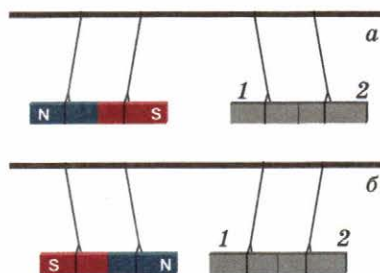


Рис. 1.1

- ?** 2. Какой магнитный полюс Земли находится вблизи её Северного географического полюса — северный или южный? Обоснуйте свой ответ.

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что магниты притягиваются разноимёнными полюсами.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ**Взаимодействие прямолинейных проводников с током**

В начале 19-го века датский физик Х. Эрстед обнаружил, что находящаяся вблизи проводника магнитная стрелка поворачивается, если включить в проводнике ток. Это означало, что *проводники с током обладают магнитными свойствами.*

Французский физик А. Ампер решил изучить на опыте: как взаимодействуют проводники с током?

**Поставим опыт**

Расположим два прямолинейных проводника¹ параллельно друг другу.

Если по ним текут токи в *одном* направлении, проводники *притягиваются* (рис. 1.2, *а*).

¹ Обычно в этом опыте в качестве проводников используют ленты из фольги.

Если же токи в параллельных проводниках текут в *противоположных* направлениях, то проводники *отталкиваются* (рис. 1.2, б).

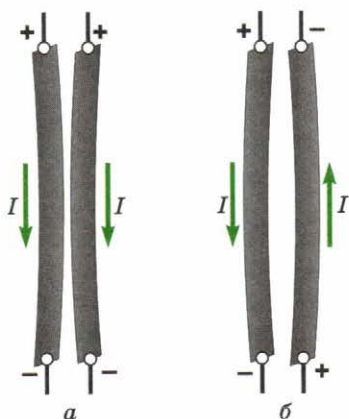


Рис. 1.2

? 3. Почему взаимодействие проводников с током нельзя рассматривать как электрическое?

Единица силы тока

Взаимодействие проводников с током используют для определения единицы силы тока в СИ. В честь А. Ампера единицу силы тока назвали *ампер* (обозначают А).

Если сила тока в каждом из двух параллельных бесконечно длинных проводников очень малого сечения, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, равна 1 А, причём ток в проводниках направлен одинаково, то эти проводники притягиваются с силой, равной $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Напомним: единица электрического заряда *кулон* (Кл) связана с единицей силы тока *ампер* соотношением $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

Взаимодействие витков и катушек с током

Заменим прямолинейные проводники круговыми витками с током.

? 4. На рисунке 1.3 изображены круговые витки и показано направление тока в каждом из них. В каком случае (а или б) витки будут притягиваться, а в каком — отталкиваться?

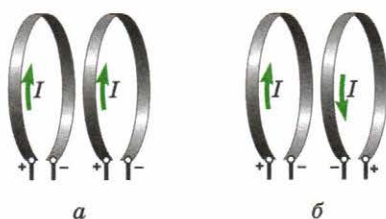


Рис. 1.3

Подсказка. Сравните взаимодействие витков и прямолинейных проводников.

На рисунке 1.4 схематически изображен аналогичный опыт для катушек с током. Мы видим, что *катушки с током взаимодействуют подобно полосовым магнитам*: у таких катушек тоже есть «одноимённые» и «разноимённые» полюса.

- ?** 5. Какой цифре (1 или 2) соответствует знак «плюс» на рисунках 1.4, а и б?

3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Гипотеза Ампера

Тот факт, что катушки с током взаимодействуют подобно постоянным полосовым магнитам, навёл Ампера на мысль, что магнитные свойства магнитов обусловлены циркулирующими незатухающими «молекулярными» токами (рис. 1.5, а).

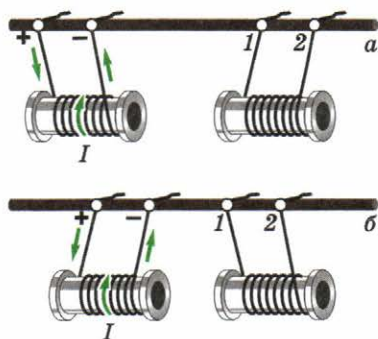


Рис. 1.4

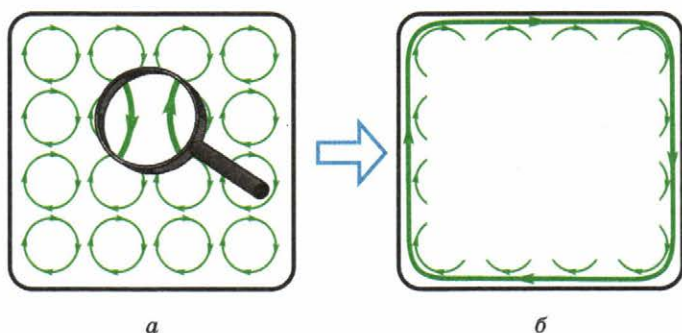


Рис. 1.5

Внутри магнита соседние молекулярные токи направлены противоположно и поэтому компенсируют друг друга. А вот вблизи поверхности эти токи текут в *одном* направлении, как бы образуя ток, обтекающий поверхность магнита, в результате чего магнит становится подобен катушке с током (рис. 1.5, б).

- ?** 6. Как гипотеза Ампера объясняет то, что невозможно получить магниты только с одним полюсом (северным или южным)?

Ферромагнетики

При изучении строения вещества гипотеза Ампера подтвердилась лишь частично. Выяснилось, что «молекулярные» токи действительно существуют и обусловлены движением электронов в атомах.

Но оказалось, что магнитные свойства *постоянных* магнитов связаны не с этими «молекулярными» токами, а с тем, что каждый электрон сам по себе представляет крошечный магнетик¹. В некоторых веществах, называемых *ферромагнетиками* (к их числу относится *железо*), при определённых условиях² сравнительно небольшая часть всех электронов может ориентироваться *одинаково*. Но этого достаточно для того, чтобы образец вещества стал постоянным магнитом.

При нагревании ферромагнетика до определённой температуры (для железа — до 753 °С) его магнитные свойства исчезают. Эту температуру называют *точкой Кюри* в честь французского физика П. Кюри.

4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное взаимодействие, подобно электрическому, осуществляется посредством поля, которое называют *магнитным*.

Источники магнитного поля

Во-первых, как мы видели, магнитное поле создаётся *электрическими токами*. А поскольку электрический ток — это направленное движение заряженных частиц, мы приходим к выводу, что магнитное поле создаётся *движущимися электрическими зарядами*.

Вторым источником магнитного поля являются *постоянные магниты*, свойства которых объясняются магнитными свойствами электронов.

Наконец, третьим источником магнитного поля является, как мы увидим в следующих главах, *изменяющееся во времени электрическое поле*.

Магнитное поле проявляется в действии на проводники с током, на движущиеся электрические заряды и на постоянные магниты.

Вектор магнитной индукции

Магнитное поле в данной точке характеризуют *векторной величиной*, которую называют *магнитной индукцией* и обозначают \vec{B} . Для определения направления вектора *магнитной*

¹ Магнитные свойства электрона могут быть объяснены только с помощью квантовой теории. Это объяснение выходит за рамки школьного курса физики.

² К их числу относятся наличие внешнего магнитного поля, а также температура, которая должна быть ниже так называемой *точки Кюри*, характеризующей данный ферромагнетик.

индукции используют действие магнитного поля на постоянный магнит — магнитную стрелку.

За направление вектора магнитной индукции \vec{B} принимают направление, на которое указывает северный полюс свободно вращающейся магнитной стрелки (рис. 1.6).

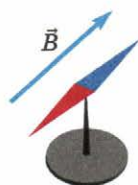


Рис. 1.6

Линии магнитной индукции



Поставим опыт

Посмотрим, как располагаются магнитные стрелки в различных точках вблизи полосового магнита (рис. 1.7).

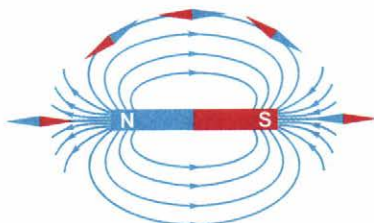


Рис. 1.7

Мы видим, что магнитные стрелки как бы выстраиваются вдоль некоторых *линий*. Их называют *линиями магнитной индукции* или *магнитными линиями*.

Касательная к линии магнитной индукции в данной точке пространства показывает направление вектора магнитной индукции \vec{B} в этой точке.

На рисунке 1.8 изображены линии магнитной индукции поля, создаваемого катушкой с током.

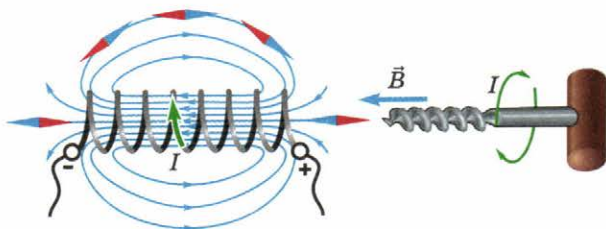


Рис. 1.8

Мы видим, что они похожи на линии магнитной индукции поля, создаваемого полосовым магнитом (см. рис. 1.7).

Отличие состоит в том, что линии магнитной индукции поля, создаваемого катушкой с током, *замкнуты*, а линии магнитной индукции поля, создаваемого полосовым магнитом, *кажутся* незамкнутыми: мы видим, что они выходят из северного полюса и входят в южный полюс.

Но на самом деле *линии магнитной индукции замкнуты всегда*, поскольку магнитных зарядов не существует. Линии магнитной индукции поля, создаваемого полосовым магнитом, тоже *замыкаются*, проходя *внутри* магнита: внутри постоянного магнита существует магнитное поле.

Правило буравчика

Направление линий магнитной индукции *внутри* катушки или витка с током можно определить с помощью следующего правила.

Если вращать буравчик с правой резьбой так, чтобы направление вращения ручки буравчика совпадало с направлением тока в катушке или витке, то направление поступательного движения буравчика покажет направление линий магнитной индукции поля внутри катушки или в центре витка (см. рис. 1.8).

Правило буравчика связывает направление кругового тока в витке или в катушке и направление вектора магнитной индукции поля, созданного этим током. Если задано одно из этих направлений (*любое!*), то с помощью правила буравчика мы можем найти другое направление.

? 7. На столе лежит круговой проволочный виток, в котором течёт ток по часовой стрелке. Как направлен вектор магнитной индукции поля, созданного этим током, в центре витка?

? 8. На стене укреплен проволочный круговой виток, в котором течёт ток. Вектор магнитной индукции поля, созданного этим током, направлен в центре витка в сторону стены. Сделайте пояснительный рисунок, на котором укажите направление тока в витке и направление движения свободных электронов.

Рассмотрим теперь, какой вид имеют линии магнитной индукции поля, создаваемого *прямолинейным* проводником с током.

Эти линии изображены на рисунке 1.9. Они имеют вид концентрических окружностей. Направление линий магнитной индукции и в этом случае можно определить с помощью правила буравчика.

Если вращать буравчик с правой резьбой так, чтобы направление его поступательного движения совпадало с направлением тока, то направление вращения ручки буравчика покажет направление линий магнитной индукции поля, созданного этим током.

Для обозначения на чертежах вектора или тока, перпендикулярных плоскости рисунка, мы будем использовать обозначения¹, показанные на рисунке 1.10.

Вы видите схематическое изображение:

— линий магнитной индукции, направленных «от нас» и «к нам»;

— тока в проводнике, направленного «от нас» и «к нам»;

— силы, направленной «от нас» и «к нам».

? 9. На рисунке 1.11 изображены два проводника с током. Каково направление вектора магнитной индукции поля, создаваемого каждым из этих токов, в точках А и С?

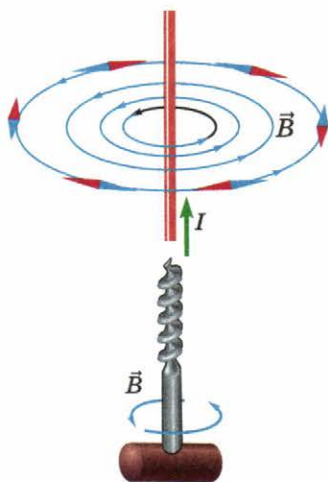


Рис. 1.9

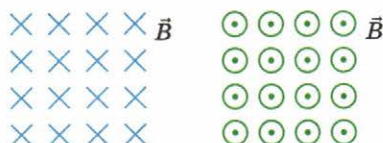


Рис. 1.10

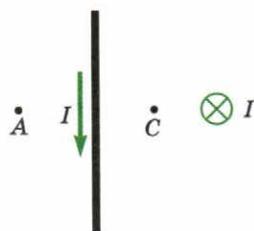


Рис. 1.11

¹ Эти обозначения объясняются сопоставлением вектора со стрелой, имеющей хвостовое оперение.

Принцип суперпозиции

Для магнитного поля, так же как и для электрического, справедлив *принцип суперпозиции*. Он гласит, что вектор магнитной индукции поля, создаваемого несколькими источниками поля, равен векторной сумме векторов магнитной индукции полей, создаваемых каждым источником поля.

Примените принцип суперпозиции в следующем задании.

- ?** 10. По двум параллельным прямолинейным проводникам текут токи (рис. 1.12). В точке A модуль магнитной индукции поля, созданного каждым из этих токов, равен B . Чему равен модуль магнитной индукции поля, созданного обоими токами в точке A , для случаев, изображённых на рисунках a и b ?

Можно ли «увидеть» линии магнитной индукции?

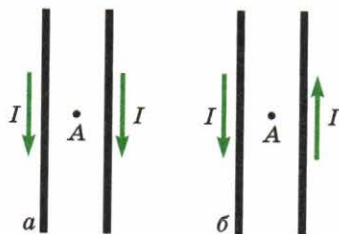


Рис. 1.12

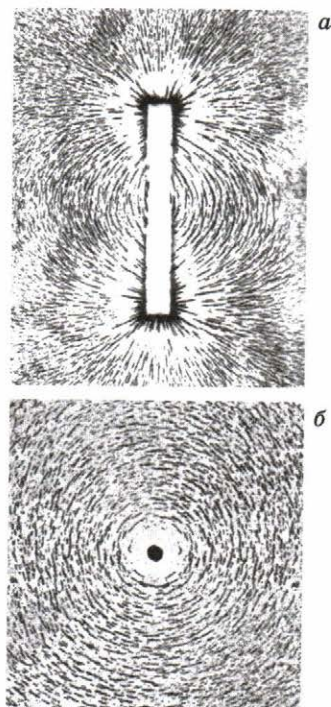


Рис. 1.13

Поставим опыт

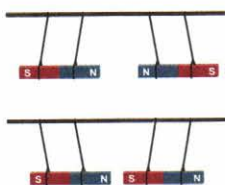
Насыпем на бумагу металлические опилки и поместим их вблизи постоянного магнита или прямолинейного проводника с током. Опилки намагнитятся, превратившись в крошечные магнитные стрелки, и выстроятся вдоль линий магнитной индукции (рис. 1.13).

- ?** 11. Какой из рисунков 1.13, a , b иллюстрирует опыт с прямолинейным проводником с током, а какой — опыт с полосовым магнитом?

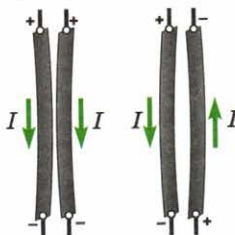


Магнитное взаимодействие

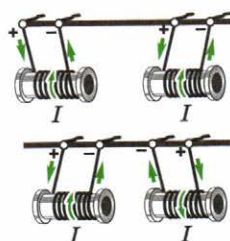
Взаимодействие постоянных магнитов



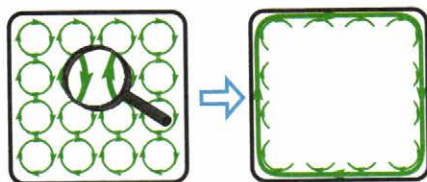
Взаимодействие проводников с током



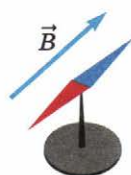
Взаимодействие катушек с током



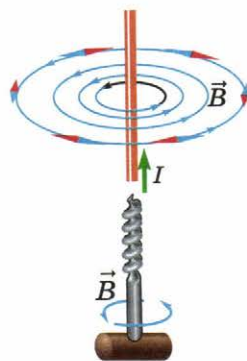
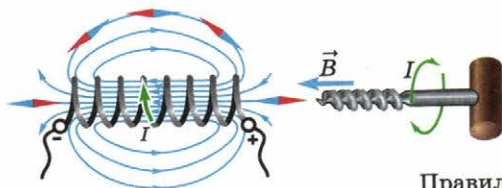
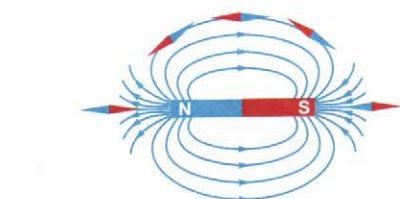
Гипотеза Ампера



Вектор магнитной индукции



Линии магнитной индукции



Правило буравчика



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

12. На рисунке 1.14 изображена схема опыта Эрстеда, в котором было впервые обнаружено магнитное действие проводника с током. Магнитная стрелка находится под проводником.

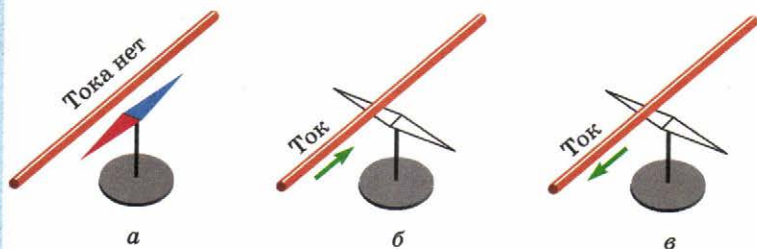


Рис. 1.14

- а) Как расположен проводник на рисунке *а*: вдоль географического меридиана или перпендикулярно ему?
б) Перенесите рисунки *б* и *в* схематически в тетрадь и обозначьте на них соответствующими цветами полюса магнитной стрелки.
- Подсказка.* Воспользуйтесь правилом буравчика.

13. На рисунке 1.15 изображён подковообразный магнит. Перенесите рисунок в тетрадь и нарисуйте картину линий магнитной индукции поля, создаваемого этим магнитом. Обозначьте направления этих линий.



Рис. 1.15

14. Верхний конец мягкой пружины соединён с полюсом источника тока (рис. 1.16). Другой полюс источника тока соединён с металлической пластиной. Пластину поднимают до соприкосновения с пружиной, после чего замыкают ключ.
- а) Предскажите, какие явления будут наблюдаться после замыкания ключа.
б) Предложите модель электрического звонка, работающего по изображённой схеме.

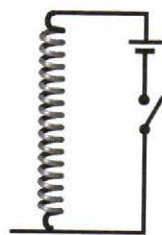


Рис. 1.16

§ 2. ЗАКОН АМПЕРА

1. МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

На проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила со стороны этого поля. Её называют *силой Ампера*, поскольку А. Ампер первым изучал действие магнитного поля на проводники с током.

Опыт показывает, что сила Ампера достигает максимального значения $F_{\text{макс}}$, когда вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику с током (рис. 2.1). Поэтому такое расположение проводника с током удобно выбрать для определения модуля магнитной индукции.

Опыт показывает также, что значение $F_{\text{макс}}$ прямо пропорционально длине проводника l и силе тока I :

$$F_{\text{макс}} \sim Il.$$

Поэтому отношение $\frac{F_{\text{макс}}}{Il}$ не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём, а является характеристикой магнитного поля в том месте, где находится данный проводник. Следовательно, это отношение можно принять в качестве определения модуля магнитной индукции.

Модуль магнитной индукции равен отношению силы, действующей на проводник с током, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, к произведению силы тока в проводнике на длину проводника:

$$B = \frac{F_{\text{макс}}}{Il}. \quad (1)$$

За единицу магнитной индукции в СИ принимают магнитную индукцию поля, действующего с силой 1 Н на проводник длиной 1 м, по которому течёт ток силой 1 А, если проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции



Андре-Мари Ампер
(1775–1836)

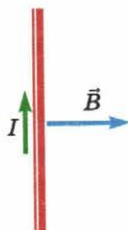


Рис. 2.1

данного поля. Эту единицу магнитной индукции называют *тесла* (обозначают Тл) в честь сербо-американского учёного Н. Тесла. В соответствии с определением, $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

2. ЗАКОН АМПЕРА

Из формулы (1) следует: если проводник с током перпендикулярен вектору магнитной индукции, модуль силы Ампера

$$F_{\text{макс}} = BIl.$$

Если же прямолинейный проводник расположен под углом α к направлению вектора магнитной индукции (рис. 2.2), то, как показывает опыт, модуль силы Ампера выражается формулой

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (2)$$

Эту закономерность, установленную на опыте Ампером, называют *законом Ампера*.

Обратите внимание на одно из следствий формулы (2): *если проводник с током параллелен вектору магнитной индукции, сила Ампера равна нулю*.

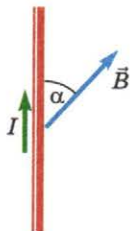


Рис. 2.2

- ?** 1. Чему равен модуль силы Ампера, действующей на проводник с током, если:
- $B = 0,1 \text{ Тл}; I = 2 \text{ А}; l = 50 \text{ см}; \alpha = 0^\circ?$
 - $B = 0,1 \text{ Тл}; I = 2 \text{ А}; l = 50 \text{ см}; \alpha = 30^\circ?$
- ?** 2. На проводник длиной $l = 25 \text{ см}$, расположенный под углом $\alpha = 60^\circ$ к направлению вектора магнитной индукции, действует сила Ампера $F = 0,2 \text{ Н}$. Сила тока в проводнике $I = 0,3 \text{ А}$. Составьте задачу по этим данным и решите её.
- ?** 3. На прямолинейный проводник действует сила Ампера $F = 0,25 \text{ Н}$. Длина проводника $l = 50 \text{ см}$, модуль магнитной индукции $B = 2 \text{ Тл}$, сила тока в проводнике $I = 0,5 \text{ А}$. Составьте задачу по этим данным и решите её.
- ?** 4. На проводник длиной $l = 50 \text{ см}$, расположенный под углом $\alpha = 30^\circ$ к вектору магнитной индукции, действует сила Ампера $F = 0,1 \text{ Н}$. Индукция магнитного поля $B = 0,1 \text{ Тл}$. Составьте задачу по этим данным и решите её.

3. ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ

Опыт показывает, что в случае, когда проводник перпендикулярен вектору магнитной индукции, направление силы Ампера можно определить по следующему правилу.

Если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на проводник (рис. 2.3).

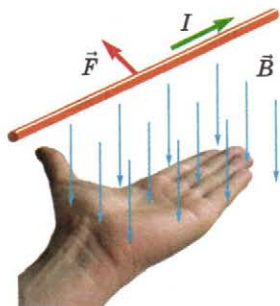


Рис. 2.3

5. Составьте задачи по рисункам 2.4, а, б, в и решите их.

6. В параллельных проводниках 1 и 2 текут одинаково направленные токи (рис. 2.5).

а) Найдите направление вектора магнитной индукции поля, создаваемого проводником 1, в точке А.

б) Найдите направление силы, действующей со стороны этого поля на проводник 2.

в) Согласуется ли полученный вами результат с опытом по взаимодействию параллельных проводников с током?

Сделайте пояснительный рисунок.

7. Горизонтальный металлический стержень подвешен на нерастяжимых проводах и подключён к источнику тока (рис. 2.6). В области, где находится стержень, включают магнитное поле.

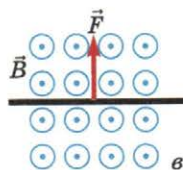
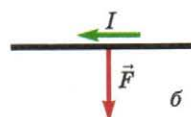
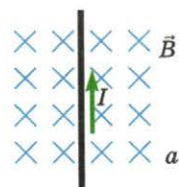


Рис. 2.4

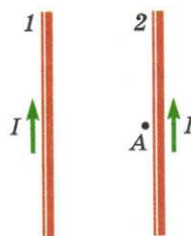


Рис. 2.5

а) Как направлен вектор магнитной индукции (вертикально или горизонтально), если положение стержня осталось прежним?

б) Как направлен вектор магнитной индукции (вертикально или горизонтально), если провода отклонились от вертикали?

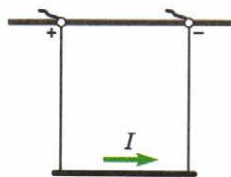


Рис. 2.6

Сделайте в тетради поясняющие рисунки для обоих случаев.

Рассмотрим теперь случай, когда проводник с током не перпендикулярен вектору магнитной индукции.

Прежде всего заметим, что если проводник параллелен вектору магнитной индукции, то, как следует из формулы (2), сила Ампера равна нулю.

Если же проводник не параллелен вектору магнитной индукции, то для нахождения направления силы Ампера надо:

— представить вектор магнитной индукции \vec{B} в виде векторной суммы двух векторов: вектора \vec{B}_{\parallel} , направленного вдоль проводника, и вектора \vec{B}_{\perp} , направленного перпендикулярно проводнику (рис. 2.7).

— использовать правило левой руки, расположив левую руку так, чтобы в раскрытую ладонь входил вектор \vec{B}_{\perp} .

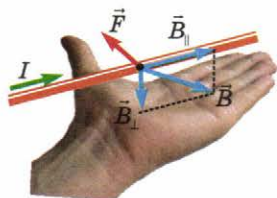


Рис. 2.7

Итак, если угол между проводником и вектором магнитной индукции равен нулю, то сила Ампера равна нулю. А если этот угол не равен нулю, то на проводник действует сила Ампера, перпендикулярная как проводнику, так и вектору магнитной индукции.

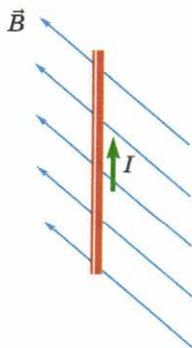


Рис. 2.8

? 8. Вектор магнитной индукции и проводник с током лежат в плоскости рисунка 2.8. Составьте задачу по этому рисунку и решите её.

4. РАМКА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрим жёсткую прямоугольную рамку с током, помещённую в магнитное поле (рис. 2.9). Рамка может вращаться вокруг оси OO_1 .

Рассмотрим сначала случай, когда вектор магнитной индукции параллелен плоскости рамки.

Вертикальные стороны рамки перпендикулярны вектору магнитной индукции, поэтому на них действуют силы Ампера. А поскольку в противоположных вертикальных сторонах рамки текут противоположно направленные токи, силы Ампера будут *поворачивать* рамку вокруг оси OO_1 .

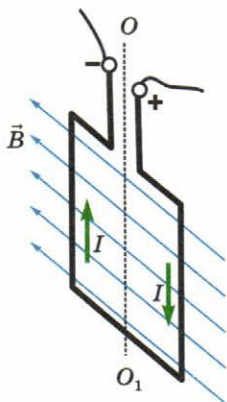


Рис. 2.9

? 9. Перенесите рисунок 2.9 в тетрадь.

а) Изобразите на рисунке силы Ампера, действующие на вертикальные стороны рамки с током.

б) Определите направление вектора магнитной индукции поля $\vec{B}_{\text{рам}}$, создаваемого током рамки в её центре.

в) Определите, как будет изменяться угол между \vec{B} и $\vec{B}_{\text{рам}}$ при повороте рамки под действием сил, действующих со стороны внешнего магнитного поля: увеличиваться или уменьшаться?

Итак, в результате действия сил Ампера рамка будет поворачиваться так, чтобы вектор магнитной индукции поля, создаваемого током в рамке, совпадал по направлению с вектором магнитной индукции внешнего поля.

Как мы скоро увидим, поворот рамки в магнитном поле лежит в основе действия электроизмерительных приборов и электродвигателей.

Но всегда ли силы Ампера *поворачивают* рамку с током?

? 10. На рисунках 2.10 и 2.11 схематически изображены рамки с током в магнитном поле. Рамки могут вращаться вокруг оси OO_1 .

а) Объясните, почему в каждом из этих случаев момент сил Ампера, приложенных к сторонам рамки, равен нулю.

Подсказка. Примените правило левой руки.

б) В каком из изображённых случаев рамка будет находиться в положении устойчивого равновесия?

Подсказка. Рассмотрите силы Ампера, действующие на боковые стороны рамки при небольшом отклонении её от показанного положения, и определите, в каком случае они будут возвращать рамку к исходному положению, а в каком — удалять её от него.

в) Когда рамка находится в положении *устойчивого* равновесия, действующие на её стороны силы Ампера растягивают рамку или сжимают её?

5. ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЫ АМПЕРА

Электроизмерительные приборы

Рисунок 2.12 иллюстрирует принцип действия электроизмерительного прибора (например, амперметра). Между полюсами магнита расположена проводящая рамка, к которой прикреплена стрелка прибора.

Когда тока в рамке нет, стрелка указывает на нулевое деление шкалы прибора (в этом положении стрелку или рамку удерживает пружинка).

Если в рамке идёт ток, то силы Ампера будут её поворачивать. Чем больше сила тока в рамке, тем больше силы Ампера и, значит, тем на больший угол повернётся рамка.

Электродвигатель

На повороте рамки с током в магнитном поле основан также принцип действия электродвигателя. На рисунке 2.13, а изображена модель электродвигателя с одной рамкой.

Ток к рамке подводят с помощью *коллектора*. Он представляет собой два металлических полукольца, припаянные к

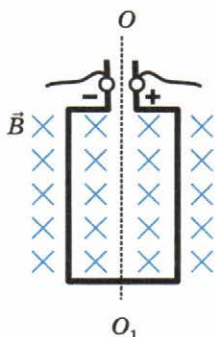


Рис. 2.10

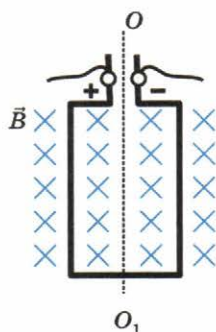


Рис. 2.11

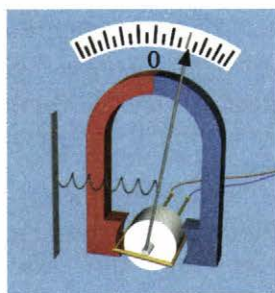


Рис. 2.12

рамке. К кольцам подводят ток с помощью скользящих контактов (обычно из графита — так называемые графитовые щётки).

Благодаря коллектору направление тока в рамке меняется на противоположное через каждые пол-оборота. Это необходимо для того, чтобы действующие на стороны рамки силы Ампера вращали рамку *в одном и том же* направлении.

Для усиления вращающего эффекта в электродвигателях используют обычно много рамок. Вращающуюся часть электродвигателя называют ротором. На рисунке 2.13, б изображён ротор электродвигателя, коллектор которого состоит не из двух колец, а из многих пар пластинок.

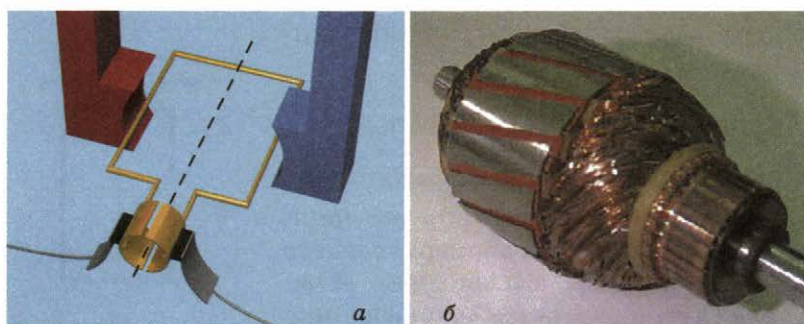


Рис. 2.13

Громкоговоритель

На рисунке 2.14 схематически изображено устройство электродинамического громкоговорителя (динамика).

Сила тока в катушке 1 изменяется (частота её изменения равна звуковой частоте). При этом изменяется сила взаимодействия между катушкой и постоянным магнитом, северный полюс которого обозначен цифрой 2. В результате катушка совершает колебания со звуковой частотой. К катушке прикреплён конус 3 из плотной бумаги, который колеблется вместе с катушкой, порождая звуковые волны.

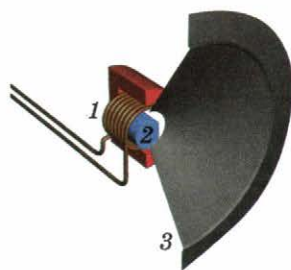


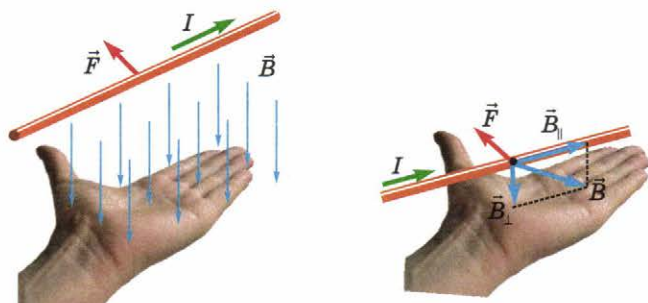
Рис. 2.14



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Закон Ампера $F = BIl \sin \alpha$

Правило левой руки



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

11. Когда в прямолинейном проводнике включили ток, проводник изогнулся, как показано на рисунке 2.15. Составьте задачу по этим данным и решите её.
12. Горизонтальный металлический стержень длиной $l = 50$ см подвешен на двух проводах (см. рис. 2.6) и находится в магнитном поле, вектор магнитной индукции которого направлен вертикально. Масса стержня $m = 50$ г, массой проводов можно пренебречь. Сила тока в проводнике $I = 2$ А, модуль магнитной индукции $B = 0,5$ Тл.
 - а) Изобразите на чертеже в тетради силы, действующие на проводник, когда он находится в равновесии.
 - б) Чему равен угол отклонения проводов от вертикали?
 - в) Чему равна сила натяжения каждого провода?
13. Найдите в Интернете: какое самое сильное магнитное поле смогли получить учёные в настоящее время?



Рис. 2.15

§ 3. СИЛА ЛОРЕНЦА

1. МОДУЛЬ СИЛЫ ЛОРЕНЦА

В предыдущем параграфе мы рассматривали силу Ампера, действующую на проводник с током, помещённый в магнитное поле. Но проводник с током отличается от проводника, в котором тока нет, только тем, что в проводнике с током есть *направленное движение заряженных частиц*. Следовательно,

магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы.

Силу, действующую на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, называют *силой Лоренца* в честь голландского физика Х. Лоренца, изучавшего движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

Модуль и направление силы Лоренца можно найти, зная модуль и направление силы Ампера.

Докажем, что когда скорость заряженной частицы \vec{v} перпендикулярна вектору магнитной индукции \vec{B} (рис. 3.1), модуль силы Лоренца выражается формулой

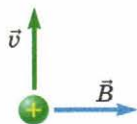


Рис. 3.1

$$F_{\text{Л}} = Bqv, \quad (1)$$

где q — заряд частицы.

Как мы уже знаем, модуль силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током, перпендикулярный вектору магнитной индукции, выражается формулой (см. § 2):

$$F_{\text{А}} = BIl, \quad (2)$$

где B — модуль магнитной индукции, I — сила тока в проводнике, l — длина проводника.

По определению, сила тока

$$I = \frac{Q}{t}, \quad (3)$$

где Q — заряд, который проходит через поперечное сечение проводника за время t .

В качестве t удобно выбрать промежуток времени, в течение которого все свободные заряды, содержащиеся в проводнике длиной l , пройдут через поперечное сечение проводника.

Если обозначить v среднюю скорость направленного движения свободных зарядов, то

$$t = \frac{l}{v}. \quad (4)$$

За время t через поперечное сечение проводника пройдёт заряд

$$Q = Nq, \quad (5)$$

где N число свободных зарядов в этом проводнике, q — величина каждого из них.

Подставив в формулу (3) выражения (4) и (5), получим:

$$I = \frac{Nqv}{l}.$$

Подставим теперь это выражение для силы тока в формулу (2) для силы Ампера. Мы получим

$$F_A = NBqv. \quad (6)$$

Учтём теперь, что сила Ампера действует на *все* N свободных зарядов в проводнике, а сила Лоренца — только на *один* заряд. Следовательно,

$$F_L = \frac{F_A}{N}. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) следует, что

$$F_L = Bqv.$$

Доказательство завершено.

Подобным же образом можно доказать, что если скорость заряженной частицы направлена под углом α к вектору магнитной индукции (рис. 3.2), то модуль силы Лоренца выражается формулой

$$F_L = Bqv \sin \alpha. \quad (8)$$

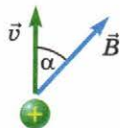


Рис. 3.2

Обратите внимание: *если скорость частицы параллельна вектору магнитной индукции, то сила Лоренца равна нулю.*

- ?** 1. Электрон движется со скоростью $v = 10$ км/с вблизи поверхности Земли. Индукция магнитного поля Земли в средних широтах составляет около $5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Во сколько раз сила, действующая на электрон со стороны магнитно-

го поля Земли, больше силы тяжести, если скорость электрона направлена:

- перпендикулярно вектору магнитной индукции?
- под углом 30° к вектору магнитной индукции?

2. НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ ЛОРЕНЦА

Напомним, что за направление тока условно принято направление движения *положительных* носителей заряда. Поэтому направление силы Лоренца, действующей на *положительно* заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, определяется так же, как и направление силы Ампера с заменой направления тока на направление скорости частицы.

Если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление скорости *положительно* заряженной частицы, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на эту частицу (рис. 3.3).

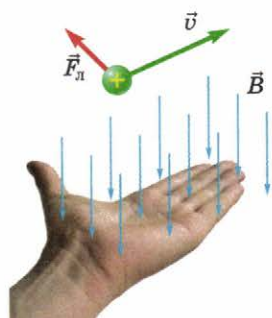


Рис. 3.3

На движущуюся в магнитном поле *отрицательно* заряженную частицу (например, электрон) сила Лоренца действует в направлении, *противоположном* направлению действия этой силы на положительно заряженную частицу.

- ?** 2. Составьте задачи по рисункам 3.4, а, б, в и решите их.

Рассмотрим теперь случай, когда скорость заряженной частицы не перпендикулярна вектору магнитной индукции.

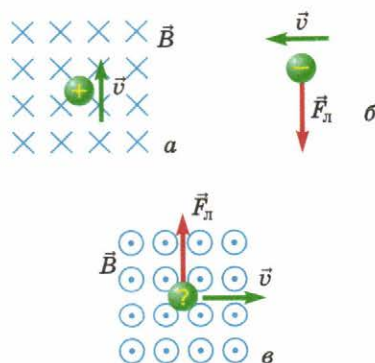


Рис. 3.4

Если скорость частицы параллельна вектору магнитной индукции, то, как следует из формулы (8), сила Лоренца равна нулю.

Если же скорость частицы не параллельна вектору магнитной индукции, то для нахождения направления силы Лоренца надо:

— представить вектор магнитной индукции \vec{B} в виде суммы двух векторов: вектора \vec{B}_{\parallel} , параллельного скорости частицы, и вектора \vec{B}_{\perp} , перпендикулярного скорости частицы (рис. 3.5).

— использовать правило левой руки, расположив её так, чтобы в раскрытую ладонь входил вектор \vec{B}_{\perp} .

Обратите внимание: угол между направлением скорости частицы и вектором магнитной индукции может быть любым. А вот сила Лоренца (если она не равна нулю) всегда перпендикулярна как скорости частицы, так и вектору магнитной индукции.

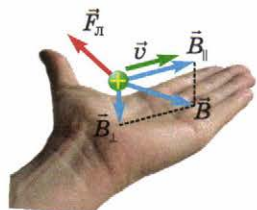


Рис. 3.5

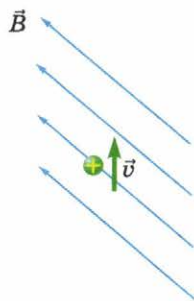


Рис. 3.6

? 3. Вектор магнитной индукции и скорость положительно заряженной частицы лежат в плоскости рисунка 3.6. Составьте задачу по этому рисунку и решите её.

3. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрим движение заряженной частицы в *однородном* магнитном поле, то есть в таком поле, вектор магнитной индукции \vec{B} которого во всех точках одинаков по модулю и по направлению.

Характерная особенность силы Лоренца состоит в том, что она всегда *перпендикулярна скорости частицы*. Поэтому она не может изменить модуль скорости частицы и *изменяет только направление* её скорости.

? 4. Может ли вследствие действия силы Лоренца измениться кинетическая энергия частицы?

5. Объясните, почему работа силы Лоренца при движении частицы в магнитном поле равна нулю.

Если скорость заряженной частицы \vec{v} направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции \vec{B} , то частица будет двигаться в магнитном поле по окружности (рис. 3.7). При этом сила Лоренца, направленная перпендикулярно скорости частицы, будет сообщать ей центростремительное ускорение.

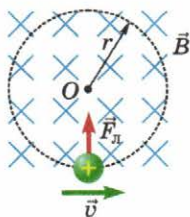


Рис. 3.7

6. Объясните, почему радиус окружности, по которой будет двигаться частица, определяется формулой

$$r = \frac{mv}{qB}, \quad (9)$$

где m — масса частицы, v — модуль скорости частицы, q — модуль заряда частицы, B — модуль магнитной индукции.

Подсказка. Воспользуйтесь вторым законом Ньютона, выражением для центростремительного ускорения (через скорость и радиус) и выражением для силы Лоренца.

7. Объясните, почему период T обращения частицы не зависит от её скорости.

Подсказка. Воспользуйтесь формулой $T = \frac{2\pi r}{v}$.

8. Протон и электрон влетают с одинаковой горизонтальной скоростью в однородное магнитное поле, вектор магнитной индукции которого направлен вертикально вверх. Обе частицы начинают двигаться по окружностям.

а) В каком направлении будет двигаться по окружности электрон — по часовой стрелке или против неё (если смотреть сверху)?

б) Какая частица будет двигаться по окружности большего радиуса? Чему равно отношение радиусов окружностей?

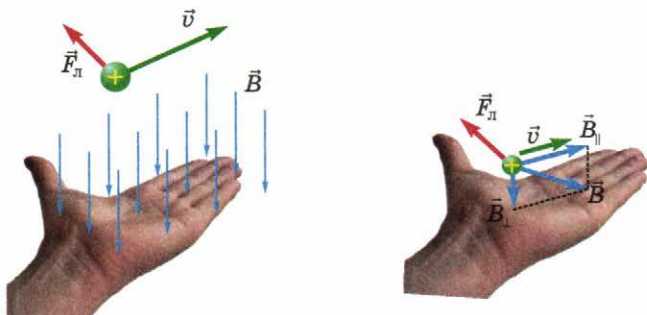
в) Для какой частицы период обращения будет больше? Во сколько раз больше?



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Сила Лоренца $F_{\text{л}} = Bqv \sin \alpha$

Направление силы Лоренца



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

9. Может ли заряженная частица в однородном магнитном поле двигаться равномерно и прямолинейно? Если да, то как направлена при этом скорость частицы относительно направления вектора магнитной индукции? Сделайте пояснительный рисунок.
10. Заряженная частица влетела с горизонтально направленной скоростью в магнитное поле. Вектор магнитной индукции поля направлен вертикально вверх, модуль магнитной индукции равен 2 Тл. Частица начала двигаться по окружности радиусом 0,5 м по часовой стрелке, делая один оборот за 0,01 с.
- Каков знак заряда частицы?
 - Чему равен удельный заряд частицы (отношение заряда частицы к её массе)?
 - Как изменятся (уменьшатся или увеличатся) радиус и период обращения частицы, если она в результате ультрафиолетового облучения потеряет несколько электронов? Изменением массы частицы можно пренебречь.
 - Есть ли в условии лишние данные?



§ 4. ПРОВОДНИКИ И ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

1. ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Эту ситуацию мы уже начали рассматривать в § 2. Продолжим рассмотрение на более сложных примерах, которые помогут вам вспомнить законы механики.

Металлический стержень, подвешенный на проводах



1. Металлический стержень длиной l и массой m подвешен на двух проводящих нитях длиной L каждая (рис. 4.1). Система находится в однородном магнитном поле. Вектор магнитной индукции направлен вертикально вниз, модуль магнитной индукции равен B . После того как по стержню пропустили кратковременный ток, он совершил полный оборот по окружности. Соппротивлением воздуха, а также углом отклонения нитей от вертикали за время протекания тока можно пренебречь.

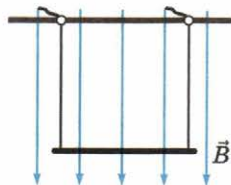


Рис. 4.1

а) Обозначим q заряд, который прошёл по стержню за время протекания тока. Чему равен импульс силы Ампера, действовавшей на стержень?

Подсказка. Импульс силы равен $F\Delta t$, где F — модуль силы, Δt — время действия силы. Воспользуйтесь соотношением между зарядом, силой тока и временем протекания тока.

б) Какова скорость стержня сразу после выключения тока?

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что изменение импульса тела равно импульсу действовавшей на тело силы.

в) При какой минимальной скорости стержня в верхней точке окружности он сможет сделать полный оборот?

Подсказка. При минимально возможной скорости натяжение нитей обращается в верхней точке окружности в нуль. При этом центростремительное ускорение стержню сообщает только сила тяжести.

г) При какой минимальной скорости стержня в нижней точке окружности он сможет сделать полный оборот?

Подсказка. Воспользуйтесь законом сохранения энергии, согласно которому сумма кинетической и потенциальной энергий стержня в верхней и нижней точках окружности одинакова.

д) Какой минимальный заряд должен пройти по стержню, чтобы он совершил полный оборот по окружности?

е) Чему равен этот минимальный заряд, если $m = 20$ г, $L = 60$ см, $B = 0,1$ Тл, $l = 15$ см?

Металлический стержень на проводящих направляющих

? 2. На горизонтальных металлических рельсах, находящихся в вертикальном однородном магнитном поле, лежит металлический стержень прямоугольного сечения (рис. 4.2). Расстояние между рельсами равно l , масса стержня m , сила тока в стержне равна I . Когда модуль магнитной индукции равен B_0 , стержень движется с ускорением, равным по модулю a , причём его скорость увеличивается.

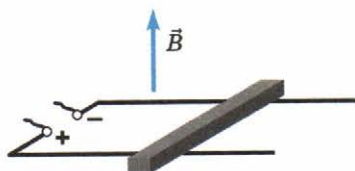


Рис. 4.2

а) В какую сторону движется стержень?

б) Чему равен коэффициент трения между стержнем и рельсами?

Подсказка. Воспользуйтесь выражением для силы Ампера и вторым законом Ньютона.

в) При каких значениях модуля магнитной индукции стержень не сдвинулся бы с места, если бы в начальный момент он покоился?

Подсказка. Стержень сдвинется с места, когда сила Ампера превысит максимальную силу трения покоя.

? 3. Металлические рельсы лежат на наклонной плоскости в вертикальном однородном магнитном поле (рис. 4.3). На рельсах находится горизонтальный металлический стержень прямоугольного сечения. Угол наклона плоскости α , расстояние между рельсами l , коэффициент трения между стержнем

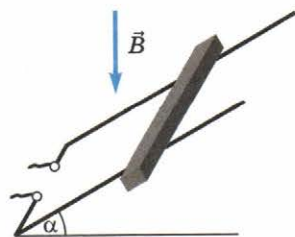


Рис. 4.3

и рельсами μ , модуль магнитной индукции B . Когда по стержню течёт ток, он движется с постоянной скоростью по рельсам вверх.

а) Как направлен ток в стержне?

б) Объясните, почему в проекциях ось x , направленную вдоль наклонной плоскости вверх, и ось y , направленную перпендикулярно наклонной плоскости вверх, справедливы следующие уравнения (N — модуль силы нормальной реакции):

$$Ox: BIl \cos \alpha - mg \sin \alpha - \mu N = 0,$$

$$Oy: N - mg \cos \alpha - BIl \sin \alpha = 0.$$

в) При каких значениях силы тока стержень начал бы двигаться вверх по наклонной плоскости, если бы в начальный момент он покоился?

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что максимально возможное значение силы трения покоя равно μN .

г) Как направлен ток в стержне, если он движется с постоянной скоростью по рельсам вниз, причём $\operatorname{tg} \alpha < \mu$?

Подсказка. Докажите, что в таком случае сила Ампера должна быть направлена на рисунке 4.3 влево.

д) Чему равна при этом сила тока?

Гибкий проводник вблизи полосового магнита

? 4. Гибкий свободно свисающий провод расположен вблизи закреплённого полосового магнита (рис. 4.4). В проводе включают ток в указанном на рисунке направлении.

а) Перенесите рисунок в тетрадь и изобразите линии магнитной индукции поля полосового магнита.

б) Найдите направления сил Ампера, действующих на небольшие участки провода вблизи точек A и C .

Подсказка. Воспользуйтесь правилом левой руки.

в) Изобразите, какую форму примет провод под действием сил Ампера, приложенных к различным его участкам.

г) Будет ли провод после изменения своей формы притягиваться к магниту или будет отталкиваться от него?

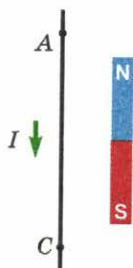


Рис. 4.4

2. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ

Движение по винтовой линии

В предыдущем параграфе мы рассмотрели движение заряженной частицы в однородном магнитном поле для двух случаев. Вспомним эти случаи.

? 5. Как движется частица, когда её скорость направлена вдоль линий магнитной индукции?

? 6. Как движется частица, когда её скорость перпендикулярна вектору магнитной индукции?

Рассмотрим теперь случай, когда скорость частицы \vec{v} направлена под углом α к вектору магнитной индукции \vec{B} (рис. 4.5).

В таком случае скорость частицы \vec{v} удобно представить в виде суммы двух векторов, один из которых (\vec{v}_{\parallel}) направлен вдоль \vec{B} , а другой (\vec{v}_{\perp}) — перпендикулярно \vec{B} .

При выполнении двух предыдущих заданий вы вспомнили, что если скорость частицы направлена вдоль линий магнитной индукции, то сила Лоренца не действует на частицу, а если скорость частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции, то она движется по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору магнитной индукции.

Отсюда следует, что в рассматриваемом случае составляющая скорости \vec{v}_{\parallel} остаётся неизменной, а вектор \vec{v}_{\perp} поворачивается, оставаясь всё время перпендикулярным вектору \vec{B} . Таким образом, заряженная частица одновременно совершает два вида движения: движется с постоянной скоростью вдоль \vec{B} и равномерно вращается по окружности в плоскости, перпендикулярной \vec{B} . Это означает, что траекторией частицы является *винтовая линия* (рис. 4.6).

Винтовая линия характеризуется радиусом r и шагом h .

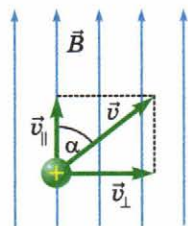


Рис. 4.5

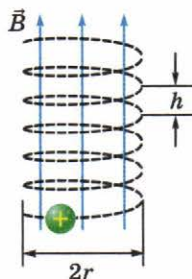


Рис. 4.6

? 7. Объясните, почему в рассматриваемом случае

$$r = \frac{mv \sin \alpha}{qB},$$

где m — масса частицы, q — её заряд.

Подсказка. В выражение для силы Лоренца в данном случае в качестве скорости входит v_{\perp} , а центростремительное ускорение выражается формулой $a = \frac{v_{\perp}^2}{r}$.

? 8. Объясните, почему один виток винтовой линии частица проходит за время

$$T = \frac{2\pi r}{v \sin \alpha}.$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

? 9. Объясните, почему шаг винтовой линии выражается формулой

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

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что $h = v_{\parallel} T$, а также тем, что $v_{\parallel} = v \cos \alpha$.

Итак, траектория заряженной частицы как бы «навивается» на линии магнитной индукции. Это явление играет большую роль в природе и технике.

Так, летящие от Солнца заряженные частицы не достигают поверхности Земли, потому что их траектории «навиваются» на линии магнитной индукции магнитного поля Земли. Это спасает нас от жёсткого излучения.

Советские физики И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров предложили использовать особенности движения заряженных частиц в магнитном поле для удержания высокотемпературной плазмы (сильно нагретого почти полностью ионизированного газа). Это необходимо для исследований по управляемому термоядерному синтезу.

В устройстве, названном «токамак», траектории движущихся заряженных частиц «навиваются» на линии магнитной индукции кольцеобразной формы (на рисунке 4.7

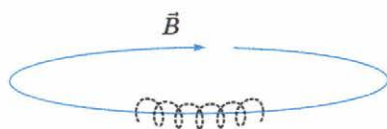


Рис. 4.7

часть траектории одной из заряженных частиц показана пунктиром). Благодаря этому возникает «магнитная ловушка»: частицы плазмы не вылетают за пределы заданного пространства.

Движение в переменном во времени магнитном поле

Вернёмся к случаю, когда скорость заряженной частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции однородного магнитного поля и частица движется по окружности.

Рассмотрим, как изменятся характеристики движения частицы, если магнитная индукция начнёт медленно изменяться по модулю.

Опыт и расчёт, выходящие за пределы нашего курса, показывают, что изменяются и радиус окружности, и скорость частицы, однако при этом *произведение радиуса на скорость с хорошей точностью можно считать постоянным*¹.

Может показаться удивительным, что скорость частицы при её движении в магнитном поле изменяется: ведь мы уже знаем, что сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы и поэтому не может изменить модуля её скорости. Однако, как мы увидим в следующем параграфе, изменяющееся во времени магнитное поле порождает *вихревое электрическое поле*, то есть поле, линии напряжённости которого *замкнуты*. В таком поле работа по перемещению заряженной частицы по замкнутому контуру не равна нулю. Именно действие этого вихревого электрического поля и приводит к тому, что скорость частицы изменяется во времени.

Будем считать, что модуль магнитной индукции изменяется настолько медленно, что частица успевает совершить много оборотов за то время, в течение которого радиус окружности заметно изменится.

? 10. Увеличится или уменьшится скорость частицы, когда магнитная индукция увеличится в 2 раза? Во сколько раз?

¹ Более точно, это произведение изменяется со временем, но намного медленнее, чем модуль магнитной индукции.

Подсказка. Воспользуйтесь вторым законом Ньютона и тем, что произведение скорости на радиус окружности, по которой движется частица, остаётся постоянным.

- ?** 11. Увеличится или уменьшится радиус окружности, по которой движется частица, когда магнитная индукция увеличится в 2 раза?

«Фильтр скоростей»

- ?** 12. На рисунке 4.8 изображена схема устройства, называемого «фильтр скоростей». В некоторой области пространства создают однородные электрическое и магнитное поля. Вектор напряжённости электрического поля \vec{E} перпендикулярен вектору магнитной индукции \vec{B} . Скорость \vec{v} частицы, влетающей в прибор через отверстие 1, перпендикулярна векторам \vec{E} и \vec{B} .

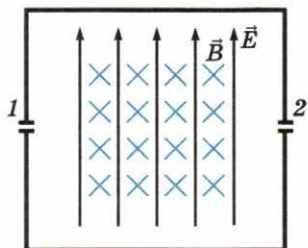


Рис. 4.8

а) Перенесите рисунок в тетрадь и обозначьте на нём, как направлены силы, действующие со стороны электрического и магнитного полей на влетающую через отверстие 1 положительно заряженную частицу.

б) При каком соотношении между v , B и E частица пролетит сквозь прибор и вылетит через отверстие 2?

в) Изменится ли при пролёте сквозь прибор скорость этой частицы, и если изменится, то как: увеличится или уменьшится?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

13. Металлический стержень длиной l и массой m подвешен на двух проводящих нитях длиной L каждая (рис. 4.1). Система находится в однородном магнитном поле с индукцией B . Вектор магнитной индукции направлен вертикально вниз. По стержню пропустили кратковременный ток, после чего он стал совершать колебания. За время протекания тока по стержню прошёл заряд q , углом отклонения нитей от вертикали за это время можно пренебречь.

- а) На какую максимальную высоту от положения равновесия поднимается стержень при колебаниях?
 б) Чему равна сила натяжения каждой нити при максимальном отклонении стержня во время колебаний?

Подсказка. При максимальном отклонении центростремительное ускорение стержня равно нулю. Поэтому проекция равнодействующей приложенных к стержню сил на направление нитей равна нулю. Учтите, что нитей две.

14. Металлический стержень длиной l и массой m лежит на гладком столе и соединён одинаковыми лёгкими проводящими пружинами жёсткостью k каждая с укрепленной на столе планкой (рис. 4.9). Система находится в однородном магнитном поле. Вектор магнитной индукции направлен вертикально, модуль магнитной индукции равен B .

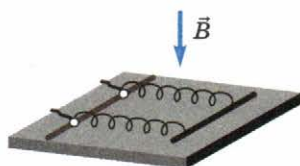


Рис. 4.9

После того как по стержню пропустили кратковременный ток, он стал совершать гармонические колебания. За время протекания тока по стержню прошел заряд Q , смещением стержня за это время можно пренебречь.

- а) Чему равна кинетическая энергия стержня сразу после выключения тока?
 б) Чему равна амплитуда колебаний стержня?

Подсказка. Воспользуйтесь законом сохранения энергии и выражением для потенциальной энергии упругой деформации. Учтите, что пружин две.

15. На горизонтальных рельсах, находящихся в вертикальном магнитном поле, лежит металлический стержень (см. рис. 4.2). Расстояние между рельсами равно l , модуль магнитной индукции равен B . На рисунке 4.10 изображён график зависимости ускорения стержня от силы тока в нём (значения $I_{\text{мин}}$, I_1 , a_1 заданы). В начальный момент стержень покоится.

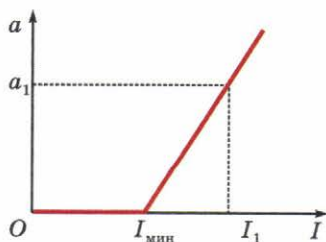


Рис. 4.10

- а) Чему равна масса m стержня?
 б) Чему равен коэффициент трения μ между стержнем и рельсами?

Подсказка. Выразите ускорение стержня через данные в условии величины, силу тока I в стержне, массу стержня m и коэффициент трения μ между стержнем и рельсами. Сопоставьте полученную формулу для линейной функции с приведённым графиком.

16. На горизонтальных рельсах, находящихся в однородном магнитном поле, лежит металлический стержень прямоугольного сечения (рис. 4.11). Расстояние между рельсами L , модуль магнитной индукции B , коэффициент трения между стержнем и рельсами

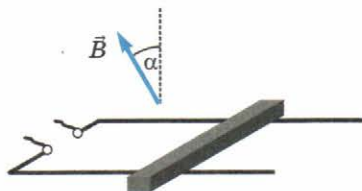


Рис. 4.11

μ . Вектор магнитной индукции перпендикулярен стержню и составляет угол α с вертикалью. Когда сила тока в стержне равна I , стержень движется с ускорением вправо, причём его скорость увеличивается.

- а) Как направлен ток в стержне: от нас или к нам?
 б) Чему равно ускорение стержня?

17. Проводящие рельсы лежат на наклонной плоскости в однородном магнитном поле. Вектор магнитной индукции перпендикулярен наклонной плоскости. По рельсам движется вверх с постоянной скоростью горизонтальный металлический стержень прямоугольного сечения (рис. 4.12). Угол наклона плоскости α , расстояние между рельсами L , коэффициент трения между стержнем и рельсами μ , сила тока в стержне I .

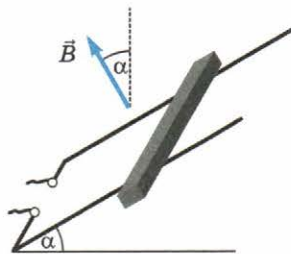


Рис. 4.12

- а) Как направлен ток в стержне: к нам или от нас?
 б) Чему равен модуль магнитной индукции?

18. Вблизи вертикально закреплённого металлического стержня I находится горизонтально расположенный ме-

таллический стержень 2 (рис. 4.13). В проводниках включают токи в указанных на рисунке направлениях.

а) Перенесите рисунок в тетрадь и изобразите линии магнитной индукции поля, создаваемого в точках А и С током в проводнике 1.

б) Найдите направление сил, действующих на участки стержня 2 вблизи точек А и С.

в) Изобразите, как расположится стержень 2 под действием сил Ампера, приложенных к его участкам.

г) Будет ли после изменения своего положения стержень 2 притягиваться к стержню 1 или будет отталкиваться от него?

19. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле. Скорость частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции. Объясните, почему при медленном увеличении модуля магнитной индукции кинетическая энергия частицы пропорциональна частоте обращения.

Подсказка. В рассматриваемом случае произведение скорости частицы на радиус окружности, по которой она движется, можно считать неизменным.

20. Протон пролетает через ускоряющую разность потенциалов $U = 20$ кВ, после чего влетает в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B = 2$ Тл под углом 30° к вектору магнитной индукции.

а) С какой скоростью протон влетает в магнитное поле?

б) Чему равны радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться протон?

в) Будет ли изменяться при движении протона в магнитном поле угол между направлением его скорости и вектором магнитной индукции? И если будет, то как: увеличиваться или уменьшаться?

21. Ион пролетает через «фильтр скоростей», в котором модуль напряжённости электрического поля равен E , а модуль магнитной индукции равен B . После этого ион попадает в однородное магнитное поле с индукцией B_1 и движется в нём по окружности радиуса r . Чему равен удельный заряд иона (отношение заряда к массе)?

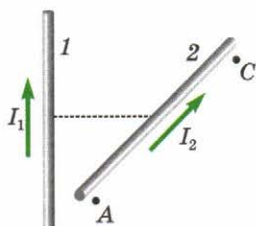
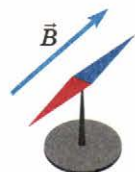
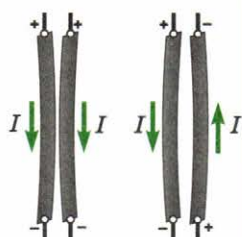
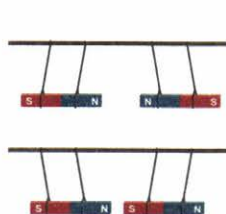
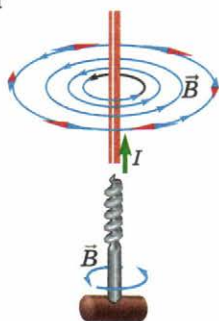
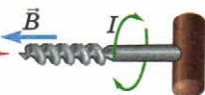
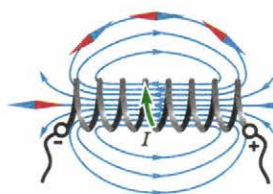


Рис. 4.13

Магнитное взаимодействие



Линии магнитной индукции



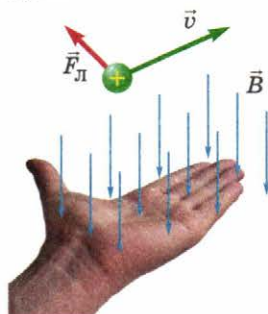
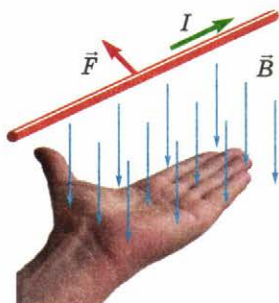
Закон Ампера

$$F = BIl \sin \alpha$$

Сила Лоренца

$$F_{\text{Л}} = Bqv \sin \alpha$$

Правило левой руки



Глава 2 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 5. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

1. ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ

Из курса физики основной школы вы уже знакомы с явлением электромагнитной индукции, открытым английским физиком М. Фарадеем. Напомним опыты Фарадея.



Поставим опыт

Соединим концы проволочной катушки с чувствительным амперметром¹. Если вдвигать в катушку магнит, как показано на рисунке 5.1, а, то амперметр покажет, что в катушке возникает ток. Этот ток называют *индукционным*.



Майкл Фарадей
(1791–1867)

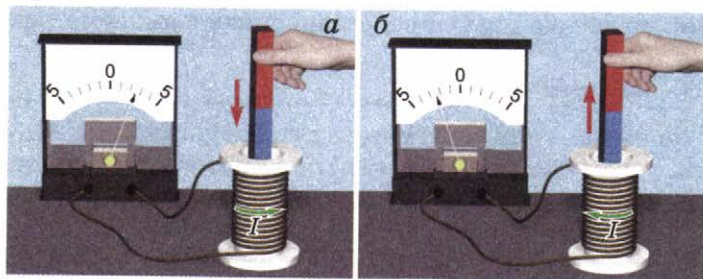


Рис. 5.1

Индукционный ток возникает и при выдвигании магнита из катушки, причём направление тока изменяется на противоположное (5.1, б).

Ток в катушке возникает и в том случае, когда магнит неподвижен, а катушка надевается на него (рис. 5.2, а) или снимается с него (рис. 5.2, б). Таким образом, индукционный ток возникает *при движении магнита и катушки относительно друг друга*.

¹ В качестве такого амперметра часто используют гальванометр.

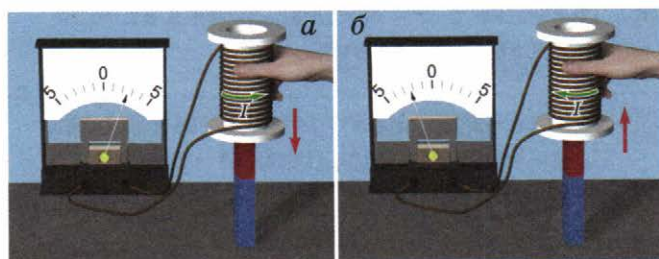


Рис. 5.2

Возникновение индукционного тока при движении катушки и магнита относительно друг друга лежит в основе действия генераторов электрического тока, о которых мы расскажем ниже.

Мы уже знаем, что магнитные свойства катушки с током и полосового магнита сходны. Поэтому в описанных опытах по возникновению индукционного тока постоянный магнит можно заменить второй катушкой с током.

Теперь мы можем изменять магнитное поле, не двигая катушки относительно друг друга, а изменяя силу тока в катушке, соединённой с источником тока. Будет ли при этом возникать индукционный ток в катушке, соединённой с амперметром?



Поставим опыт

Наденем на один сердечник две катушки (рис. 5.3). Катушку 1 соединим через реостат с источником тока, а катушку 2 — с чувствительным амперметром.

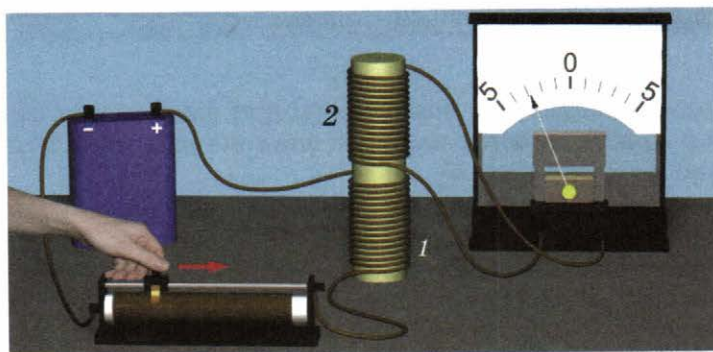


Рис. 5.3

Теперь с помощью реостата будем изменять силу тока в катушке 1, соединённой с источником тока. При этом будет изменяться магнитное поле, пронизывающее катушку 2. И мы увидим, что в результате в катушке 2 возникает индукционный ток.

Возникновение индукционного тока в одной катушке при изменении тока в другой катушке лежит в основе действия трансформаторов — приборов для преобразования напряжения переменного тока. Без использования трансформаторов передача электроэнергии на большие расстояния была бы невозможна. Далее мы рассмотрим это подробнее.

2. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Фарадей вывел из своих опытов *общую закономерность*: индукционный ток в катушке возникает тогда, когда *изменяется число линий магнитной индукции, пронизывающих эту катушку*.

? 1. Объясните, почему в каждом из описанных выше опытов изменяется число линий магнитной индукции, пронизывающих катушку, соединённую с амперметром.

Число линий магнитной индукции, пронизывающих контур (в частности, катушку) определяют с помощью физической величины, которую называют *магнитным потоком* или *потоком магнитной индукции*.

Начнём с самого простого случая, когда контур представляет собой рамку, расположенную в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , причём плоскость рамки перпендикулярна \vec{B} (рис. 5.4).

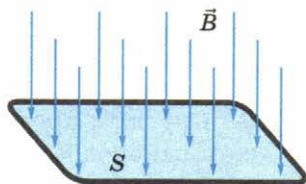


Рис. 5.4

Площадь ограниченной контуром плоской фигуры называют площадью контура. Обозначим её S . В данном случае магнитный поток Φ^1 через контур определяется формулой

$$\Phi = BS.$$

Пусть теперь вектор магнитной индукции \vec{B} составляет угол α с перпендикуляром к контуру.

¹ Буква Φ читается «фи»: это — большая буква греческого алфавита, написание которой совпадает с буквой русского алфавита.

Согласно принципу суперпозиции полей магнитное поле с индукцией \vec{B} можно представить как наложение двух однородных магнитных полей: поля с индукцией \vec{B}_\perp , направленной перпендикулярно контуру, и поля с индукцией \vec{B}_\parallel , параллельной контуру (рис. 5.5).

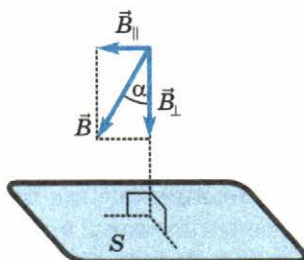


Рис. 5.5

- ?** 2. Объясните, почему в рассматриваемом случае

$$\Phi = B_\perp S = BS \cos \alpha.$$

Итак, в случае однородного магнитного поля

магнитный поток (поток магнитной индукции) Φ через замкнутый контур равен произведению модуля B вектора магнитной индукции на площадь контура S и на косинус угла α между вектором магнитной индукции и перпендикуляром к плоскости контура:

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

Единицу магнитного потока в СИ называют *вебер* (Вб) в честь немецкого физика В. Вебера, изучавшего магнитные поля. Магнитный поток 1 Вб создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции. Поэтому $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

- ?** 3. Круглый проволочный виток радиусом 10 см находится в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл и может вращаться вокруг оси, проходящей через его центр и перпендикулярной вектору магнитной индукции \vec{B} .
- Изобразите схематически вектор магнитной индукции и положение витка, при котором пронизывающий его магнитный поток: максимален; минимален.
 - Чему равен максимальный магнитный поток через виток?
 - При каком значении угла между \vec{B} и перпендикуляром к плоскости витка магнитный поток равен половине своего максимального значения?

Используя понятие магнитного потока, сформулируем открытое Фарадеем явление *электромагнитной индукции* так.

Вследствие изменения магнитного потока через замкнутый проводящий контур в этом контуре возникает индукционный ток.

? 4. Проволочная прямоугольная замкнутая рамка находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен плоскости рамки. Сделайте чертёж и ответьте на вопрос: в каком (каких) из перечисленных ниже случаев в рамке возникнет индукционный ток?

- а) Рамка движется поступательно с постоянной скоростью, оставаясь в той же плоскости.
- б) Рамка движется поступательно с постоянной скоростью, направленной перпендикулярно плоскости рамки.
- в) Рамка движется поступательно с постоянным ускорением.
- г) Рамка вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости рамки.
- д) Рамка вращается вокруг оси, совпадающей с одной из сторон рамки.
- е) Рамка вращается вокруг оси, лежащей в плоскости рамки и проходящей через её центр.

3. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Направление индукционного тока можно определить с помощью следующего опыта.



Поставим опыт

На концах лёгкого стержня укреплено два алюминиевых кольца: замкнутое и разрезанное. Стержень может вращаться вокруг вертикальной оси, опираясь на её острие (рис. 5.6).

Если мы будем *приближать* северный полюс магнита к замкнутому кольцу, то увидим, что кольцо *отталкивается* от магнита.

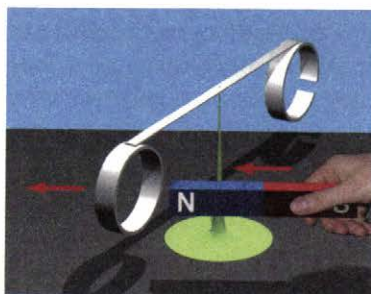


Рис. 5.6

Можно предположить, что взаимодействие кольца и магнита обусловлено явлением электромагнитной индукции: при приближении магнита к кольцу *в кольце возник индукционный ток*. Кольцо превратилось в виток с током, а на такой виток, как мы уже знаем, действует магнитное поле.

Это предположение можно проверить на опыте, поднося магнит к *разрезанному* кольцу (для этого оно и было заготовлено). Если наше предположение правильно, то *разрезанное кольцо не будет взаимодействовать с магнитом*, потому что в таком кольце не может идти ток. И опыт действительно подтверждает это предположение.

Направление индукционного тока в замкнутом кольце можно будет узнать с помощью правила буравчика, если мы определим, как направлен вектор магнитной индукции поля, созданного индукционным током.

- ?** 5. Как направлен в опыте, показанном на рисунке 5.6, вектор магнитной индукции поля, созданного индукционным током, в центре замкнутого кольца: влево или вправо?

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что отталкиваются одноимённые полюса магнита, а также тем, что магнитные линии выходят из северного полюса магнита.

Если вы правильно выполнили предыдущее задание, то заметили, что вектор магнитной индукции поля, порождённого индукционным током, направлен *противоположно* вектору магнитной индукции внешнего магнитного поля (созданного постоянным магнитом).

Заметим, что при *приближении* магнита к кольцу индукция поля магнита в области кольца *увеличивается*. Следовательно, при *увеличении* магнитной индукции внешнего поля вектор магнитной индукции поля, порождённого индукционным током, направлен *противоположно* вектору магнитной индукции внешнего магнитного поля. Это наводит на мысль, что

магнитное поле индукционного тока препятствует тому изменению внешнего магнитного поля, которое вызвало данный ток.

- ?** 6. Если это предположение правильно, то что должно наблюдаться при *удалении* магнита от кольца: будет оно *притягиваться* к магниту или *отталкиваться* от него?

Проверим ответ на это задание с помощью опыта.



Поставим опыт

Если мы будем *удалять* северный полюс магнита от замкнутого кольца, то увидим, что кольцо *притягивается* к магниту (рис. 5.7).

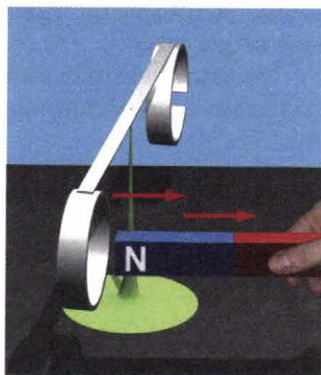


Рис. 5.7

? 7. Подтверждает этот опыт сформулированное выше предположение (оно набрано жирным шрифтом) или опровергает его?

На основании опытов, подобных описанным, российский физик Э. Х. Ленц сформулировал правило:

индукционный ток направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует тому изменению магнитного потока, которое вызвало данный ток.

Такая формулировка правила Ленца может показаться несколько «тяжеловесной», поэтому приведём и более краткую формулировку этого правила.

Индукционный ток направлен так, чтобы противодействовать причине, вызвавшей этот ток.

Например, мы видели, что при *приближении* магнита к кольцу оно вследствие возникновения в нём индукционного тока начинает *отталкиваться* от магнита, а при *удалении* магнита от кольца оно будет *притягиваться* к нему.

? 8. Используя правило Ленца, предскажите, как будет взаимодействовать кольцо с магнитом, если:

- приближать к кольцу южный полюс магнита?
- удалять от кольца южный полюс магнита?

Проверьте свои предположения на опыте.



Эмилий Ленц
(1804–1865)

Итак, мы видим, что «противодействие» наблюдается независимо от того, каким полюсом магнит обращён к кольцу.

Зная направление вектора магнитной индукции поля, созданного индукционным током, можно определить направление этого тока.

А узнав направление тока в проводнике, мы можем определить и направление действующей на него силы Ампера.

? 9. По горизонтальным металлическим рельсам, находящимся в вертикальном магнитном поле, движется металлический стержень, как показано на рисунке 5.8.

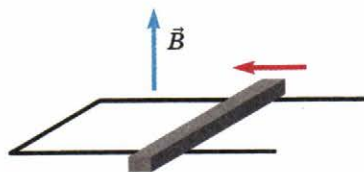


Рис. 5.8

- Увеличивается или уменьшается внешний магнитный поток через контур, образованный рельсами и стержнем?
- Как направлен вектор магнитной индукции поля, созданного индукционным током, в центре контура: вверх или вниз?
- В каком направлении течёт индукционный ток в стержне: от нас или к нам?
- Как направлена действующая на стержень сила Ампера: в направлении скорости стержня или противоположно ей?

На примере этого задания вы могли убедиться, что индукционный ток действительно противодействует причине, вызвавшей этот ток. Наличие такого противодействия — надёжный указатель для определения направления индукционного тока при решении задач.

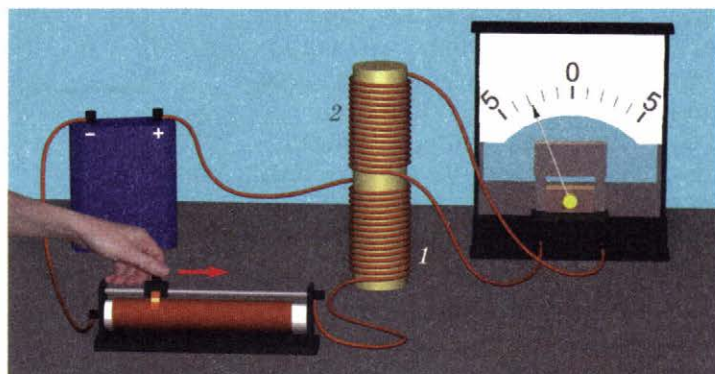
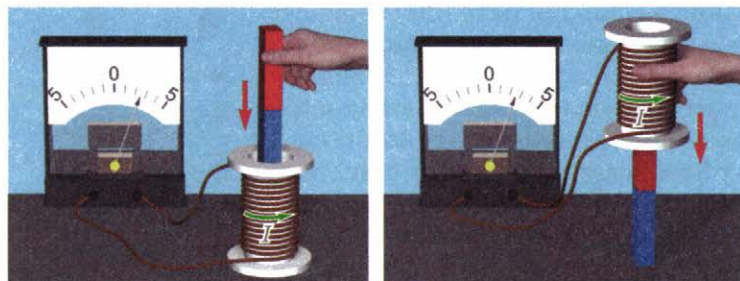
Правило Ленца — следствие закона сохранения энергии

Покажем, что правило Ленца является следствием закона сохранения энергии.

Действительно, предположим, что оно не выполняется, и индукционный ток не противодействует вызывающей его причине, а, наоборот, усиливает её.

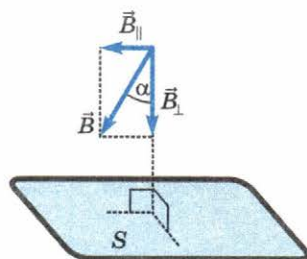
В таком случае усиление причины, вызвавшей индукционный ток, привело бы к дальнейшему увеличению индукционного тока. Это снова усилило бы вызвавшую его причину, вследствие чего ток увеличился бы ещё больше — и так без конца. А это, конечно, нарушало бы закон сохранения энергии.

Явление электромагнитной индукции

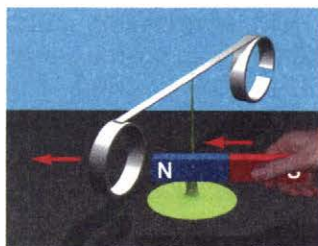


Магнитный поток

$$\Phi = B_{\perp} S = BS \cos \alpha$$



Правило Ленца





ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

10. Составьте задачи по рисункам 5.9, а, б, в и решите их. Катушка замкнута.

11. Горизонтальная металлическая перемычка может без трения скользить по вертикальным направляющим (рис. 5.10). Система находится в однородном магнитном поле.

а) Как будет изменяться при падении перемычки внешний магнитный поток через контур, образованный перемычкой и направляющими?

б) Как будет направлен вектор магнитной индукции поля, созданного индукционным током, в центре контура: от нас или к нам?

в) Будет ли сила Ампера, действующая на перемычку со стороны внешнего поля, ускорять её падение или притормаживать его?

12. На рисунке 5.11 изображены три последовательных положения проводочной рамки, падающей между полюсами магнита.

а) Как направлен вектор магнитной индукции поля, созданного индукционным током, в каждом из этих положений?

б) Как направлен индукционный ток в верхней стороне рамки в каждом из этих положений: от нас или к нам?

в) Как направлена равнодействующая приложенных к рамке сил Ампера в каждом из этих положений?

Подсказка. В положении 1 большая сила Ампера действует на нижнюю сторону рамки, а в положении 3 — на верхнюю.

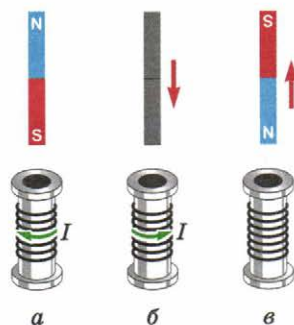


Рис. 5.9

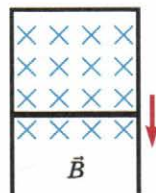


Рис. 5.10

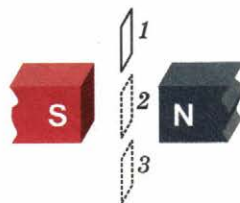


Рис. 5.11

§ 6. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

1. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА

Два способа изменения магнитного потока через контур

Как мы уже знаем, индукционный ток возникает в проводящем замкнутом контуре вследствие изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур (§ 5).

Магнитный поток через контур можно изменять двумя способами:

1. Контур (или его часть) *перемещать* в постоянном магнитном поле.
2. *Изменять во времени* пронизывающее неподвижный контур магнитное поле.

? 1. Какие из схематических рисунков (рис. 6.1) иллюстрируют первый способ изменения магнитного потока, а какие — второй? Катушка на рисунке *б* замкнута.

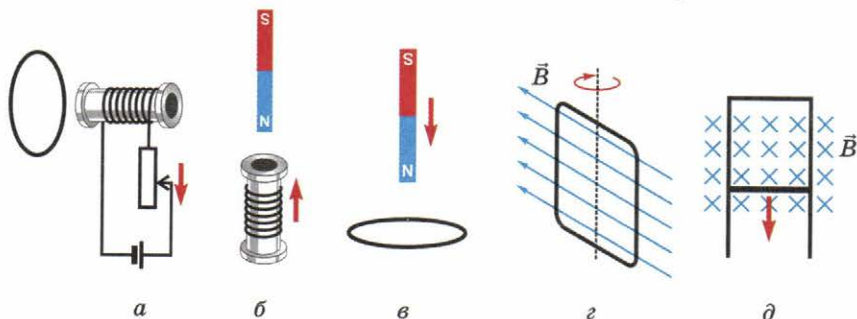


Рис. 6.1

Можно, конечно, изменять поток магнитной индукции через контур, сочетая оба описанных способа.

Из курса физики 10-го класса вам известно: чтобы в замкнутой цепи существовал электрический ток (в том числе индукционный), необходимо, чтобы на свободные заряды действовали силы неэлектростатического происхождения, которые называют *сторонними* силами.

Мы сейчас увидим, что природа сторонних сил, вызывающих появление индукционного тока в замкнутом контуре, зависит от того, каким из двух указанных выше способов изменяется магнитный поток через этот контур.

Возникновение индукционного тока при движении проводника

Рассмотрим сначала причину возникновения индукционного тока в случае, когда контур или его части движутся в постоянном магнитном поле.

Пусть, например, металлический стержень скользит по горизонтальным металлическим рельсам, находящимся в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого направлен вертикально вниз (рис. 6.2).

На свободные заряды (электроны), находящиеся в движущемся стержне, будет действовать со стороны магнитного поля сила Лоренца.

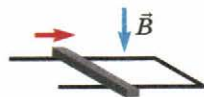


Рис. 6.2

- ?** 2. Как будет направлена действующая на свободные электроны в стержне сила Лоренца?

Подсказка. Воспользуйтесь правилом левой руки, но учтите, что электроны имеют отрицательный заряд.

В результате действия силы Лоренца на свободные электроны в стержне, в контуре, состоящем из стержня и рельсов, возникнет *индукционный ток*.

- ?** 3. Как будет направлен индукционный ток в контуре?

На этом примере мы видим, что, *если проводящий контур (или его часть) движется в постоянном магнитном поле, индукционный ток обусловлен действием силы Лоренца на свободные заряды.*

- ?** 4. Выполняется ли в данном случае правило Ленца для определения направления индукционного тока? Обоснуйте свой ответ.

Возникновение индукционного тока под действием вихревого электрического поля

Рассмотрим теперь причину возникновения индукционного тока в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле.

Пусть, например, полосовой магнит приближается к проводящему кольцу (рис. 6.3). При этом магнитный поток через кольцо увеличивается

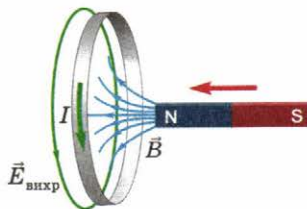


Рис. 6.3

ется, вследствие чего в кольце возникает индукционный ток. Однако объяснить его возникновение действием силы Лоренца на свободные заряды в проводнике теперь нельзя, потому что на неподвижные¹ заряды магнитное поле не действует.

Причину возникновения индукционного тока в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле, нашёл английский физик Дж. Максвелл. Он построил согласующуюся во всеми опытными данными *теорию электромагнитного поля*. Согласно теории Максвелла

переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Слово «вихревое» означает, что *линии напряжённости этого поля замкнуты* (одна из этих линий показана на рисунке 6.3). Этим *вихревое* электрическое поле существенно отличается от уже знакомого вам *электростатического* поля, линии напряжённости которого не замкнуты: они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

Так как линии напряжённости вихревого электрического поля замкнуты, работа сил этого поля по перемещению заряда вдоль замкнутого контура может быть *отлична от нуля*². Поэтому они могут играть роль сторонних сил.

Например, в кольце, изображённом на рисунке 6.3, сторонние силы распределены по всему кольцу, вследствие чего любая часть кольца является источником тока.

Итак, *индукционный ток в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле, обусловлен действием на свободные заряды вихревого электрического поля, порождённого переменным магнитным полем.*

Может возникнуть вопрос: а существует ли вихревое электрическое поле в области пространства, где переменное магнитное поле есть, но замкнутого проводящего контура нет?

Ответ: *вихревое электрическое поле существует всюду, где есть переменное магнитное поле, — независимо от того, есть в этом месте замкнутый проводящий контур или нет.*

¹ Хаотическое тепловое движение свободных зарядов в проводнике мы не учитываем, так как средняя скорость такого движения равна нулю.

² Напомним, что работа сил электростатического поля по перемещению заряда по замкнутому контуру всегда равна нулю, вследствие чего силы, действующие на заряды со стороны электростатического поля, не могут играть роль сторонних сил в источнике тока.

Если такой контур есть, то вихревое электрическое поле вызывает в нём индукционный ток.

? 5. Два магнита движутся так, как показано на рисунках 6.4, а, б. Вследствие изменения со временем магнитного поля в пространстве между полюсами магнитов возникает вихревое электрическое поле, форма линий напряжённости которого показана на рисунках. Как направлены линии напряжённости вихревого электрического поля, если смотреть на них со стороны северного полюса: по часовой стрелке или против?

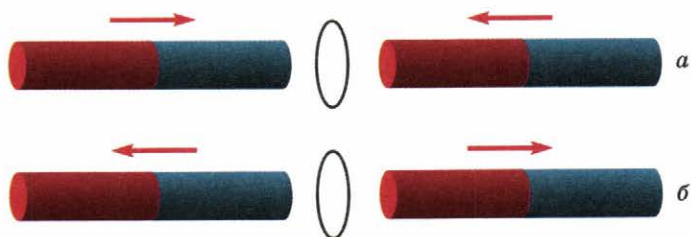


Рис. 6.4

Подсказка. Представьте себе, что на месте изображённой на рисунках окружности находится проводящее кольцо, и воспользуйтесь правилом Ленца для определения направления индукционного тока в этом кольце.

2. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

ЭДС индукции

Итак, индукционный ток обусловлен действием на свободные заряды сторонних сил: силы Лоренца или силы, действующей со стороны вихревого электрического поля.

Из курса физики 10-го класса вы знаете, что сторонние силы характеризуются *электродвижущей силой* (ЭДС), которую обозначают \mathcal{E} . По определению ЭДС равна отношению работы сторонних сил $A_{\text{стор}}$ по перемещению заряда q вдоль всего контура к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (1)$$

Электродвижущую силу, обусловленную изменением магнитного потока через контур, называют *ЭДС индукции* и обозначают \mathcal{E}_i .

Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции можно измерить на опыте, используя закон Ома для полной цепи (вы знакомы с ним из курса физики 10-го класса). Согласно этому закону сила индукционного тока

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

где R — внешнее сопротивление цепи, r — внутреннее сопротивление источника. Отсюда следует, что

$$\mathcal{E}_i = I_i(R + r).$$

Используя это соотношение, можно определить на опыте \mathcal{E}_i , измерив силу индукционного тока I_i и полное сопротивление цепи $R + r$.

Поставив серию опытов, Фарадей установил, что *независимо от способа изменения магнитного потока* ЭДС индукции \mathcal{E}_i в контуре связана со скоростью изменения магнитного потока Φ через этот контур соотношением

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2)$$

Это соотношение называют *законом электромагнитной индукции*.

Знак минус в формуле (2) следует из правила Ленца, согласно которому индукционный ток препятствует изменению магнитного потока, которое вызвало этот ток¹. При решении задач обычно поступают так:

— модуль ЭДС индукции находят по формуле

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|, \quad (3)$$

являющейся следствием формулы (2);

— направление индукционного тока, обусловленного ЭДС индукции, находят по правилу Ленца.

? 6. Квадратная проволочная рамка сопротивлением 20 Ом со стороной 10 см находится в однородном магнитном поле. Вектор магнитной индукции поля перпендикулярен

¹ Чтобы использовать этот знак для нахождения направления ЭДС индукции, необходимо определить знаки для направления обхода контура и направления перпендикуляра к плоскости контура.

плоскости рамки. Модуль магнитной индукции увеличивается пропорционально времени: на 2 Тл за 5 с.

- а) Насколько увеличился магнитный поток за указанное время?
- б) Чему равна скорость изменения магнитного потока через рамку?
- в) Чему равна ЭДС индукции?
- г) Чему равна сила индукционного тока?
- д) Какой заряд прошёл в рамке за указанное время?
- е) Какое количество теплоты выделилось в рамке за указанное время?

Соотношение между прошедшим по контуру зарядом и изменением магнитного потока

Заряд, которой проходит в контуре при изменении магнитного потока через контур, можно узнать, не находя ни ЭДС индукции, ни индукционного тока.

- ?** 7. Объясните, почему справедливо соотношение

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} R = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|, \quad (4)$$

где Δq — заряд, прошедший в контуре за время Δt , а R — полное сопротивление контура.

Подсказка. Воспользуйтесь определением тока, законом Ома для полной цепи и законом электромагнитной индукции.

- ?** 8. Объясните, почему справедливо соотношение

$$\Delta q = \frac{|\Delta \Phi|}{R}, \quad (5)$$

где Δq — заряд, прошедший в контуре при изменении пронизывающего этот контур магнитного потока на $\Delta \Phi$.

Подсказка. Воспользуйтесь формулой (4).

- ?** 9. Круглая проволочная рамка радиусом 5 см и сопротивлением 40 Ом лежит на столе в вертикальном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл. Какой заряд пройдёт в рамке, если:

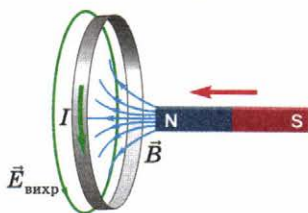
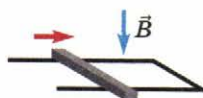
- а) повернуть её так, чтобы её плоскость стала вертикальной?
- б) перевернуть её и положить на стол другой стороной?

Подсказка. В случае б изменение магнитного потока в 2 раза больше, чем в случае а.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Два способа изменения магнитного потока через контур



Закон электромагнитной индукции $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

10. Проволочная катушка радиусом 5 см с числом витков 100 находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого направлен вдоль оси катушки. Сопротивлением проволоки можно пренебречь. Концы катушки соединены с обкладками конденсатора ёмкостью 40 мкФ. Модуль индукции за каждые 10 с увеличивается на 0,2 Тл.
- Чему равна скорость изменения магнитного потока через один виток катушки?
 - Чему равна ЭДС индукции в одном витке катушки?
 - Чему равна ЭДС индукции во всей катушке?
 - Чему равно напряжение на конденсаторе?
 - Чему равен заряд конденсатора?
 - Каким станет заряд на конденсаторе, если повернуть ось катушки на 60°?
11. Замкнутый медный провод длиной 4 м и сопротивлением 20 Ом уложен в виде окружности на горизонтальной поверхности в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл.
- Чему будет равно изменение магнитного потока через контур, если переложить его в виде квадрата?
 - Какой заряд пройдёт при этом по проводу?

§ 7. САМОИНДУКЦИЯ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

Вследствие явления электромагнитной индукции ток в катушке обладает своего рода *инертностью*. Она проявляется в том, что *ток в катушке нельзя изменить мгновенно*¹. Убедимся в этом.



Поставим опыт

Соберём электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке 7.1 (на этом рисунке показано также, как обозначают на схемах катушку в электрической цепи).

Для наглядности опыта желательно взять катушку, содержащую большое число витков, с ферромагнитным сердечником².

При замыкании ключа лампа не загорается сразу полным накалом, а разгорается *постепенно*, в течение нескольких секунд.

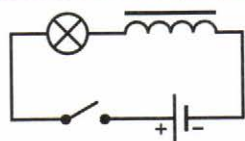


Рис. 7.1

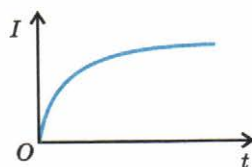


Рис. 7.2

Что же «мешает» нарастанию тока в цепи?

Вспомним, что ток создаёт *магнитное поле* в катушке. Его магнитные линии пронизывают катушку, и при увеличении силы тока магнитный поток через катушку *увеличивается*. При этом, согласно закону электромагнитной индукции, возникает ЭДС индукции. Её называют *ЭДС самоиндукции*, поскольку она возникает вследствие изменения силы тока в самом проводнике.

Согласно правилу Ленца ЭДС индукции *противодействует* изменению магнитного потока. В данном случае изменение магнитного потока обусловлено изменением силы тока, поскольку магнитный поток создаётся током в цепи. Следовательно, *ЭДС самоиндукции противодействует изменению силы*

¹ Напомним, что инертность тела в механике проявляется в том, что нельзя мгновенно изменить его скорость.

² Ферромагнитный сердечник обозначают на схемах отрезком, параллельным обозначению катушки.

тока. В случае, изображённом на рисунке 7.1, ЭДС самоиндукции противодействует ЭДС источника постоянного тока. Поэтому сила тока в цепи будет нарастать *постепенно* (рис. 7.2).

? 1. На рисунке 7.3 изображена схема электрической цепи. Какие лампы загорятся при замыкании ключа сразу, а какие будут разгораться постепенно?

Вернёмся снова к схеме, изображённой на рисунке 7.1, и попытаемся «обойти» законы природы. Если мы разомкнём ключ, то ток в цепи, казалось бы, должен прекратиться мгновенно: ведь цепь станет *разомкнутой*. Что же покажет опыт?

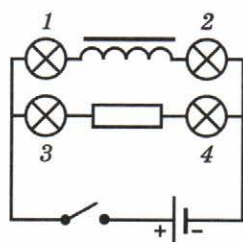


Рис. 7.3

? Поставим опыт

Размыкая цепь, мы увидим, что в ключе при размыкании проскакивает *искра*. А если присмотреться внимательно, то можно заметить, что перед тем, как погаснуть, лампа вспыхивает ярче.

Итак, при размыкании цепи произошёл газовый разряд: ток «замкнул цепь», пройдя через *воздух*. А это означает, что при размыкании ключа напряжение между его контактами составляло *тысячи вольт*. Вот как велика может быть ЭДС самоиндукции при резком изменении силы тока!

? 2. Почему при размыкании ключа лампа вспыхнула ярче?

Появление искры при размыкании цепи приводит к нежелательным последствиям: например, могут оплавиться контакты рубильника. Кроме того, возникающий при размыкании цепи скачок напряжения может вывести из строя включённые в цепь приборы.

Чтобы уменьшить ЭДС самоиндукции при размыкании цепи, содержащей катушки с большим числом витков, проектируют специальные электрические схемы. Попробуем и мы собрать такую простейшую схему.

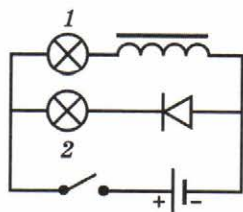


Рис. 7.4

? 3. На рисунке 7.4 изображена схема электрической цепи. Напомним, что

диод обладает односторонней проводимостью: ток через диод может идти только в одном направлении (его указывает стрелка в обозначении диода).

а) Перенесите рисунок в тетрадь и обозначьте на нём токи в элементах цепи после замыкания ключа. Опишите, что будет при этом наблюдаться.

б) Обозначьте на рисунке токи, которые будут идти через элементы цепи в течение короткого времени после размыкания ключа. Опишите, что при этом будет наблюдаться.

в) Объясните, почему при использовании этой схемы при размыкании ключа не возникает искры.

2. ИНДУКТИВНОСТЬ

Поскольку ЭДС самоиндукции обусловлена скоростью изменения магнитного потока, выясним, как связан пронизывающий контур магнитный поток с силой тока в этом контуре.

Расчёты¹ показывают, что магнитный поток Φ поля, созданного током в контуре, пропорционален силе тока I :

$$\Phi = LI. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности L между магнитным потоком Φ и силой тока I называют *индуктивностью* контура².

Физический смысл индуктивности раскрывает закон электромагнитной индукции. Согласно этому закону ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} выражается формулой

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (2)$$

Из этой формулы следует, что индуктивность численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при равномерном изменении силы тока на 1 А в течение 1 с.

Единица индуктивности в СИ — *генри* (Гн). Она названа в честь американского физика Дж. Генри, открывшего явление самоиндукции.

Один генри — это индуктивность такого контура, в котором при изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В.

Индуктивность контура L зависит от размеров и формы контура, а также от свойств ферромагнитного сердечника, но не зависит от силы тока в контуре (подобно тому, как элек-

¹ Эти расчёты выходят за рамки нашего курса.

² Обозначение индуктивности L принято в честь Э. Х. Ленца.

троёмкость конденсатора зависит от площади пластин и расстояния между ними, но не зависит от заряда). Наличие ферромагнитного сердечника позволяет увеличить индуктивность катушки в сотни раз.

? 4. Объясните, почему

$$1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}$$

? 5. В замкнутом контуре течёт ток силой 2 А. Пронизывающий контур магнитный поток поля этого тока равен 10 мВб. Чему равна индуктивность контура?

? 6. Сила тока в катушке индуктивностью 50 мГн равномерно изменяется от 8 А до 2 А за 0,2 с. Чему равна ЭДС самоиндукции в катушке?

? 7. Оцените продолжительность искры (газового разряда), возникшей при размыкании контура с катушкой индуктивностью 0,1 Гн, если известно, что искра в условиях опыта появляется при напряжении 10 кВ. Ток в контуре до размыкания был равен 2 А.

Подсказка. Воспользуйтесь формулой (2).

? 8. Силу тока в катушке индуктивностью 2 мГн изменяют в соответствии с графиком, приведённым на рисунке 7.5.

а) В какой момент времени ЭДС индукции была наибольшей?

б) Оцените, чему она в этот момент была равна.

в) В какой момент времени ЭДС самоиндукции была равна нулю?

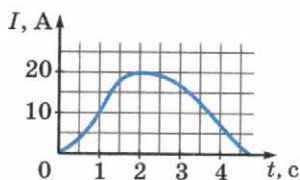


Рис. 7.5

? 9. Силу тока в двух одинаковых катушках изменяют во времени в соответствии с графиками, приведёнными на рисунке 7.6. В какой катушке возникает бóльшая ЭДС самоиндукции? Во сколько раз бóльшая?

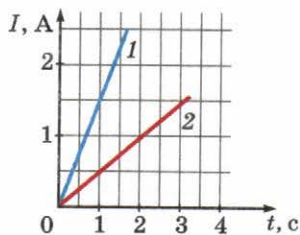


Рис. 7.6

3. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Опыты, описанные в начале этого параграфа, свидетельствуют о том, что магнитное поле обладает энергией. Особенно наглядно эта энергия обнаружилась в опытах с размыканием цепи: при этом появлялась искра (в схеме, изображённой на рисунке 7.1) или загоралась лампа (в схеме, изображённой на рисунке 7.4).

Расчёты, выходящие за рамки нашего курса, показывают, что

энергия магнитного поля тока в контуре с индуктивностью L равна

$$W_m = \frac{LI^2}{2}, \quad (3)$$

где I — сила тока в контуре.

Чтобы пояснить физический смысл формулы (3), прибегнем к аналогии между механическими и электромагнитными явлениями. Как мы уже знаем, роль массы m , характеризующей инертные свойства тела, в случае катушки с током играет индуктивность L . Поэтому естественно предположить, что роль скорости v играет сила тока I . Тогда формула (3) для энергии магнитного поля в катушке с током аналогична формуле $\frac{mv^2}{2}$ для кинетической энергии тела.

? 10. В электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 7.7, сопротивления резисторов $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, ЭДС источника $\mathcal{E} = 12$ В, индуктивность катушки $L = 30$ мГн. Сопротивлением диода при прямом включении можно пренебречь, а его сопротивление при обратном включении можно считать бесконечно большим. Сопротивлением катушки и внутренним сопротивлением источника можно пренебречь.

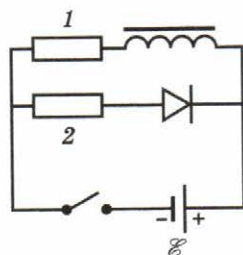


Рис. 7.7

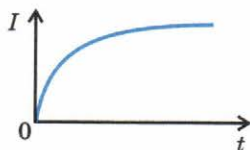
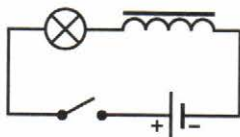
- Чему равна сила постоянного тока в катушке, когда ключ замкнут?
- Какое количество теплоты выделится в каждом резисторе после размыкания ключа?

Подсказка. Воспользуйтесь выражением для энергии магнитного поля тока и законом сохранения энергии, а также тем, что при последовательном соединении резисторов отношение выделяемых в них количеств теплоты равно отношению сопротивлений резисторов.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Явление самоиндукции



ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_{st} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Энергия магнитного поля тока

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



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

11. Когда сила тока в катушке равна 2 А, магнитное поле внутри катушки равно 1 мТл. Чему равна индуктивность катушки, если в ней 1000 витков, а площадь её поперечного сечения равна 6 см²? Магнитное поле внутри катушки считайте однородным и примите, что магнитные потоки, пронизывающие витки катушки, одинаковы.

Подсказка. Магнитный поток через все витки катушки в 1000 раз больше, чем магнитный поток через один виток.

12. Когда сила тока в проводящем кольце равна 10 А, магнитный поток через кольцо поля, созданного этим током, равен 60 мкВб.
- Чему равна индуктивность кольца?
 - Чему будет равна ЭДС самоиндукции в кольце, если силу тока равномерно уменьшать до 2 А за 0,08 с?



§ 8. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

1. ЭДС ИНДУКЦИИ В ПРОВОДНИКЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

Пусть металлический стержень длиной l движется со скоростью \vec{v} в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} . Стержень, его скорость и вектор \vec{B} взаимно перпендикулярны (рис. 8.1).

На свободные заряды в стержне будет действовать сила Лоренца. Чтобы непосредственно пользоваться правилом левой руки для нахождения направления силы Лоренца, будем считать, что свободные заряды положительны.

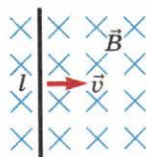


Рис. 8.1

1. Как направлена сила Лоренца, действующая на положительные заряды в стержне (рис. 8.1)?

Под действием сил Лоренца свободные заряды придут в движение, вследствие чего произойдёт перераспределение зарядов, и один конец стержня зарядится положительно, а другой — отрицательно.

2. Какой конец стержня зарядится положительно?

В результате перераспределения зарядов внутри стержня возникнет электростатическое поле, которое остановит движение зарядов. Заряды в стержне будут находиться в равновесии при условии, что сила $\vec{F}_э$, действующая на каждый свободный заряд со стороны электростатического поля, компенсирует силу Лоренца $\vec{F}_Л$:

$$\vec{F}_э = -\vec{F}_Л. \quad (1)$$

3. Объясните, почему из формулы (1) следует, что модуль напряжённости E электростатического поля внутри стержня связан с модулем его скорости v и модулем вектора магнитной индукции B соотношением

$$E = Bv. \quad (2)$$

Подсказка. Воспользуйтесь выражением для силы Лоренца и тем, что $F_s = qE$, где q — модуль одного свободного заряда.

- ?** 4. Объясните, почему между концами движущегося стержня возникает разность потенциалов

$$U = Bvl. \quad (3)$$

Подсказка. Воспользуйтесь соотношением между разностью потенциалов и напряжённостью поля.

- ?** 5. На концах медного стержня длиной 50 см, движущегося в магнитном поле с индукцией 2 Тл, возникла разность потенциалов 4 В. Чему равна скорость стержня, если она перпендикулярна стержню и вектору магнитной индукции?

Итак, движущийся в магнитном поле проводник можно использовать как источник тока, потому что на его концах есть разность потенциалов, выражаемая формулой (3).

Вспомним, что ЭДС источника тока равна разности потенциалов на клеммах разомкнутого источника, а наш движущийся стержень представляет собой как раз источник с разомкнутыми клеммами. Следовательно, в нашем случае

$$\mathcal{E}_i = U = Bvl. \quad (4)$$

- ?** 6. Объясните, почему, если угол между скоростью проводника и вектором магнитной индукции равен α , то ЭДС индукции на концах проводника выражается формулой

$$\mathcal{E}_i = Bvlsin\alpha.$$

- ?** 7. Объясните, почему на концах проводника, движущегося в однородном магнитном поле, не возникает ЭДС индукции, если проводник не пересекает магнитные линии.

Поместим теперь движущийся стержень на металлические рельсы и замкнём их на вольтметр (рис. 8.2). У нас получился замкнутый контур, причём вольтметр будет показывать значение ЭДС индукции в этом контуре.

Скорость стержня

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

где Δx — смещение стержня за время Δt .

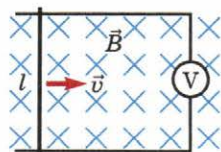


Рис. 8.2

Подставим выражение для скорости в формулу (4) и получим:

$$\mathcal{E}_i = Bl \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае магнитный поток через контур изменяется только из-за изменения площади контура. Следовательно,

$$\Delta\Phi = B\Delta S.$$

Когда стержень длиной l сместился на Δx , изменение площади контура $\Delta S = l\Delta x$. Следовательно,

$$\Delta\Phi = Bl\Delta x. \quad (6)$$

? 8. Покажите, как из формул (5) и (6) следует формула, выражающая закон электромагнитной индукции.

? 9. Проводящая перемычка длиной $l = 20$ см скользит со скоростью $v = 0,5$ м/с по горизонтальным металлическим направляющим, замкнутым на резистор сопротивлением $R = 5$ Ом. Система находится в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Сопротивлением перемычки и направляющих, а также трением можно пренебречь.

- а) Сделайте чертёж и обозначьте на нём направление скорости перемычки и направление магнитного поля.
- б) Чему равна ЭДС индукции?
- в) Чему равна сила индукционного тока?
- г) Какое количество теплоты выделится в резисторе за 3 с?
- д) Изобразите, как направлена, и найдите, чему равна действующая на перемычку сила Ампера.
- е) Какую горизонтальную внешнюю силу $\vec{F}_{\text{внеш}}$, направленную перпендикулярно перемычке, надо приложить, чтобы перемычка двигалась с постоянной скоростью? Обозначьте эту силу на чертеже.
- ж) Чему равна работа внешней силы за 3 с?
- з) Какой заряд прошёл через перемычку за то же время?
- и) Чему равна работа сторонних сил за то же время?

Если вы правильно выполнили это задание, то могли заметить, что *работа сторонних сил равна работе внешней силы*. Физический смысл этого равенства понятен: оно обусловлено

законом сохранения энергии. Но оно следует также из того, что *полная работа силы Лоренца равна нулю*. Сейчас мы в этом убедимся.

2. СОВЕРШАЕТ ЛИ РАБОТУ СИЛА ЛОРЕНЦА?

Мы видели, что роль сторонних сил в проводнике, движущемся в магнитном поле, играют силы Лоренца, действующие на свободные заряды. Следовательно, работа сторонних сил — это суммарная работа сил Лоренца над всеми свободными зарядами в проводнике.

А теперь вспомним, что *сила Лоренца не может совершать работы*, так как она направлена перпендикулярно скорости заряженной частицы. Нет ли тут противоречия?

Чтобы увидеть, что противоречия здесь нет, присмотримся к движению свободных зарядов в проводнике с током, движущемся в магнитном поле.

Рассмотрим снова переключку, скользящую с *постоянной скоростью* по металлическим рельсам в однородном магнитном поле (рис. 8.3). К переключке приложена постоянная горизонтально направленная внешняя сила $\vec{F}_{\text{внеш}}$. Рельсы замкнуты на резистор; сопротивлением переключки и рельсов, а также трением можно пренебречь.

В движущейся переключке возникает ЭДС индукции, вследствие чего в цепи течёт индукционный ток, представляющий собой *упорядоченное направленное движение свободных зарядов вдоль переключки*.

Обозначим среднюю скорость направленного упорядоченного движения свободных зарядов $\vec{v}_{\text{упор}}$, а скорость проводника-переключки $\vec{v}_{\text{пров}}$ (рис. 8.4). Тогда по правилу сложения скоростей результирующая скорость свободных зарядов

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{пров}} + \vec{v}_{\text{упор}}.$$

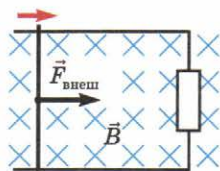


Рис. 8.3

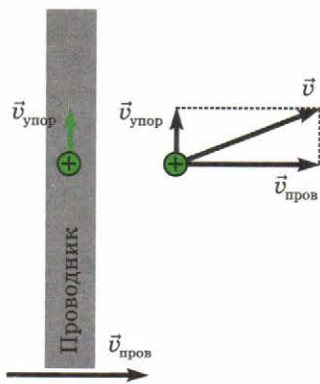


Рис. 8.4

Обратите внимание: результирующая скорость \vec{v} свободных зарядов не совпадает со скоростью проводника $\vec{v}_{\text{пров}}$, а направлена *под некоторым углом* к ней.

Вспомним теперь, что сила Лоренца перпендикулярна *результирующей* скорости свободных зарядов \vec{v} . Следовательно, при наличии тока в проводнике сила Лоренца направлена не вдоль проводника, а *под некоторым углом* к нему¹ (рис. 8.5).

Разложим силу Лоренца на две составляющие: вдоль проводника и перпендикулярно ему (рис. 8.6):

$$\vec{F}_{\text{Л}} = \vec{F}_{\text{Л}\parallel} + \vec{F}_{\text{Л}\perp}. \quad (7)$$

Эти составляющие силы Лоренца играют совершенно различные роли.

Направленная *вдоль проводника* составляющая силы Лоренца $\vec{F}_{\text{Л}\parallel}$ играет роль *сторонней силы*.

? 10. Объясните, почему эта составляющая силы Лоренца совершает *положительную* работу по перемещению свободных зарядов *вдоль* проводника.

Поэтому суммарная работа этой составляющей силы Лоренца над всеми свободными зарядами в движущемся проводнике представляет собой *работу сторонних сил* $A_{\text{стор}}$.

Сумма же направленных *перпендикулярно проводнику* составляющих силы Лоренца $\vec{F}_{\text{Л}\perp}$ для всех свободных зарядов в проводнике есть не что иное, как уже знакомая нам *сила Ампера* \vec{F}_A .

? 11. Объясните, почему работа силы Ампера A_A при перемещении проводника *отрицательна*.

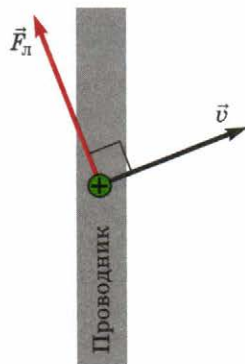


Рис. 8.5

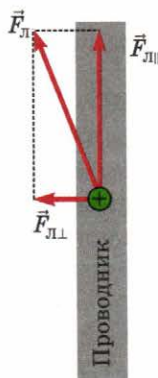


Рис. 8.6

¹ Для упрощения рассуждений будем считать свободные заряды положительными: это позволяет непосредственно использовать правило левой руки.

Вследствие того, что *полная* работа силы Лоренца равна нулю, получаем:

$$A_{\text{стор}} + A_A = 0, \quad (8)$$

откуда следует, что

$$A_A = -A_{\text{стор}}. \quad (9)$$

Свяжем теперь работу силы Ампера A_A с работой внешних сил $A_{\text{внеш}}$.

? 12. Объясните, почему, если проводник движется с постоянной скоростью,

$$A_{\text{внеш}} = -A_A. \quad (10)$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что при равномерном движении проводника сила Ампера уравнивает внешнюю силу.

Сравнивая формулу (9) с формулой (10), получаем:

$$A_{\text{стор}} = A_{\text{внеш}}. \quad (11)$$

Итак, *работа сторонних сил равна работе внешней силы.* Какова же роль магнитного поля, в котором движется проводник?

Магнитное поле преобразует внешнюю механическую силу, действующую на проводник, в силу, которая действует на свободные заряды в проводнике. Однако полная работа сил, действующих при этом на свободные заряды со стороны магнитного поля, равна нулю.

Кстати, в том, что работа внешней силы равна работе сторонних сил, вы могли убедиться уже при выполнении задания 9: ведь только благодаря этому количество теплоты, выделившееся в резисторе, равно работе внешних сил.

? 13. Металлический стержень массой m скользит с постоянной скоростью v по горизонтальным металлическим рельсам, замкнутым накоротко. Удельная теплоёмкость металла стержня равна c . Система находится в однородном вертикальном магнитном поле. При движении на стержень действует сила Ампера, равная по модулю F_A . Насколько нагреется стержень за время t ? Считайте, что сопротивлением рельсов и тепловыми потерями можно пренебречь.

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что работа силы Ампера равна по модулю работе сторонних сил.

3. УСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРОВОДНИКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

До сих пор мы рассматривали только *равномерное* движение проводника в магнитном поле. Рассмотрим теперь случай, когда проводник движется с *ускорением*.

Рассмотрим переключку массой m и длиной l , которая может скользить по металлическим рельсам в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} (рис. 8.7). К переключке приложена постоянная горизонтально направленная внешняя сила $\vec{F}_{\text{внеш}}$. Между рельсами включён конденсатор ёмкостью C . Спротивлением всех проводников (переключки и рельсов), а также трением можно пренебречь. В начальный момент переключка покоится, конденсатор не заряжен.

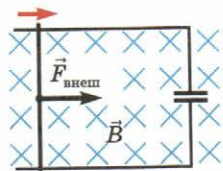


Рис. 8.7

Выясним сначала, что будет происходить, на качественном уровне.

Переключка начнёт *двигаться* под действием внешней силы. При этом на концах переключки возникнет ЭДС индукции \mathcal{E}_i . Вследствие этого в цепи *потечёт ток*, который будет *заряжать конденсатор*.

? 14. Как будет направлен этот ток на рисунке 8.7: по часовой стрелке или против?

? 15. Какая обкладка конденсатора (верхняя или нижняя на рисунке 8.7) будет при этом заряжаться положительно?

По условию сопротивлением всех проводников можно пренебречь. Следовательно, напряжение U на конденсаторе равно по модулю ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_i :


$$U = \mathcal{E}_i. \quad (12)$$

? 16. Объясните, почему из формулы (12) следует, что

$$\frac{q}{C} = Blv, \quad (13)$$

где q и v — соответственно заряд конденсатора и скорость переключки в один и тот же момент времени.

Появление тока приведёт к появлению действующей на переключку силы Ампера.

 17. Как будет направлена сила Ампера на рисунке 8.7?

 18. Объясните, почему справедливо уравнение

$$ma = F_{\text{внеш}} - BIl, \quad (14)$$


где a и I — ускорение перемычки и сила тока в один и тот же момент времени.

Соотношение (14) представляет собой одно уравнение с двумя неизвестными — a и I . Второе уравнение, связывающее эти две величины, можно получить, продифференцировав по времени уравнение (13). Мы получим:

$$\frac{I}{C} = Bla. \quad (15)$$

 19. Выразите ускорение перемычки a и силу тока I через B , l , m , C , $F_{\text{внеш}}$.

Итак, в рассмотренном случае перемычка будет двигаться с постоянным ускорением. Однако это ускорение будет *меньше* того, которое перемычка приобрела бы под действием силы $\vec{F}_{\text{внеш}}$, если бы тока в цепи не было. Дело в том, что при наличии тока вследствие работы внешней силы увеличивается не только кинетическая энергия перемычки, но и энергия электрического поля в конденсаторе.

 20. Используя найденные выражения для ускорения перемычки и силы тока, найдите:

- работу внешней силы за время t ;
- кинетическую энергию перемычки в момент времени t ;
- энергию электрического поля в конденсаторе в момент времени t .

Подсказка. Воспользуйтесь выражением для энергии электрического поля в конденсаторе.

- Сравните полученные выражения и сделайте вывод.



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

21. Проводящая перемычка длиной $l = 30$ см скользит со скоростью $v = 0,4$ м/с по горизонтальным металлическим направляющим, замкнутым на конденсатор ёмкостью $C = 2$ мФ. Система находится в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 0,3$ Тл. Сопротивлением

перемычки и направляющих, а также трением можно пренебречь.

- а) Чему равна ЭДС индукции?
- б) Будет ли идти по перемычке ток?
- в) Чему равно напряжение на конденсаторе?
- г) Чему равен заряд конденсатора?

22. Проводящая перемычка длиной l может скользить по горизонтальным металлическим направляющим, замкнутым на конденсатор ёмкостью C . Система находится в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией B . Сопротивлением перемычки и направляющих, а также трением можно пренебречь. В начальный момент скорость перемычки равна v_0 , конденсатор не заряжен.

- а) Как будет изменяться скорость перемычки со временем?
- б) Объясните, почему выполняется следующее соотношение между конечной скоростью перемычки v_k и конечным

$$\text{зарядом } q \text{ конденсатора: } Blv_k = \frac{q}{C}.$$

- в) Объясните, почему справедливо соотношение $Bl\Delta q = -m\Delta v$, где Δq и Δv — изменения заряда конденсатора и скорости перемычки за одно и то же время.

Подсказка. Воспользуйтесь законом Ампера, вторым законом Ньютона в импульсной форме и тем, что $I\Delta t = \Delta q$.

- г) Чему будут равны конечная скорость перемычки v_k и заряд конденсатора q ?

- д) Какое количество теплоты Q выделится в цепи?

Подсказка. Воспользуйтесь выражением для энергии электрического поля и законом сохранения энергии.

23. Проводящая перемычка длиной l может скользить по горизонтальным металлическим направляющим, замкнутым на резистор сопротивлением R . Система находится в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией B . Сопротивлением перемычки и направляющих, а также трением можно пренебречь. В начальный момент скорость перемычки равна v_0 .

- а) Объясните, почему справедливо соотношение $Bl\Delta q = -m\Delta v$, где Δq и Δv — прошедший по цепи заряд и изменение скорости перемычки за одно и то же время.

Подсказка. Воспользуйтесь законом Ампера, вторым законом Ньютона в импульсной форме и тем, что $I\Delta t = \Delta q$.

б) Какой заряд пройдёт по цепи за время, в течение которого скорость переключки уменьшится в 2 раза?

в) Какое количество теплоты выделится за это время?

24. Горизонтальная металлическая переключка массой $m = 10$ г и длиной $l = 20$ см может без трения скользить по вертикальным металлическим направляющим. Между направляющими включён конденсатор ёмкостью $C = 2$ Ф. Система находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции \vec{B} которого перпендикулярен плоскости контура, $B = 0,25$ Тл. В начальный момент переключку удерживают в покое. Чему будет равен заряд конденсатора q через время $t = 0,5$ с после того, как переключку отпустят без толчка? Сопротивлением переключки и направляющих можно пренебречь.

25. В электрической цепи (рис. 8.8) ЭДС источника постоянного тока \mathcal{E} , электроёмкость конденсатора C , индуктивность катушки L , сопротивление лампы $R_{\text{л}}$, сопротивление резистора $R_{\text{р}}$. В начальном состоянии ключ K замкнут. Какое количество теплоты $Q_{\text{р}}$ выделится в резисторе после размыкания ключа?

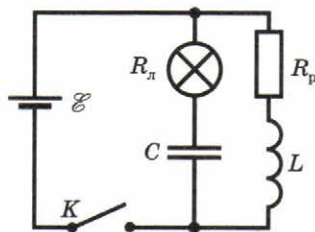


Рис. 8.8

Зависимостью сопротивления от температуры, внутренним сопротивлением источника, сопротивлением катушки и соединительных проводов, а также потерями энергии на излучение можно пренебречь.

а) Чему равна сила тока I в катушке?

б) Чему равно напряжение на конденсаторе?

в) Чему равны энергия магнитного поля в катушке и электрического поля в конденсаторе после размыкания ключа?

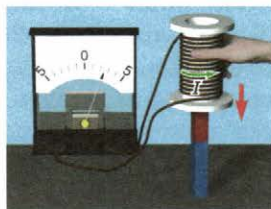
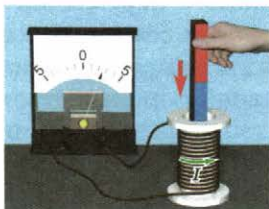
г) Какое количество теплоты Q выделится в цепи после размыкания ключа?

д) Какое количество теплоты $Q_{\text{р}}$ выделится в резисторе?



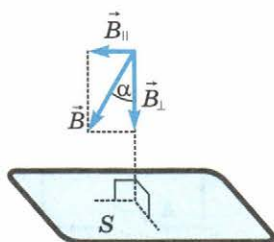
Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции

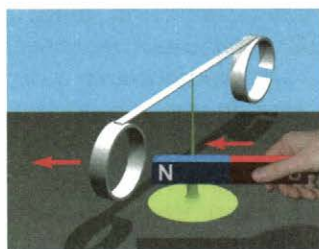


Магнитный поток

$$\Phi = B_{\perp} S = BS \cos \alpha$$

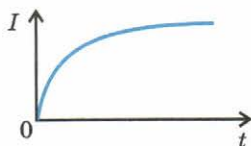
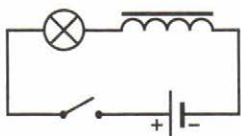


Правило Ленца



Закон электромагнитной индукции $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

Явление самоиндукции



ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Энергия магнитного поля тока

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

§ 9. СВОБОДНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1. КАЧЕСТВЕННОЕ РАССМОТРЕНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

С механическими колебаниями вы уже познакомились в курсе физики основной школы и знаете, что

механическими колебаниями называют периодическое или почти периодическое движение тела.



Поставим опыты

Подвесим небольшой груз на нити, отведём его в сторону от положения равновесия и отпустим (рис. 9.1, а).

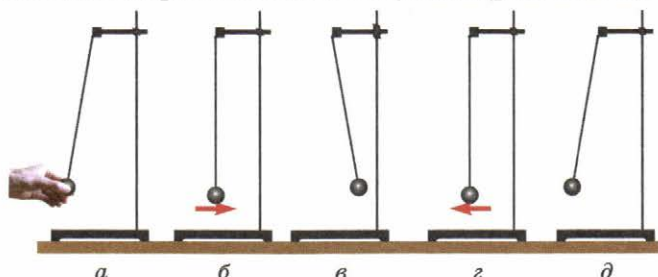


Рис. 9.1

Колебания груза будут повторяться *периодически*, то есть *через равные промежутки времени*. Обратите внимание на то, что груз колеблется около *положения равновесия*.

Колебания около положения равновесия совершает также груз, подвешенный на пружине (рис. 9.2, а—д).

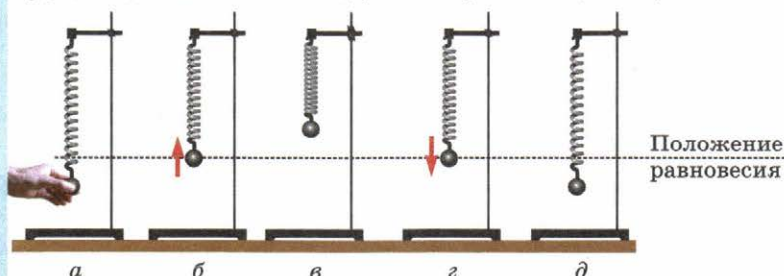


Рис. 9.2

1. Почему, достигнув положения равновесия (рис. 9.1, б и 9.2, б), груз не останавливается в этом положении, а продолжает движение, удаляясь от положения равновесия?
2. Почему в случае, когда можно пренебречь трением и сопротивлением воздуха, максимальное смещение груза после прохождения положения равновесия равно начальному смещению (рис. 9.1, в и 9.2, в)?
3. Почему когда при максимальном смещении от положения равновесия скорость груза в некоторый момент становится равной нулю, он не «замирает» в этом положении?
4. Почему в случае, когда можно пренебречь трением и сопротивлением воздуха, скорость груза при прохождении положения равновесия в одном и другом направлении (рис. 9.1 и 9.2, б и г) одинакова по модулю?

При выполнении этих заданий вы могли заметить, какую важную роль играет закон сохранения энергии при колебаниях. Обратите внимание также на то, что *при колебаниях происходят периодические превращения энергии из кинетической в потенциальную и обратно.*

5. В какие из изображённых на рисунках 9.1 и 9.2 моментов:
- а) кинетическая энергия груза максимальна? минимальна?
 - б) потенциальная энергия системы максимальна? минимальна?

В рассмотренных примерах колебания происходили под действием сил *между телами системы* (обратите внимание, что в их число входит также Земля). Силы, действующие между телами системы, называют *внутренними*.

Колебания, происходящие под действием внутренних сил системы, называют свободными колебаниями.

6. Приведите свои примеры свободных колебаний.

Условия возникновения свободных колебаний

В рассмотренных примерах тело совершало колебания *около положения устойчивого равновесия*. Из курса физики 10-го класса вы знаете, что при отклонении тела от положения устойчивого равновесия равнодействующая всех приложенных к телу сил стремится *вернуть* тело в положение равновесия.

Итак, первое условие возникновения свободных колебаний состоит в том, что тело (или система тел) находится вблизи положения устойчивого равновесия.

Чтобы колебания продолжались достаточно длительно, необходимо выполнение второго условия возникновения свободных колебаний: силы трения или силы сопротивления в системе должны быть достаточно малы.

Если второе условие не выполнено, то колебания быстро затухнут или могут даже вообще не возникнуть.

? 7. Равнодействующая каких сил стремится вернуть тело в положение равновесия в следующих случаях:

- а) подвешенный на нити груз отклонили от положения равновесия;
- б) подвешенный на пружине груз отклонили по вертикали от положения равновесия;
- в) на плавающий в воде деревянный брусок нажали сверху и отпустили.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ

Обозначим x смещение тела при колебаниях от положения равновесия. В процессе колебаний значение x периодически изменяется, в том числе *изменяя знак*, так как смещение от положения равновесия происходит то в одну, то в другую сторону.

Модуль наибольшего смещения от положения равновесия называют амплитудой колебаний.

Мы будем обозначать амплитуду колебаний x_{\max} .

Промежуток времени, в течение которого происходит одно колебание, называют периодом T колебаний.

В СИ период измеряют в секундах.

На рисунках 9.1 и 9.2 изображено одно полное колебание тела: тело, начав движение из одного крайнего положения (когда его смещение равно по модулю амплитуде колебаний), первый раз возвращается в *то же самое* крайнее положение.

? 8. Какой путь проходит колеблющийся на пружине груз за три периода колебаний, если амплитуда колебаний равна 2 см?

Число колебаний за одну секунду называют частотой ν колебаний.

9. Объясните, почему частота и период колебаний связаны соотношением

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

Единица измерения частоты — герц (Гц): 1 Гц = 1/с. Частоте 1 Гц соответствует одно колебание в секунду.

10. Подвешенный на пружине груз совершил 50 колебаний за 10 с. Амплитуда колебаний груза равна 2 см.
- Чему равен период колебаний?
 - Чему равна частота колебаний?
 - Какой путь прошёл груз за одну минуту?
 - Чему равно смещение груза за одну минуту?
 - Сколько раз груз прошёл через положение равновесия за одну минуту?

3. ЗАВИСИМОСТЬ КООРДИНАТЫ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ТЕЛА ОТ ВРЕМЕНИ

Зависимость координаты колеблющегося тела от времени можно наглядно увидеть в следующем опыте.



Поставим опыт

Подвесим на нити конический сосуд, из которого тонкой струйкой высыпается сухой песок (рис. 9.3).

Перемещая под колеблющимся конусом равномерно лист картона, мы получим график зависимости смещения груза от времени. Он очень похож на синусоиду (или косинусоиду).

Колебания, при которых смещение тела от положения равновесия изменяется по закону синуса (или косинуса) называют *гармоническими*.

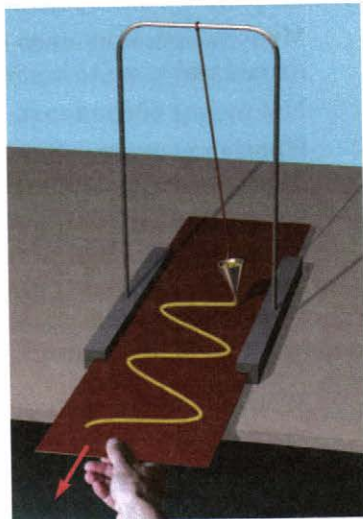


Рис. 9.3

В следующем параграфе мы выясним, *почему* малые колебания груза, подвешенного на нити, и колебания груза, подвешенного на пружине, являются гармоническими. А пока продолжим знакомство с описанием таких колебаний.

Уравнение гармонических колебаний

? 11. На рисунке 9.4 изображён график зависимости смещения от времени для тела, совершающего гармонические колебания с периодом T .

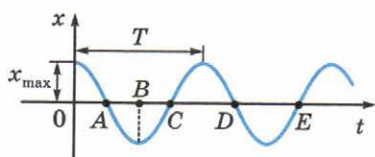


Рис. 9.4

- Чему равны промежутки времени между моментами, обозначенными точками на оси времени: A и B ; A и C ; A и D ; A и E ?
- В течение какого наибольшего промежутка времени смещение тела остаётся положительным? отрицательным?
- Через какие промежутки времени смещение тела обращается в нуль?
- Объясните, почему зависимость смещения от времени выражается формулой

$$x = x_{\max} \cos \frac{2\pi t}{T}. \quad (2)$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что период функции $\cos ax$ равен $\frac{2\pi}{a}$.

Формулу, выражающую зависимость смещения x от времени t для тела, совершающего гармонические колебания, называют *уравнением гармонических колебаний*. Обычно уравнение гармонических колебаний записывают в виде

$$x = x_{\max} \cos \omega t. \quad (3)$$

Величину ω называют *циклической частотой*.

? 12. Объясните, почему циклическая частота ω связана с периодом колебаний T и частотой колебаний ν соотношениями

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \omega = 2\pi\nu. \quad (4)$$

Подсказка. Сравните формулы (2) и (3) и воспользуйтесь соотношением (1).

? 13. На рисунке 9.5 приведены графики зависимости смещения от времени для двух гармонических колебаний.

а) Чему равны амплитуда, период, частота и циклическая частота колебаний, графики которых изображены красной и зелёной линиями?

б) Запишите в единицах СИ уравнения каждого из этих колебаний с численными данными.

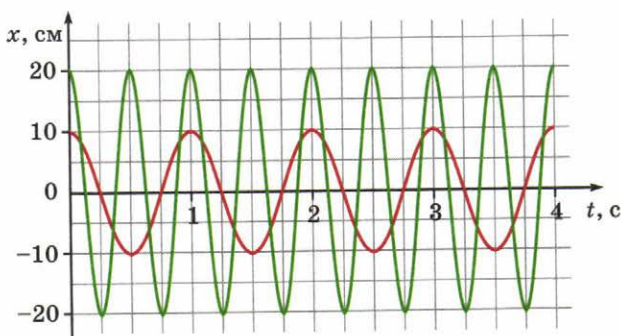


Рис. 9.5

Сравнение гармонических колебаний с равномерным движением тела по окружности

Вы, наверное, заметили, что формулы (4) совпадают с формулами для угловой скорости, частоты и периода при равномерном движении тела по окружности с той же разницей, что роль угловой скорости играет теперь циклическая частота (поэтому их обозначают одной и той же буквой ω).

Чтобы убедиться, что это сходство не случайно, рассмотрим, как изменяется координата x тела, равномерно движущегося в плоскости Oxy по окружности радиуса r (рис. 9.6). Угловая скорость равна ω , в начальный момент тело находится в точке A с координатами $(r; 0)$.

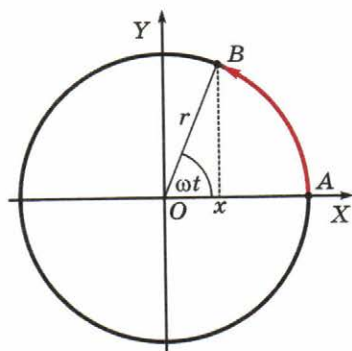


Рис. 9.6

? 14. Пусть в момент времени t тело проходит точку B (см. рис. 9.6).

- Чему равен угол поворота радиуса, проведённого к телу из центра окружности, за время t ?
- Объясните, почему координата тела x в момент времени t выражается формулой

$$x = r \cos \omega t. \quad (5)$$

Сравнивая эту формулу с уравнением гармонических колебаний (3), мы видим, что координата x тела *изменяется по закону гармонических колебаний*. Угловая скорость равна циклической частоте, а радиус окружности — амплитуде колебаний.



Поставим опыты

Укреплённый на горизонтальном диске шарик освещается горизонтальными параллельными лучами света (рис. 9.7). При *равномерном вращении* диска тень шарика на экране совершает *гармонические колебания*. Их можно синхронизировать с колебаниями подвешенного на нити груза.

Вместо укреплённого на диске шарика можно использовать конический маятник (рис. 9.8). Из формулы (5) следует, что, когда подвешенный на нити груз *равномерно движется по окружности*, его тень на экране совершает *гармонические колебания*.

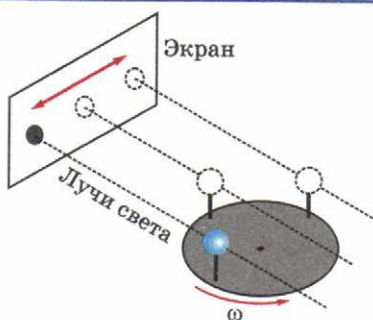


Рис. 9.7

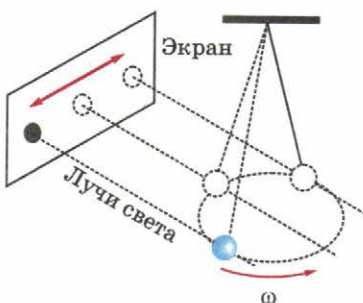


Рис. 9.8

? 15. Конический маятник движется по окружности радиуса r со скоростью v и освещается параллельным пучком лучей.

- Каковы амплитуда, период, частота и циклическая частота колебаний тени маятника на экране?
- Чему равна максимальная скорость тени?



Свободные механические колебания

Примеры механических колебаний

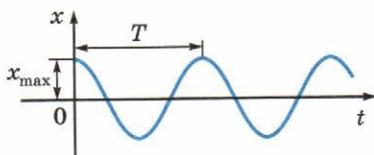


Соотношения между периодом, частотой и циклической частотой

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \omega = 2\pi\nu$$

Уравнение гармонических колебаний $x = x_{\max} \cos \omega t$

График гармонических колебаний



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

16. На рисунке 9.9 изображены графики зависимости смещения от времени для трёх гармонических колебаний. Какими цветами изображены графики колебаний:

- с одинаковой амплитудой?
- с одинаковой циклической частотой?

Запишите уравнения для всех трёх колебаний.

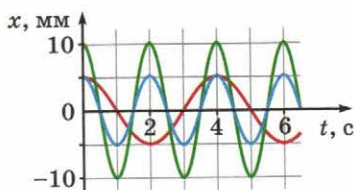


Рис. 9.9

§ 10. ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

1. ПЕРИОДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКОВ

Пружинный маятник

Рассмотрим свободные колебания горизонтального *пружинного маятника*: прикрепленный к пружине груз скользит по гладкому стержню (рис. 10.1). Будем считать, что массой пружины можно пренебречь.

Направим ось OX вдоль стержня, а начало координат совместим с грузом, когда он находится в положении равновесия, то есть когда пружина не деформирована (рис. 10.1).

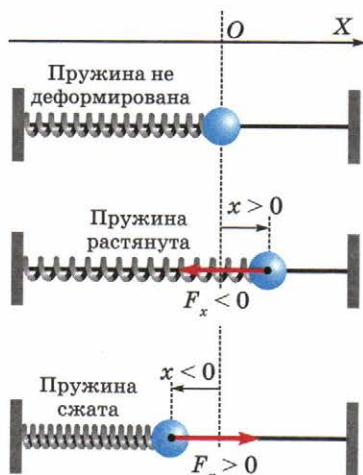


Рис. 10.1

? 1. Объясните, почему смещение груза x и проекция F_x силы упругости пружины \vec{F} на ось OX имеют *противоположные* знаки в любой момент времени (за исключением моментов, когда x и F_x равны нулю).

Обозначим массу груза m , а жёсткость пружины k .

? 2. Объясните, почему справедливо следующее соотношение:

$$a_x = -\frac{k}{m}x, \quad (1)$$

где a_x — проекция ускорения груза.

Подсказка. Воспользуйтесь вторым законом Ньютона и законом Гука.

Напомним, что проекция ускорения a_x связана с проекцией скорости v_x соотношением

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \Rightarrow a_x = v'_x, \quad (2)$$

где штрих обозначает производную *по времени*.

Поскольку проекция скорости v_x является производной по времени от смещения x , получаем:

$$a_x = v'_x \Rightarrow a_x = (x')' \Rightarrow a_x = x''.$$

Итак, проекция ускорения a_x — это *вторая производная* от смещения x :

$$a_x = x''. \quad (3)$$

Подставляя это выражение в формулу (1), получаем:

$$x'' = -\frac{k}{m}x. \quad (4)$$

Выясним теперь, удовлетворяет ли этому соотношению уравнение гармонических колебаний

$$x = x_{\max} \cos \omega t. \quad (5)$$

Используя формулы для производных тригонометрических функций, получаем:

$$x' = -\omega x_{\max} \sin \omega t, \quad (6)$$

$$x'' = -\omega^2 x_{\max} \cos \omega t. \quad (7)$$

Формулу (7) можно с учётом формулы (5) записать в виде

$$x'' = -\omega^2 x. \quad (8)$$

Эта уравнение *совпадает* с уравнением (4), если

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (9)$$

Наши рассуждения опирались на то, что проекция ускорения тела *прямо пропорциональна* смещению тела и имеет *противоположный* знак. Поскольку согласно второму закону Ньютона ускорение тела *прямо пропорционально* равнодействующей приложенных к нему сил, мы приходим к следующему важному выводу.

Механические колебания являются гармоническими, если при отклонении тела от положения устойчивого равновесия равнодействующая приложенных к нему сил *прямо пропорциональна* смещению тела.

Формула (9) связывает циклическую частоту колебаний ω с массой груза m и жёсткостью пружины k .

3. Объясните, почему период T и частота ν колебаний груза на пружине выражаются формулами

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}; \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (10)$$

4. Как надо изменить массу груза, чтобы период колебаний увеличился в 2 раза?

5. Как надо изменить жёсткость пружины, чтобы частота колебаний уменьшилась в $\sqrt{2}$ раз?

В следующем параграфе мы покажем, что период и частота вертикальных колебаний груза массой m , подвешенного на пружине жёсткостью k , также выражаются формулами (10). А пока воспользуйтесь ими при выполнении следующего задания.

6. Под весом подвешенного к пружине груза она удлинилась на 2,5 см.

а) Чему равно отношение массы груза к жёсткости пружины?

б) Чему равен период вертикальных колебаний груза на пружине?

Математический маятник

Математическим маятником называют модель подвешенного на нити груза, если:

- размеры груза намного меньше длины нити;
- массой нити можно пренебречь;
- нить можно считать нерастяжимой.

В следующем параграфе мы покажем, что *малые* колебания математического маятника, то есть колебания, амплитуда которых намного меньше длины нити, можно считать гармоническими. Там же мы выведем и приведённую ниже формулу для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (11)$$

где l — длина нити, g — ускорение свободного падения.

Обратите внимание: *период колебаний математического маятника не зависит от массы груза.*

7. Какой длины нить надо взять, чтобы колеблющийся на ней грузик проходил положение равновесия с интервалом 1 с?

Решение этой задачи подскажет вам, как можно очень просто сконструировать самодельный секундомер.

- ?** 8. Земные маятниковые часы перенесли на Луну, где ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле.
- Как изменится период колебаний маятника?
 - За сколько времени часовая стрелка этих часов совершит один полный оборот?

2. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СМЕЩЕНИЕМ, СКОРОСТЬЮ И УСКОРЕНИЕМ ТЕЛА ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Вернёмся к формулам (6) и (7). Поскольку $x' = v_x$, $x'' = a_x$, эти формулы можно переписать в виде

$$v_x = -\omega x_{\max} \sin \omega t, \quad (12)$$

$$a_x = -\omega^2 x_{\max} \cos \omega t, \quad (13)$$

Отсюда видно, что, когда тело совершает гармонические колебания, скорость и ускорение также изменяются по закону синуса или косинуса.

- ?** 9. Объясните, почему наибольшее значение скорости v_{\max} тела, совершающего гармонические колебания, связано с амплитудой колебаний x_{\max} соотношением

$$v_{\max} = \omega x_{\max}. \quad (14)$$

- ?** 10. Амплитуда колебаний колеблющегося на пружине груза массой 500 г равна 5 см. При прохождении положения равновесия скорость груза равна 2 м/с.
- Чему равна циклическая частота колебаний?
 - Чему равна жёсткость пружины?
 - Чему равен период колебаний?

- ?** 11. Объясните, почему наибольшее значение ускорения a_{\max} тела, совершающего гармонические колебания, связано с амплитудой колебаний x_{\max} соотношением

$$a_{\max} = \omega^2 x_{\max}. \quad (15)$$

- ?** 12. Груз массой 2 кг лежит на горизонтальной подставке, совершающей гармонические вертикальные колебания с амплитудой 7 мм и частотой 4 Гц.

- а) Чему равно максимальное значение ускорения груза?
 б) Каковы максимальное и минимальное значение веса груза во время колебаний?
 в) При какой амплитуде колебаний груз будет отрываться от подставки при той же частоте колебаний?

Подсказка. Воспользуйтесь выражением для веса груза, движущегося с ускорением.

3. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Как мы уже упоминали, при колебаниях происходят периодические превращения потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Пусть груз массой m на пружине жёсткостью k совершает гармонические колебания с амплитудой x_{\max} . Уравнение гармонических колебаний имеет вид

$$x = x_{\max} \cos \omega t. \quad (16)$$

? 13. При каких положениях груза потенциальная энергия упругой деформации пружины максимальна? Чему она при этом равна? За нулевой уровень потенциальной энергии примите состояние, когда пружина не деформирована.

? 14. При каких положениях груза его кинетическая энергия максимальна? Чему она при этом равна?

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (14) и (9).

При выполнении этих заданий вы увидели, что максимальные значения потенциальной и кинетической энергий колебательной системы «груз + пружина» *одинаковы*. Выясним теперь: сохраняется ли суммарная механическая энергия системы при колебаниях, если можно пренебречь трением?

? 15. Запишите формулы, выражающие зависимость потенциальной и кинетической энергии системы от времени. Постройте на одном чертеже графики этих зависимостей.

? 16. Объясните, почему из полученных в предыдущем задании формул следует, что *сумма потенциальной и кинетической энергий остаётся неизменной*.

Подсказка. Воспользуйтесь тождеством $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$.

- ?** 17. Груз на пружине совершает гармонические колебания с периодом 8 с. В начальный момент скорость груза равна нулю. В какие моменты времени в течение первого периода колебаний кинетическая энергия груза равна потенциальной энергии упругой деформации пружины?

Затухающие колебания

Вследствие трения амплитуда свободных колебаний постепенно уменьшается, так как механическая энергия переходит во внутреннюю: тело и среда, в которой оно движется, нагреваются. Такие колебания называют *затухающими* (рис. 10.2).

Поскольку трение в той или иной степени присутствует в *любой* системе, свободные колебания всегда являются затухающими. Однако в некоторых случаях затухание колебаний может происходить в течение длительного времени. Например, тяжёлый груз, подвешенный на длинной нити, может совершать колебания в воздухе очень долго практически с неизменной амплитудой. Но колебания этого же груза в воде затухают за несколько минут, так как сопротивление воды намного больше сопротивления воздуха.

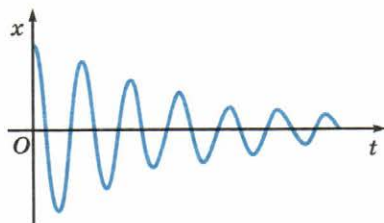


Рис. 10.2

4. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Как мы видели, *частота свободных колебаний определяется свойствами самой системы* (например, длиной нити для математического маятника; массой груза и жёсткостью пружины для пружинного маятника). Поэтому частоту свободных колебаний называют *собственной частотой*. Обычно её обозначают ν_0 .

Тело или система тел может также совершать колебания под действием *внешней периодически изменяющейся силы*. Скажем, качели можно раскачивать, периодически их подталкивая.

Колебания, совершаемые под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют *вынужденными колебаниями*.

Вынужденные колебания, если они происходят длительное время, совершаются *с частотой изменения внешней силы*.

Резонанс

Вынужденные колебания могут продолжаться сколь угодно долго даже при наличии трения, потому что в этом случае работа периодической внешней силы всё время восполняет обусловленную трением потерю механической энергии.

На рисунке 10.3 приведены полученные из опыта графики зависимости амплитуды x_{\max} вынужденных колебаний от частоты ν внешней силы для двух значений силы трения.

Мы видим, что чем ближе частота ν внешней силы к собственной частоте ν_0 , тем больше амплитуда вынужденных колебаний.

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний в случае, когда частота внешней силы совпадает с собственной частотой, называют резонансом.

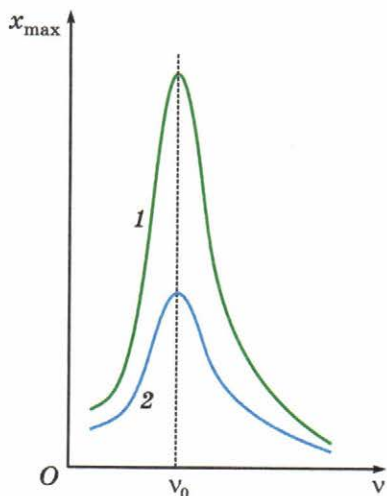


Рис. 10.3

Чем меньше сила трения в системе, тем выше резонансный максимум (его называют часто *резонансным пиком*).

? 18. Какому из двух графиков на рисунке 10.3 соответствует бóльшая сила трения?

Может ли резонанс быть опасным? В 1940 году в США огромный висячий мост длиной почти в километр раскачался и рухнул. Причиной разрушения оказался резонанс: от моста периодически отрывались воздушные вихри, и частота отрыва вихрей совпала с собственной частотой колебаний моста.

Известны и другие примеры опасного увеличения амплитуды вынужденных колебаний вследствие резонанса, которые приводили к катастрофическим последствиям.

Резонанс может оказаться опасным при работе любых машин, в которых есть вращающиеся или движущиеся периодически части (а они есть практически во всех машинах). При вращении вала станка или двигателя может возникнуть периодическая сила, действующая на основу механизма (в таком

случае говорят, что возникла разбалансировка). Если частота этой силы окажется близкой к собственной частоте колебаний основы механизма, амплитуда колебаний может возрасти настолько, что это приведёт к разрушению механизма.

Чтобы избежать нежелательных проявлений резонанса, изменяют либо частоту внешней силы, либо собственную частоту системы. Явление резонанса можно также ослабить, увеличивая силы сопротивления или трения: как мы знаем, высота резонансного пика при этом уменьшается.

Может ли резонанс быть полезным? Явление резонанса используется во всех музыкальных инструментах для усиления звука. Резонанс находит применение также во многих приборах, в том числе измерительных.

В быту резонанс часто используют, когда надо сдвинуть с места что-либо тяжёлое, например застрявший автомобиль. В таком случае интуитивно подбирают частоту толчков так, чтобы она была близка к собственной частоте системы. В результате амплитуда колебаний возрастает и, наконец, становится настолько большой, что тело уже не возвращается в прежнее положение.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Период колебаний
пружинного маятника

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

Период колебаний
математического маятника

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

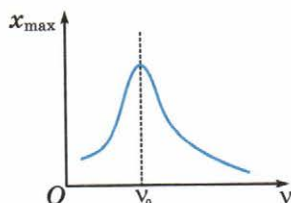
$$v_{\max} = \omega x_{\max}$$

$$a_{\max} = \omega^2 x_{\max}$$

Затухающие колебания



Резонанс





ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

19. Латунный шарик совершает колебания на пружине. Как изменится период колебаний, если:
- уменьшить радиус шарика в 2 раза?
 - заменить латунный шарик алюминиевым того же радиуса (для расчёта примите, что плотность алюминия в 3 раза меньше плотности латуни)?
 - заменить пружину половиной такой же пружины?
 - перенести систему на Луну (где ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле)?

20. Тело совершает гармонические колебания с амплитудой x_{\max} и частотой ν .
- а) Объясните, почему смещение x и скорость v тела в любой момент времени связаны соотношением

$$x^2 + \left(\frac{v}{\omega}\right)^2 = x_{\max}^2.$$

Подсказка. Воспользуйтесь законом сохранения энергии или тождеством $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$.

- б) Чему равен модуль скорости тела в момент, когда смещение равно половине амплитуды?
21. Тело совершает гармонические колебания. В момент, когда смещение тела равно 6 см, его скорость равна 30 см/с, а в момент, когда смещение равно 2 см, скорость тела равна 50 см/с.
- Чему равна частота колебаний?
 - Чему равна амплитуда колебаний?

22. Груз лежит на горизонтальной подставке, совершающей гармонические горизонтальные колебания с периодом 0,9 с. Коэффициент трения между грузом и подставкой 0,4.

- В каких пределах должно быть ускорение груза, если он не проскальзывает при колебаниях?
- При какой амплитуде колебаний груз будет скользить по подставке при колебаниях?

Подсказка. Сила трения покоя не может превышать своего максимального значения, которое обычно принимают равным силе трения скольжения.

§ 11. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

1. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Соединим обкладки заряженного конденсатора с проводочной катушкой (рис. 11.1, а).

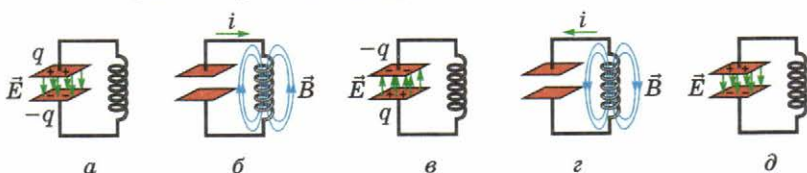


Рис. 11.1

Конденсатор начнёт *разряжаться*, и через катушку пойдёт электрический ток. Из-за явления самоиндукции сила тока в катушке будет увеличиваться *постепенно* и достигнет максимума, когда конденсатор разрядится (рис. 11.1, б).

Однако вследствие самоиндукции ток будет продолжать идти ещё некоторое время *в том же* направлении, *заряжая* теперь конденсатор. Сила тока обратится на мгновение в нуль в тот момент, когда первоначальные заряды на обкладках конденсатора «поменяются местами», то есть конденсатор перезарядится (рис. 11.1, в).

- ?** 1. Опишите явления, проиллюстрированные рисунками 11.1, г и д.

Рассмотренный процесс перезарядки конденсатора через катушку *периодически повторяется*. При этом периодически изменяются значения электрического заряда конденсатора и напряжения на нём, а также силы тока в цепи.

Периодические изменения значения электрического заряда, силы тока и напряжения в цепи называют электромагнитными колебаниями.

Конденсатор, соединённый с катушкой, называют *колебательным контуром*. Как мы увидим, если можно пренебречь потерями энергии, то электромагнитные колебания в колебательном контуре будут незатухающими и *гармоническими*.

- ?** 2. Объясните, почему промежуток времени, разделяющий состояния колебательного контура, изображённые на рисунках 11.1, а и д, равен одному периоду колебаний.

Как наблюдают электромагнитные колебания

Наблюдать электромагнитные колебания сложнее, чем механические: мы *видим* смещение и движение груза, а ни заряд конденсатора, ни ток в катушке непосредственно *не видны*.

Колебания напряжения на конденсаторе и силы тока в катушке нельзя измерить с помощью вольтметра и амперметра, потому что обычно частота этих колебаний настолько велика, что, например, стрелка амперметра вследствие инерции не будет «поспевать» за изменениями силы тока.

Для изучения электромагнитных колебаний используют специальный прибор — *осциллограф* (рис. 11.2).

На экране осциллографа можно наблюдать зависимость от времени напряжения на конденсаторе колебательного контура подобно тому, как мы наблюдали зависимость смещения от времени с помощью «песочного маятника» (§ 9).

2. ПЕРИОД ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Присоединим мысленно вольтметр¹ к колебательному контуру, как показано на рисунке 11.3. Вольтметр будет показывать одновременно и напряжение на конденсаторе, и ЭДС самоиндукции в катушке. Это означает, что ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} в катушке в любой момент времени равна напряжению u на конденсаторе²:

$$\mathcal{E}_{si} = u. \quad (1)$$



Рис. 11.2

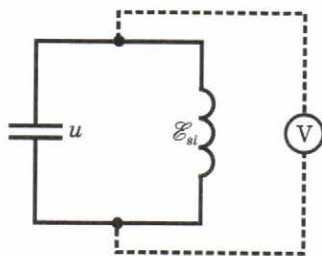


Рис. 11.3

¹ Мы рассматриваем идеальный вольтметр, то есть вольтметр, сопротивление которого можно считать бесконечно большим. Будем считать также, что частота колебаний мала, и вольтметр «успевает показывать» мгновенные значения переменного напряжения. Сопротивлением катушки и проводов пренебрежём.

² Переменные напряжение и силу тока обозначают *малыми* буквами u и i .

Согласно закону электромагнитной индукции (§ 6), ЭДС индукции \mathcal{E}_{si} связана со скоростью изменения силы тока соотношением

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \Rightarrow \mathcal{E}_{si} = -Li', \quad (2)$$

где L — индуктивность катушки. Штрих обозначает производную по времени.

Напряжение u на конденсаторе связано с зарядом q на нём соотношением (см. учебник физики 10-го класса):

$$u = \frac{q}{C}, \quad (3)$$

где C — электроёмкость конденсатора.

? 3. Объясните, почему справедливо соотношение

$$Li' = -\frac{q}{C}. \quad (4)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (1), (2) и (3). Вспомним теперь, что

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow i = q'. \quad (5)$$

Поэтому

$$i' = q''. \quad (6)$$

? 4. Объясните, почему справедливо соотношение

$$Lq'' = -\frac{q}{C}. \quad (7)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (4) и (6).

Наверное, вы уже догадались, что это уравнение для заряда конденсатора можно переписать в знакомом виде

$$q'' = -\omega^2 q. \quad (8)$$

Это уравнение означает, что колебания заряда конденсатора являются *гармоническими* с циклической частотой ω . Зависимость заряда от времени выражается *уравнением гармонических колебаний*:

$$q = q_{\max} \cos \omega t. \quad (9)$$

5. Объясните, почему циклическая частота электромагнитных колебаний выражается формулой

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (10)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (7) и (8).

6. Объясните, почему период электромагнитных колебаний выражается формулой

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (11)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулой, которая связывает период колебаний с циклической частотой (§ 9).

Эту формулу называют *формулой Томсона* в честь английского учёного У. Томсона, который вывел её впервые.

7. Объясните, почему максимальное значение i_{\max} силы тока в катушке связано с максимальным значением q_{\max} заряда конденсатора соотношением

$$i_{\max} = \omega q_{\max}. \quad (12)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (5) и (9).

8. Как изменится период электромагнитных колебаний, если:

- увеличить электроёмкость конденсатора в 4 раза?
- уменьшить индуктивность катушки в 2 раза?

9. Чему равен период электромагнитных колебаний, если электроёмкость конденсатора 1,5 мкФ, а индуктивность катушки 2,5 мГн?

10. Период электромагнитных колебаний равен 0,25 мкс. Чему равна электроёмкость конденсатора, если индуктивность катушки 2 мкГн?

11. При электромагнитных колебаниях максимальное значение заряда конденсатора равно 3 мкКл, а максимальное значение силы тока в катушке равно 6 мА.

- Чему равна циклическая частота колебаний?
- Чему равен период колебаний?
- Чему равна электроёмкость конденсатора, если индуктивность катушки равна 5 мГн?
- Каким станет максимальное значение силы тока, если максимальное значение заряда станет равным 10 мкКл?

3. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Пусть в начальный момент конденсатор заряжен, а сила тока равна нулю. Тогда заряд конденсатора зависит от времени по закону

$$q = q_{\max} \cos \omega t. \quad (13)$$

? 12. Объясните, почему зависимость от времени энергии W_p электрического поля в конденсаторе выражается формулой

$$W_p = \frac{q_{\max}^2}{2C} \cos^2 \omega t. \quad (14)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулой для энергии электрического поля в конденсаторе (учебник физики 10-го класса).

? 13. Объясните, почему зависимость от времени энергии W_k магнитного поля в катушке выражается формулой

$$W_k = \frac{Li_{\max}^2}{2} \sin^2 \omega t. \quad (15)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулой для энергии магнитного поля в катушке.

? 14. Чему равно отношение энергии электрического поля в конденсаторе к энергии магнитного поля в катушке, когда:

- заряд на конденсаторе равен половине своего максимального значения?
- сила тока в катушке равна половине своего максимального значения?

? 15. Объясните, почему

$$W_p + W_k = \frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{Li_{\max}^2}{2}. \quad (16)$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (10), (14), (15) и тригонометрическим тождеством $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$.

Из формулы (16) следует, что при электромагнитных колебаниях происходят взаимные превращения энергии электрического поля в конденсаторе в энергию магнитного поля в катушке и обратно. Однако *суммарная энергия электрического поля в конденсаторе и магнитного поля в катушке остаётся*

постоянной при колебаниях: она равна максимальному значению энергии электрического поля в конденсаторе или, что то же самое, максимальному значению энергии магнитного поля в катушке.

Конечно, суммарная энергия электрического поля в конденсаторе и магнитного поля в катушке сохраняется только при условии, что можно пренебречь потерями энергии. Одна из причин этих потерь — нагревание проводов, другая — излучение электромагнитных волн. Эти потери всегда в той или иной мере присутствуют, поэтому *свободные* электромагнитные колебания всегда являются *затухающими*.

Незатухающими могут быть только *вынужденные* электромагнитные колебания. Их мы рассмотрим далее.

4. АНАЛОГИЯ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Сравним уравнения, описывающие колебания пружинного маятника и электромагнитные колебания:

$$mx'' = -kx. \quad (17)$$

$$Lq'' = -\frac{q}{C}. \quad (18)$$

Мы видим, что роль смещения x в случае электромагнитных колебаний играет заряд конденсатора q .

Индуктивность L , как мы уже упоминали ранее, аналогична массе m .

Роль жёсткости пружины k играет величина $\frac{1}{C}$, обратная электроёмкости конденсатора. Чем меньше электроёмкость, тем больше напряжение на пластинах конденсатора при том же заряде пластин. А из сравнения уравнений (17) и (18) мы видим, что напряжение между пластинами, равное $\frac{q}{C}$, играет роль силы упругости, равной по модулю kx .

Предлагаем вам продолжить аналогию между механическими и электромагнитными колебаниями при выполнении следующего задания.

? 16. Какая физическая величина в случае электромагнитных колебаний аналогична:

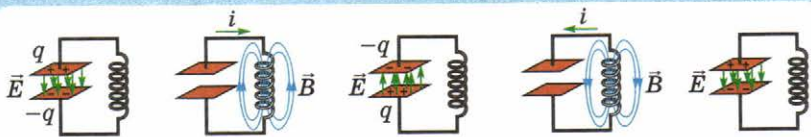
- скорости?
- потенциальной энергии упругой деформации пружины?
- кинетической энергии груза?

17. Составьте в тетради таблицу, в которой указано соответствие между механическими и электромагнитными величинами при колебаниях.

18. Перенесите схематически рисунки 11.1, *a—d* в тетрадь и под каждым состоянием колебательного контура изобразите соответствующее ему состояние механического маятника (пружинного или математического).

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Колебательный контур



$$Lq'' = -\frac{q}{C}$$

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

Формула Томсона

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

Аналогия между механическими и электромагнитными величинами

$x \leftrightarrow q$	$\frac{kx^2}{2} \leftrightarrow \frac{q^2}{2C}$
$v \leftrightarrow i$	
$m \leftrightarrow L$	$\frac{mv^2}{2} \leftrightarrow \frac{Li^2}{2}$
$k \leftrightarrow \frac{1}{C}$	

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

- Как изменится период электромагнитных колебаний, если пространство между обкладками конденсатора заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной 8?
- Как изменится период электромагнитных колебаний, если расстояние между пластинами конденсатора уменьшить в 2 раза, а площадь пластин увеличить в 3 раза?
- Заряд конденсатора колебательного контура изменяется со временем по закону $q = 3 \cdot 10^{-7} \cos 800\pi t$ (в единицах СИ). Индуктивность катушки 2 Гн. Каково максимальное значение энергии электрического поля в конденсаторе?

§ 12. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

1. ИНДУКЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Практически на всех электростанциях мира электрический ток генерируют с помощью *индукционных генераторов*, которые порождают *вынужденные* электромагнитные колебания с заданной частотой.



Поставим опыт

Воспользуемся изображённой на рисунке 12.1 моделью индукционного генератора. Проволочная рамка может вращаться между полюсами магнита. Подсоединим к ней лампочку накаливания. Если вращать рамку, лампочка будет гореть, причём её яркость будет периодически изменяться. Это означает, что в рамке возникает периодически изменяющаяся ЭДС индукции.

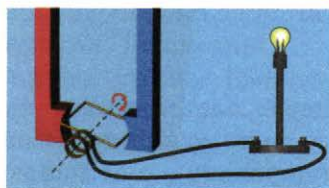


Рис. 12.1

- ?** 1. Прямоугольная рамка площадью S равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией B с циклической частотой ω . Ось вращения рамки перпендикулярна вектору магнитной индукции. В начальный момент плоскость рамки перпендикулярна вектору магнитной индукции. Объясните, почему справедливы следующие соотношения для пронизывающего рамку магнитного потока Φ и ЭДС индукции¹ e_i :

$$\Phi = BS \cos \omega t, \quad (1)$$

$$e_i = BS \sin \omega t. \quad (2)$$

Подсказка. Воспользуйтесь законом электромагнитной индукции.

Если вращающаяся в магнитном поле рамка включена в электрическую цепь, то в цепи возникает *переменный электрический ток*.

- ?** 2. Проволочная рамка площадью 10 см^2 вращается с частотой 50 Гц в магнитном поле с индукцией 2 Тл . Рамка

¹ Переменную ЭДС обозначают *малой* буквой e .

соединена с резистором сопротивлением 20 Ом. По какому закону изменяется сила тока i в резисторе (в единицах СИ)? Сопротивлением рамки можно пренебречь.

Чтобы «снимать» с вращающейся рамки ток, не переключая при этом проводов, используют скользящие контакты — уже знакомые вам *щётки*. Щётки касаются *контактных колец*, припаянных к рамке. При вращении рамки щётки скользят по контактными кольцам, обеспечивая непрерывный электрический контакт, и индуцированный в рамке ток отводится во внешнюю цепь.

Описанный индукционный генератор индуцирует переменный электрический ток. Он имеет большое преимущество перед постоянным током. Дело в том, что в сети переменного тока можно практически без потерь повышать и понижать напряжение с помощью *трансформаторов*. Ниже мы рассмотрим принцип действия трансформатора и выясним, зачем нужно повышать и понижать напряжение при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Можно ли вращать не рамку, а магниты?

Мы видели, что для того, чтобы снимать ток с вращающейся рамки, приходится использовать скользящие контакты. У них сравнительно большое сопротивление, поэтому если сила индукционного тока велика, на скользящих контактах выделяется большое количество теплоты, и они сильно нагреваются. А можно ли, чтобы избежать применения скользящих контактов, вращать не рамку, а магниты, создающие магнитное поле?

Конечно, можно: ведь для возникновения индукционного тока важно лишь, чтобы пронизывающий рамку магнитный поток *изменялся во времени*. Возникновение индукционного тока в неподвижной рамке при вращении магнита иллюстрирует рисунок 12.2. Именно по такому принципу обычно и устроены генераторы.

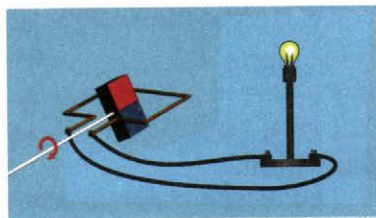


Рис. 12.2

В промышленных генераторах электрического тока на электростанциях в качестве вращающихся магнитов используют электромагниты. Ток к ним приходится подводить всё-таки

с помощью скользящих контактов, но сила этого тока значительно меньше силы тока, который индуцируется в рамке.

В промышленных генераторах электрического тока используют многополюсные электромагниты. Благодаря этому можно индуцировать электрический ток с частотой 50 Гц при сравнительно небольшой частоте вращения турбин.

На рисунке 12.3 изображены генераторы гидроэлектростанции, а на рисунке 12.4 — схема одного генератора. Движущаяся вода (поток воды обозначен стрелками) вращает лопасти турбины, на валу которой укреплен многополюсный электромагнит.



Рис. 12.3

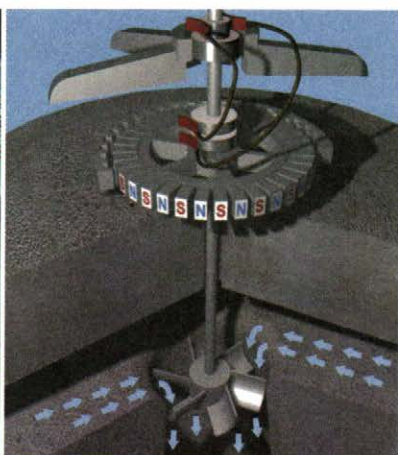


Рис. 12.4

Действующие значения силы тока и напряжения

Если напряжение в цепи переменного тока, состоящего из генератора и резистора сопротивлением R , изменяется по закону синуса или косинуса, то согласно закону Ома:

$$u = u_{\max} \cos \omega t \Rightarrow i = \frac{u}{R} = \frac{u_{\max} \cos \omega t}{R} \Rightarrow i = i_{\max} \cos \omega t. \quad (3)$$

При этом максимальное значение силы тока связано с максимальным значением напряжения соотношением

$$i_{\max} = \frac{u_{\max}}{R}. \quad (4)$$

Найдём теперь, как изменяется со временем *мощность* тока, которая выражается формулой

$$p = i^2 R. \quad (5)$$

Поскольку $i = i_{\max} \cos \omega t$, получаем:

$$p = i_{\max}^2 R \cos^2 \omega t. \quad (6)$$

Чему равно *среднее* значение мощности \bar{p} за один период колебаний? Для этого воспользуемся тем, что

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1,$$

а также тем, что средние значения $\overline{\sin^2 \omega t}$ и $\overline{\cos^2 \omega t}$ за период одинаковы (усреднение обозначают чертой вверху). Поэтому

$$\overline{\cos^2 \omega t} = \frac{1}{2}. \quad (7)$$

Таким образом, из формул (6) и (7) получаем:

$$\bar{p} = \frac{i_{\max}^2 R}{2}. \quad (8)$$

Заметим теперь, что для *постоянного* тока мощность тока выражается формулой

$$P = I^2 R. \quad (9)$$

Сравнивая формулы (8) и (9), мы видим, что за время, в течение которого происходит достаточно много колебаний силы тока, в резисторе выделяется *одинаковое количество теплоты* в случае переменного и постоянного тока, если сила постоянного тока I удовлетворяет соотношению

$$I = \frac{i_{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Это значение силы тока называют *действующим значением* силы переменного тока. Итак,

действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при протекании которого выделяется такое же количество теплоты, что и при протекании переменного тока за одно и то же время.

Мы видим, что *действующее значение силы переменного тока I в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального (амплитудного) значения силы тока i_{\max} .*

Аналогично определяют и действующее значение напряжения переменного тока:

$$U = \frac{u_{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Действующие значения силы тока и напряжения связаны законом Ома:

$$U = IR. \quad (12)$$

Для измерения силы тока и напряжения переменного тока используют специально предназначенные для этого амперметры и вольтметры переменного тока (это указано на шкале прибора значком \sim). Эти приборы показывают именно действующие (а не амплитудные) значения силы тока и напряжения. Этими же значениями определяется и средняя мощность переменного тока:

$$P = UI.$$

- ?** 3. В течение какой части периода колебаний значение силы переменного тока больше действующего значения силы тока? меньше?

2. ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Производство электроэнергии

Электроэнергию производят сегодня в основном на электростанциях трёх типов:

- *тепловых электростанциях,*
- *атомных электростанциях,*
- *гидроэлектростанциях.*

- ?** 4. Найдите в Интернете сведения о том, какова сегодня доля электростанций каждого типа в мировом производстве электроэнергии.

На тепловых электростанциях с помощью тепловых двигателей (обычно — паровых турбин) внутреннюю энергию топлива (нефти, газа, угля) преобразуют в механическую энергию. А затем механическую энергию преобразуют в электрическую с помощью *индукционных генераторов.*

На атомных электростанциях энергию, которая выделяется в атомных реакторах при делении атомных ядер (например, урана), преобразуют также с помощью тепловых двигателей в механическую энергию, после чего механическую энергию преобразуют в электрическую также с помощью индукционных генераторов. О принципах действия атомных реакторов мы расскажем далее.

На гидроэлектростанциях (ГЭС) механическую энергию падающей воды с помощью индукционных генераторов преобразуют в электрическую энергию. На рисунке 12.5 изображена плотина крупнейшей в России Саяно-Шушенской ГЭС.



Рис. 12.5

К сожалению, все крупные электростанции оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Тепловые электростанции загрязняют воздух продуктами сгорания топлива. Кроме того, в них используются тепловые двигатели огромной мощности, а для работы теплового двигателя, как вы знаете из курса физики 10-го класса, необходим холодильник, в качестве которого используется обычно окружающая среда. Это приводит к её «тепловому загрязнению».

Атомные электростанции также приводят к тепловому загрязнению, поскольку и в них используются тепловые двигатели. Кроме того, как показала практика, на атомных электростанциях существует опасность аварий, сопровождаемых выбросом радиоактивных веществ.

В гидроэлектростанциях тепловые двигатели не используются, так как там происходит непосредственное превращение механической энергии в электрическую. Поэтому работа таких электростанций не сопровождается тепловым загрязнением; при этом нет также выбросов продуктов сгорания и опасности выброса радиоактивных веществ. Поэтому гидроэлектростанции считают экологически наименее вредными. Однако и они влияют на окружающую среду. Дело в том, что турбины гидроэлектростанции вращаются благодаря падению воды с большой высоты. Чтобы создать необходимую разность уровней воды, на реках строят высокие плотины. Вследствие этого возникают искусственные «моря», что приводит к затоплению больших территорий, которые выводятся из землепользования.

Передача и потребление электроэнергии

На больших электростанциях электрическая энергия вырабатывается под напряжением в десятки тысяч вольт. Затем для уменьшения потерь при передаче на большие расстояния напряжение повышают в десятки раз — до сотен тысяч вольт.

Почему электрическую энергию передают на большие расстояния под высоким напряжением? Главная причина потерь при передаче энергии — это *нагревание проводов*, то есть превращение электрической энергии во внутреннюю. Как уменьшить эти потери?

Как вы уже знаете, согласно закону Джоуля — Ленца при прохождении тока в проводнике выделяется количество теплоты $Q = I^2Rt$, где I — сила тока, R — сопротивление проводника, t — время. Следовательно, чтобы уменьшить нагревание проводов, надо уменьшать их сопротивление и силу тока в них. Для уменьшения сопротивления увеличивают диаметр проводов, но «резервы» тут не так уж велики: очень толстые провода будут слишком тяжелы (к тому же это приводит к большому расходу металла). Поэтому стараются максимально уменьшить силу тока в проводах.

Для сохранения той же передаваемой *мощности* при уменьшении силы тока в некоторое число раз необходимо во столько же раз увеличить напряжение, так как мощность, передаваемая потребителю, равна *произведению* $P = UI$, где U — напряжение в сети. Отсюда сила тока $I = \frac{P}{U}$. Подставляя это выражение в выражение $Q = I^2Rt$ для количества теплоты, выделяемой в проводах, получаем: $Q = \frac{P^2Rt}{U^2}$, откуда видно, что

при заданной передаваемой мощности P и заданном сопротивлении проводов R «тепловые потери» в проводах *обратно пропорциональны квадрату напряжения* U .

В высоковольтных линиях электропередач напряжение составляет *сотни тысяч вольт*, что в *тысячи раз* больше напряжения в квартирах (обычно это 220 В).

А ведь при повышении напряжения в тысячу раз потери на нагревание проводов уменьшаются в *миллион раз!*

Хотя высокое напряжение и имеет описанные выше большие преимущества, у него есть и огромный недостаток: оно *опасно для жизни*.

Поэтому перед передачей потребителю напряжение в несколько этапов понижают в тысячи раз.

Трансформатор. Для повышения и понижения напряжения используют *трансформаторы*¹.

¹ От латинского «трансформо» — преобразовывать.

Трансформатор состоит из двух катушек изолированного провода, намотанных на общий стальной сердечник (рис. 12.6).

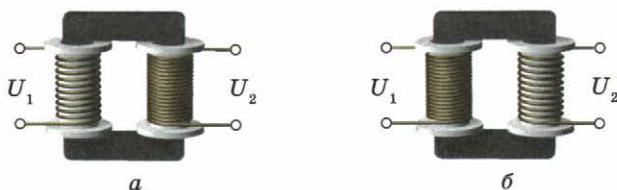


Рис. 12.6

Одну катушку (её называют первичной обмоткой) подключают к источнику переменного напряжения с действующим значением напряжения U_1 , а с другой катушки (вторичной обмотки) снимают переменное напряжение U_2 для его передачи. Обозначим число витков в обмотках N_1 и N_2 соответственно.

Переменный ток создаёт в первичной обмотке переменное магнитное поле. Оно сосредоточено внутри стального сердечника, поэтому обе обмотки пронизываются одним и тем же переменным магнитным потоком. Вследствие явления электромагнитной индукции в каждой витке каждой обмотки возникает одинаковая ЭДС индукции.

? 5. Объясните, почему справедливо соотношение

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

Если $U_2 > U_1$, трансформатор называют *повышающим*, а если $U_2 < U_1$, трансформатор называют *понижающим*.

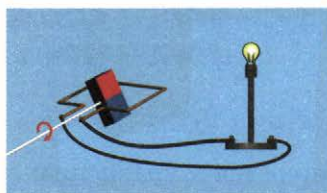
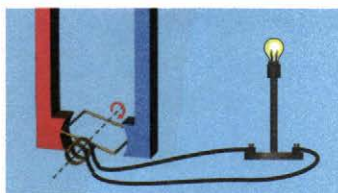
? 6. На каком из рисунков 12.6, *а*, *б* изображён повышающий трансформатор, а на каком — понижающий?

? 7. Через отверстие замкнутого сердечника трансформатора, понижающего напряжение с 220 В до 42 В, пропущен провод, концы которого соединены с вольтметром переменного тока. Во время работы трансформатора вольтметр показывает 2 В.

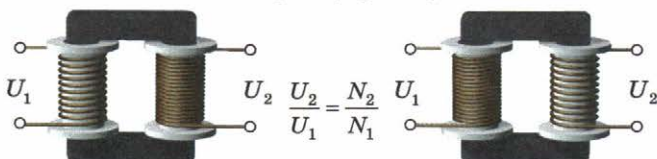
- Чему равна ЭДС индукции в одном витке обмотки, содержащей большее число витков?
- Чему равна ЭДС индукции в одном витке обмотки, содержащей меньшее число витков?
- Сколько витков в каждой обмотке?



Индукционный генератор электрического тока



Трансформатор



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

8. Прямоугольная проволочная рамка площадью 200 см^2 , содержащая 40 витков, равномерно вращается с частотой 8 Гц в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл. Ось вращения рамки перпендикулярна вектору магнитной индукции. Рамка замкнута на резистор сопротивлением 10 Ом. Сопротивлением рамки можно пренебречь.
- Каково максимальное значение ЭДС индукции в одном витке рамки?
 - Каково максимальное значение ЭДС индукции во всей рамке?
 - Чему равно максимальное значение силы тока в резисторе?
 - Чему равно действующее значение силы тока в резисторе?
 - Какое количество теплоты выделится в резисторе за 1 ч?



§ 13. БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ ВОПРОСЫ КОЛЕБАНИЙ

1. ФАЗА КОЛЕБАНИЙ

Вернемся к уравнению

$$x'' = -\omega^2 x, \quad (1)$$

решением которого, как мы уже знаем, является

$$x = x_{\max} \cos \omega t. \quad (2)$$

Но это — *не единственное* решение уравнения (1)! У него бесконечно много решений, потому что его решением является функция

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

с произвольными постоянными A и φ_0 .

? 1. Проверьте, что функция (3) удовлетворяет уравнению (1).

Каков же смысл входящих в формулу (3) постоянных A и φ_0 ? Нетрудно догадаться, что A равна по модулю амплитуде колебаний x_{\max} .

А чтобы понять смысл постоянной φ_0 , рассмотрим выражение, стоящее в формуле (3) под знаком косинуса. Его называют *фазой колебаний* и обозначают обычно буквой φ :

$$\varphi = \omega t + \varphi_0. \quad (4)$$

Измеряют фазу колебаний в *радианах*. Обычно рассматривают изменение фазы в течение одного периода колебаний.

? 2. Объясните, почему за время, равное одному периоду колебаний T , фаза колебаний изменяется на 2π .

? 3. Насколько изменяется фаза колебаний, когда смещение колеблющегося тела изменяется от нуля до амплитудного значения?

Постоянную φ_0 в выражении для фазы колебаний, то есть значение фазы колебаний при $t = 0$, называют *начальной фазой*.

Будем считать, что если уравнение колебаний выражается формулой

$$x = x_{\max} \cos \omega t,$$

начальная фаза равна нулю.

- ?** 4. Объясните, почему если уравнение колебаний выражается формулой

$$x = x_{\max} \sin \omega t,$$

то начальная фаза колебаний равна $-\frac{\pi}{2}$ или $\frac{3\pi}{2}$.

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что $\sin \omega t = \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$, а

также периодичностью тригонометрических функций.

Если два колебания происходят с одной частотой, но отличаются начальными фазами, то говорят, что между ними есть *сдвиг фаз*. В частности, если сдвиг фаз между двумя колебаниями равен π , то говорят, что эти колебания находятся в *противофазе*.

- ?** 5. Объясните, почему для колебаний, находящихся в противофазе, знаки смещений в любой момент противоположны.

2. КОЛЕБАНИЯ ГРУЗА, ПОДВЕШЕННОГО НА ПРУЖИНЕ

Рассмотрим вертикальные колебания груза массой m , подвешенного на пружине жёсткостью k . Будем считать, что массой пружины можно пренебречь.

Направим ось Ox вертикально вниз, а начало координат совместим с концом пружины, когда пружина не деформирована (рис. 13.1). Удлинение пружины, при котором груз находится в равновесии, то есть когда силу тяжести уравновешивает сила упругости пружины, обозначим x_0 .

- ?** 6. Объясните, почему

$$x_0 = \frac{mg}{k}. \quad (5)$$

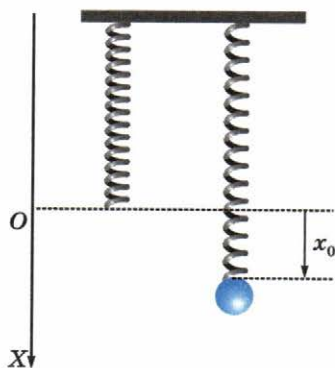


Рис. 13.1

7. Объясните, почему уравнение второго закона Ньютона в проекции на ось x можно записать в виде

$$ma_x = -k(x - x_0). \quad (6)$$

8. Объясните, почему уравнение (6) можно переписать в виде

$$(x - x_0)'' = -\frac{k}{m}(x - x_0). \quad (7)$$

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что $(x - x_0)'' = x''$.

Заметим теперь, что уравнение (7) отличается от уже знакомого нам уравнения

$$a_x = -\frac{k}{m}x$$

для горизонтального пружинного маятника только заменой переменной: роль координаты x играет теперь $x - x_0$.

Отсюда следует, что подвешенный на пружине груз будет совершать вертикальные колебания с теми же периодом и частотой, что и груз той же массы, укрепленный на горизонтальной пружине той же жёсткости. Отличие состоит только в том, что положению равновесия соответствует теперь *растянутая* пружина, удлинение которой x_0 выражается формулой (5).

9. Покоящийся подвешенный на пружине груз растягивает её своим весом на 5 см. При каких значениях амплитуды вертикальных колебаний груза пружина во время колебаний будет оставаться всё время растянутой?

10. Груз массой m подвешен к пружине жёсткостью k , которая висит на нити (рис. 13.2).

- а) Какова максимально возможная амплитуда гармонических колебаний груза?
б) В каких пределах изменяется при этом сила натяжения нити?

Подсказка. Сила натяжения нити максимальна в момент, когда груз находится в нижней точке траектории.

11. Подвешенный на пружине груз растягивает её своим весом на 3 см. Этот груз совершает



Рис. 13.2

вертикальные гармонические колебания с амплитудой 5 см. Чему равны по модулю скорость и ускорение груза, когда он:

- проходит положение равновесия?
- находится в состоянии невесомости?

Подсказка. Воспользуйтесь законом сохранения энергии и тем, что когда груз находится в состоянии невесомости, на него действует только сила тяжести.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Напомним, что математическим маятником называют подвешенный на нити груз, если его можно считать материальной точкой, а массой нити и её деформацией можно пренебречь.

При колебаниях груз движется *по дуге окружности*. Как мы уже знаем, скорость груза при этом в любой момент времени направлена *по касательной* к этой окружности. Поэтому согласно второму закону Ньютона изменение скорости по модулю обусловлено проекцией равнодействующей приложенных к грузу сил на направление касательной к окружности.

«Вклад» в эту проекцию даёт только *сила тяжести*, потому что сила натяжения нити направлена вдоль нити, то есть перпендикулярно скорости груза.

Обозначим F_{τ} проекцию силы тяжести на касательную к траектории груза в тот момент, когда нить составляет угол α с вертикалью.

? 12. Объясните, почему

$$F_{\tau} = -mg \sin \alpha, \quad (8)$$

где m — масса груза.

Подсказка. Воспользуйтесь рисунком 13.3.

При малых углах α можно считать, что

$$\sin \alpha \approx \frac{s}{l},$$

где s — длина дуги, соответствующая углу α .

? 13. Объясните, почему при малых углах отклонения нити проекция ускорения на касательную a_{τ} связана с длиной дуги s и длиной нити l соотношением

$$a_{\tau} = -\frac{g}{l}s. \quad (9)$$

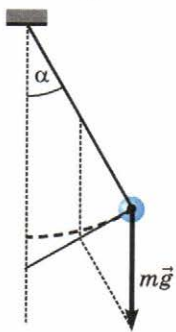


Рис. 13.3

Подсказка. Воспользуйтесь вторым законом Ньютона в проекции на упомянутую касательную.

Уравнение (9) означает, что при малых углах ускорение груза прямо пропорционально его смещению из положения равновесия и направлено противоположно смещению.

Как мы установили в предыдущем параграфе, в таком случае груз совершает гармонические колебания. Модуль коэффициента пропорциональности между ускорением и смещением равен при этом квадрату циклической частоты. Следовательно, для математического маятника

$$\omega^2 = \frac{g}{l} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

- ?** 14. Объясните, почему период и частота колебаний математического маятника выражаются формулами

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (10)$$

- ?** 15. Шарик, подвешенный на нити длиной 70 см, совершает гармонические колебания с амплитудой 4 см.

- а) Чему равна циклическая частота колебаний?
б) С какой скоростью шарик проходит положение равновесия?

- ?** 16. Чему будет равен период малых колебаний положительно заряженного шарика с зарядом q и массой m , подвешенного на нити длиной l , если поместить его в однородное электрическое поле, напряжённостью E ? Вектор напряжённости направлен вертикально вниз.

- ?** 17. Изменится ли период колебаний подвешенного на нити заряженного шарика, если поместить его в магнитное поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен плоскости колебаний шарика? Обоснуйте свой ответ.

- ?** 18. В покоящемся лифте подвешенный на нити груз совершает колебания с частотой 2 Гц. Чему будет равна частота колебаний груза, если лифт движется:

- а) вверх с ускорением 3 м/с^2 , направленным вниз?
б) вниз с ускорением 3 м/с^2 , направленным вверх?

Подсказка. Вес груза определяется только ускорением.



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

19. На горизонтальном столе покоится брусок массой $M = 500$ г. Он соединён с подвешенным на пружине грузом массой $m = 100$ г нитью, переброшенной через блок (рис. 13.4). Жёсткость пружины $k = 100$ Н/м, коэффициент трения между бруском и столом $\mu = 0,3$. Трением в блоке можно пренебречь. При какой наибольшей амплитуде A_{\max} колебаний груза они будут гармоническими?



Рис. 13.4

20. На столе находятся два одинаковых бруска массой t каждый, соединённые вертикальной пружиной жёсткостью k (рис. 13.5). На верхнем бруске лежит груз. В некоторый момент груз быстро поднимают. При каких значениях массы M груза:

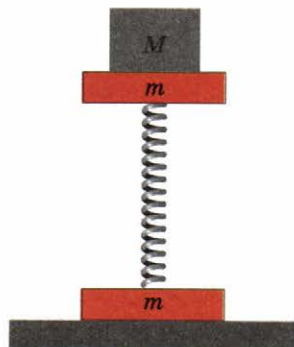


Рис. 13.5

- пружина во время возникших колебаний будет всё время сжата?
- при максимальном подъёме верхнего бруска пружина не будет деформирована?
- в момент максимального подъёма верхнего бруска нижний брусок отрывается от стола?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

Колебания

Соотношения между периодом, частотой и циклической частотой

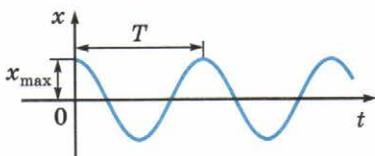
$$\nu = \frac{1}{T}$$

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

$$\omega = 2\pi\nu$$

Уравнение гармонических колебаний $x = x_{\max} \cos \omega t$

График гармонических колебаний



Период колебаний пружинного маятника

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

Период колебаний математического маятника

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

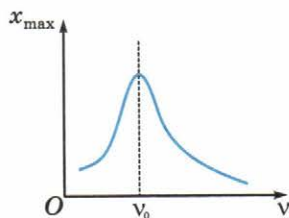
Формула Томсона

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

Затухающие колебания



Резонанс



Аналогия между механическими и электромагнитными величинами

$$x \leftrightarrow q$$

$$\frac{kx^2}{2} \leftrightarrow \frac{q^2}{2C}$$

$$v \leftrightarrow i$$

$$m \leftrightarrow L$$

$$k \leftrightarrow \frac{1}{C}$$

$$\frac{mv^2}{2} \leftrightarrow \frac{Li^2}{2}$$

Трансформатор



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

§ 14. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК**1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ**

Когда какое-либо тело движется в среде, оно «возмущает» её, то есть приводит частицы среды в движение.

Вследствие взаимодействия частиц среды между собой возмущения среды распространяются в пространстве.

Возмущения среды, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называют механическими волнами.

Тело, колебания которого порождают волны в среде, называют *источником волн*. Основное внимание мы уделим волнам, распространяющимся в среде, когда источник волн совершает *гармонические колебания*.

Поперечные и продольные волны

Волны, при распространении которых частицы среды смещаются перпендикулярно направлению распространения волны, называют *поперечными волнами*. Моделью поперечных волн служат волны, распространяющиеся вдоль шнура, если конец шнура перемещать перпендикулярно шнуру (рис. 14.1, а).

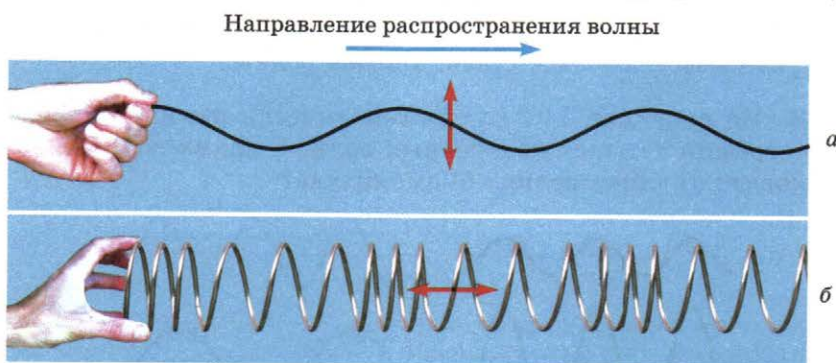


Рис. 14.1

Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют *продольными волнами*. Моделью продольных волн — волны растяжения и сжатия пружины, распространяющиеся вдоль неё, если конец пружины двигать вдоль оси пружины (рис. 14.1, б).

Поперечные волны распространяются только в *твёрдых* телах, так как для распространения поперечных волн необходимо, чтобы между частицами вещества существовали силы, препятствующие изменению *формы* тела¹.

Продольные волны могут распространяться в *любой* среде, так как для распространения продольных волн необходимо, чтобы между частицами вещества существовали силы, препятствующие изменению *объёма* тела. Это — силы давления, которые существуют во всех средах.

Основные характеристики волны

Частоту ν колебаний каждой точки среды называют *частотой волны*.

Период T колебаний точек среды называют *периодом волны*.

- ?** 1. Объясните, почему период волны T и её частота ν связаны соотношением

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

- ?** 2. Мимо стоящего на берегу реки человека прошло 8 гребней волны за 20 с. Каковы период и частота волны?

Расстояние λ между соседними максимумами (*гребнями*) волны называют *длиной волны*.

Модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия называют *амплитудой волны*.

- ?** 3. На рисунках 14.2, *a—г* схематически изображены фотографии четырёх поперечных волн. У каких волн одинаковые: а) длина волны; б) амплитуда?

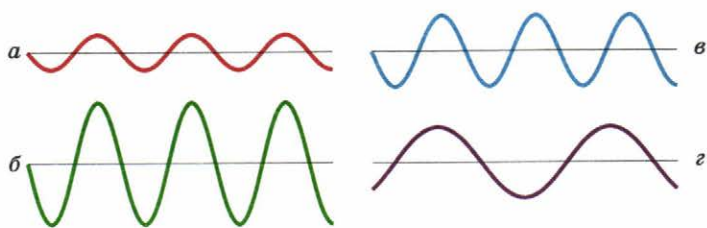


Рис. 14.2

¹ Иногда в качестве примера поперечных волн приводят волны на поверхности воды, однако это неверно. Рассмотрение волн на поверхности воды выходит за рамки нашего курса.

Скорость волны

Скорость движения волны равна скорости движения её гребней.

На рисунке 14.3 схематически изображены последовательные положения (с интервалом в $1/4$ периода) поперечной волны, распространяющейся в *горизонтальном* направлении.

Обратите внимание на точку А среды: она совершает гармонические *вертикальные* колебания.

Пунктиром выделен участок волны между соседними гребнями. Длина этого участка равна длине волны.

Мы видим, что через время, равное одному периоду T , каждая точка среды, в которой распространяется волна, вернулась в прежнее положение, совершив одно полное колебание, а волна сместилась в пространстве вдоль направления своего распространения на расстояние, равное длине волны λ .

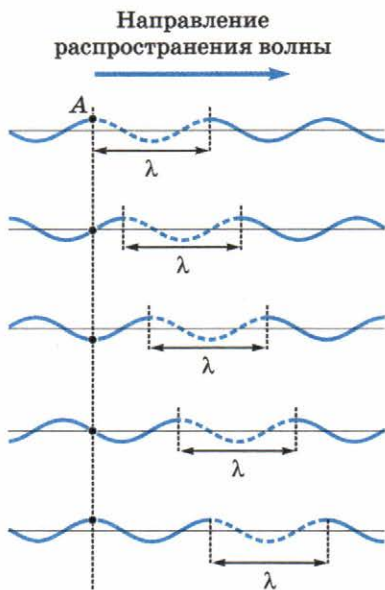


Рис. 14.3

? 4. Объясните, почему справедливы равенства

$$v = \frac{\lambda}{T}; \quad v = \lambda \nu.$$

? 5. Рыболов заметил, что его поплавок колеблется на волне, совершая 5 колебаний за 10 с. Расстояние между соседними гребнями волны равно 0,5 м.

- Чему равны период и частота волны?
- Чему равна скорость волны?

Переносят ли волны вещество и энергию?

Когда волна движется, частицы среды совершают колебания около положений равновесия. Следовательно, волны *не переносят вещества*.

Однако волны переносят энергию: ведь волны — это колебания, распространяющиеся в пространстве, а колеблющиеся частицы среды обладают энергией.

Интерференция волн. Волны от различных источников распространяются *независимо одна от другой*, благодаря чему они свободно «проходят» друг сквозь друга: мы слышим одновременно звуки различных инструментов оркестра или голоса нескольких людей.

При наложении волн с одинаковыми длинами волн в одних точках пространства волны будут усиливать друг друга, а в других точках — ослаблять (вплоть до полного гашения). Это явление называют *интерференцией*.

Дифракция волн. Опыт показывает, что волны могут огибать препятствия, размеры которых меньше или сравнимы с длиной волны. Поэтому, например, мы слышим через открытую дверь голос человека, разговаривающего в другой комнате, даже если мы не можем его увидеть. Огибание волнами препятствий называют *дифракцией*.

Явления интерференции и дифракции мы рассмотрим подробнее, когда будем изучать световые волны.

2. ЗВУК

Звуковые волны

Звуковые волны в воздухе — это продольные волны, то есть чередующиеся разрежения и сгущения воздуха. Они сопровождаются изменениями давления.

Порождаются звуковые волны каким-либо колеблющимся телом: голосовыми связками, мембраной динамика, музыкальными инструментами и т. п.

Распространяясь в воздухе, звуковая волна достигает уха и воздействует на барабанную перепонку. В звуковой волне, соответствующей обычной речи, изменение давления воздуха составляет всего лишь около одной миллионной доли атмосферного давления.

Если разорвать «воздушную связь» между источником звука и ухом, то мы звука не услышим. В этом можно убедиться с помощью следующего опыта.



Поставим опыт

Поместим электрический звонок под стеклянный колокол, соединенный с воздушным насосом (рис. 14.4, а).

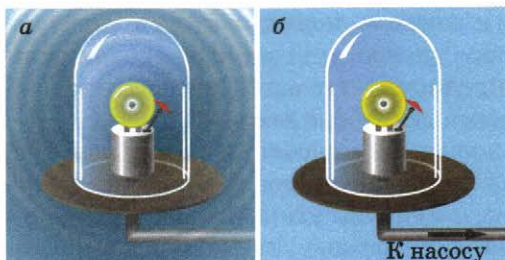


Рис. 14.4

Включим звонок и начнём откачивать воздух. По мере откачивания звук будет становиться всё тише и тише, хотя сквозь стекло видно, что молоточек «старается» по-прежнему, ударяя в чашку звонка (рис. 14.4, б).

Человеческое ухо воспринимает как звук колебания с частотой от 20 Гц до 20 кГц. Поэтому механические волны с частотой, лежащей в этом диапазоне, и называют *звуковыми*.

Скорость распространения звуковых волн в разных средах различна. Например, скорость звука в воздухе — около 330 м/с, в воде — около 1500 м/с, а в стали — более 5000 м/с.

? 6. Какова длина звуковой волны ноты «ля», если частота колебаний равна 440 Гц?

При переходе из одной среды в другую остаётся неизменной *частота* волны (она равна частоте колебаний источника волн). Длина же волны при переходе в другую среду изменяется.

? 7. Чему равна длина волны ноты «ля» в воде?

Ультразвук и инфразвук

Продольные механические волны с частотой выше звукового диапазона называют *ультразвуком*, а с частотой ниже звукового диапазона — *инфразвуком*.

Многие животные способны слышать ультразвук.

Например, собаки слышат ультразвук частотой до 60 кГц, летучие мыши — до 150 кГц, а дельфины — до 200 кГц.

Поэтому дельфины могут «беседовать» совершенно неслышно для человека, а летучие мыши охотятся на насекомых с помощью ультразвука (рис. 14.5).



Рис. 14.5

Ультразвук широко используется в технике и в медицине, — например, ультразвуковое исследование внутренних органов (УЗИ) предпочитают сегодня рентгеновскому, поскольку оно безопаснее для организма.

Инфразвуковые же колебания опасны для организма, так как они иногда вызывают резонанс внутренних органов. Человек не слышит этих колебаний ухом, но воспринимает их как неприятные ощущения. Инфразвуковые колебания вызываются, например, землетрясениями или вибрацией тяжёлых механизмов.

Высота, громкость и тембр звука

Звук характеризуется высотой: например, бас поёт низким голосом, а тенор — высоким. Опыты показывают, что *высота звука* определяется *частотой* звуковой волны: чем больше частота волны, тем звук выше.

Частота звуковых колебаний, соответствующих человеческому голосу, составляет от 80 Гц (низкий бас) до 1400 Гц (самый высокий женский голос — колоратурное сопрано). «Разговорный» частотный диапазон — от 85 до 340 Гц.

Громкость звука определяется в основном *амплитудой* звуковой волны. Воспринимаемая ухом громкость зависит также от высоты звука, потому что ухо более чувствительно к одним частотам и менее чувствительно — к другим.

? 8. Наибольшая чувствительность уха человека соответствует частотам от 3 кГц до 5 кГц. Каким значениям длины волны соответствуют эти звуковые волны?

Единицей измерения громкости является *децибел* (дБ). Увеличению громкости на 10 дБ соответствует увеличение интенсивности¹ звука в 10 раз, на 20 дБ — в 100 раз, а на 30 дБ — в 1000 раз и т. д.

Громкость тихого шёпота и шелеста листьев — 20 дБ, обычной речи — 60 дБ, а рок-концерта — 120 дБ.

? 9. Во сколько раз интенсивность звука на рок-концерте больше, чем обычной речи?

Громкость, равную 120 дБ, называют *болевым порогом*. При длительном воздействии такого звука происходит *необратимое* ухудшение слуха: человек, привыкший к рок-концертам, *никогда* не услышит тихого шёпота или шелеста листьев.

¹ Интенсивностью звука называется отношение мощности звуковой волны к площади, на которую падает эта волна.

«Окраска» звука определяется его *тембром*.

Например, только тембром отличаются голоса людей, говорящих и поющих в одном и том же диапазоне частот. Тембром отличаются и звуки различных музыкальных инструментов (скажем, скрипки и трубы), соответствующие одной и той же ноте.

Тембр звука зависит от набора *обертонов* — частот, кратных основной частоте звука. Чем больше обертонов, тем «насыщеннее», красивее звук.

Акустический резонанс

Звук скрипичной струны слишком слаб, чтобы его можно было услышать на большом расстоянии, однако звук одной единственной скрипки может наполнить театральный зал.

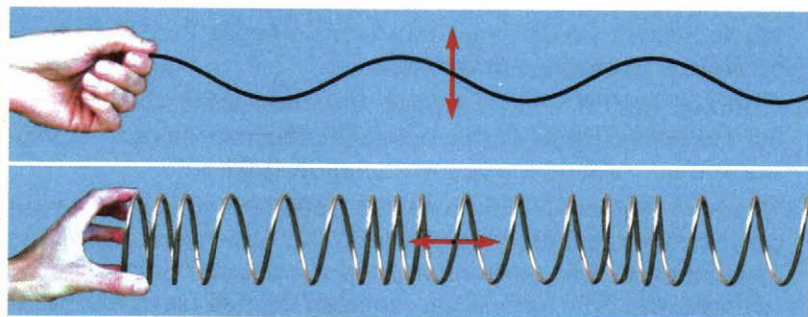
Это происходит потому, что звук скрипичных струн многократно усиливается корпусом скрипки вследствие *резонанса*.

Благодаря резонансу усиливаются звуки и других музыкальных инструментов.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Поперечные и продольные волны



Соотношения между периодом, частотой и длиной волны

$$T = \frac{1}{\nu}$$

$$v = \lambda \nu$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Высота звука определяется *частотой* звуковой волны

Громкость звука определяется *амплитудой* звуковой волны



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

10. Какова глубина моря в месте нахождения корабля, если промежуток времени между отправлением звукового сигнала эхолота и приёмом сигнала равен 4 с?
11. Чему равно расстояние между ближайшими сгущением и разрежением в звуковой волне, если частота волны 250 Гц?
12. Звуковая волна с частотой колебаний 1 кГц распространяется в стальном стержне со скоростью 5 км/с. Каково расстояние между ближайшими точками волны, разность фаз между которыми равна $1,5\pi$?
13. Звук выстрела и пуля одновременно достигли высоты 660 м. Какова начальная скорость пули? Выстрел произведён вертикально вверх. Примите, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.
14. При переходе из воздуха в воду длина звуковой волны увеличилась на 1,17 м. Какова частота волны?
15. Волна от теплохода, проходящего по озеру вдоль берега, дошла до берега через 3 мин. Расстояние между соседними гребнями в волне 1,2 м, промежуток времени между последовательными ударами волн о берег 2 с. Как далеко от берега проходил пароход?
16. С какой силой надо ударить по мячу массой 400 г, чтобы скорость мяча стала равной скорости звука? Продолжительность удара примите равной 0,04 с.
17. Человек издали наблюдает за рабочим, который ударяет по доске молотком с частотой 2 Гц. При этом наблюдателю кажется, что он *видит* удар и *слышит* звук удара *одновременно*. На каком расстоянии от наблюдателя может находиться рабочий?

§ 15. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

1. ПРЕДСКАЗАНИЕ И ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Теория Максвелла

Исследования М. Фарадея продолжил его соотечественник английский физик Дж. Максвелл.

Как мы уже рассказывали, Максвелл объяснил явление электромагнитной индукции тем, что *переменное магнитное поле порождает в пространстве вихревое электрическое поле.*

Чтобы построить теорию единого *электромагнитного поля*, Максвелл предположил, что *магнитное поле создаётся не только движущимися электрическими зарядами, но и переменным электрическим полем.*

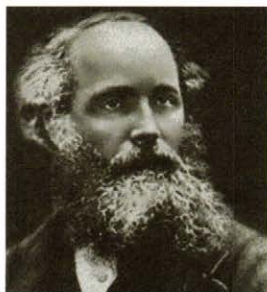
Отсюда следовало, что *переменные электрическое и магнитное поля взаимно порождают друг друга.* Благодаря этому они могут отделиться от породивших их электрических зарядов и распространяться в пространстве в виде *электромагнитных волн.*

Электромагнитная волна представляет собой распространяющиеся в пространстве взаимосвязанные друг с другом переменные электрическое и магнитное поля.

Существование электромагнитных волн было главным предсказанием теории Максвелла. Он теоретически вычислил скорость их распространения, используя экспериментальные данные о взаимодействии электрических зарядов и электрических токов. Полученный «на кончике пера» результат поразил учёного: *оказалось, что скорость электромагнитных волн равна скорости света!*

Удивление учёного и его волнение объяснялись тем, что до той поры световые явления не связывали с электрическими и магнитными.

Однако даже самая красивая научная теория требует подтверждения на опыте. А подтвердить существование электромагнитных волн на опыте долгое время не удавалось.



Джеймс Максвелл
1831–1879

Опыт Герца

Электромагнитные волны первым обнаружил немецкий физик Г. Герц. В своём опыте он использовал два незамкнутых проводящих контура.

В узком промежутке первого контура с помощью высокого напряжения возбуждалась искра (рис. 15.1).

Если бы электромагнитные волны существовали, они должны были бы, распространившись в пространстве, «зажечь» искру во втором контуре, не соединённом с первым.

Герц предполагал, что искры во втором контуре не будет. Но опыт показывал, что искра во втором контуре неизменно следует за искрой в первом!

А это означало, что электромагнитные волны действительно *существуют*.

Когда Герц измерил скорость этих волн, она *совпала со скоростью света* — как и предсказывал Максвелл! Увы, самому Максвеллу не довелось дожить до экспериментального подтверждения его великой теории.



Генрих Герц
1857–1894

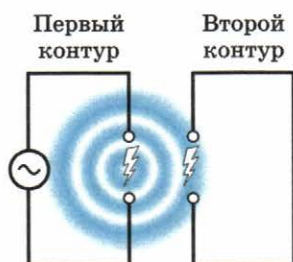


Рис. 15.1

2. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Опыты показали, что электромагнитные волны обладают всеми свойствами световых волн: например, они испытывают отражение и преломление на границе двух сред. Это подтвердило предсказание Максвелла, что световые волны являются частным случаем электромагнитных волн.

Чем излучаются электромагнитные волны?

Как следует из теории Максвелла и подтверждается опытом,

электромагнитные волны излучаются ускоренно движущимися заряженными частицами.

Например, колебания электронов в Солнце и звёздах рождают электромагнитные волны, которые, пройдя огромные расстояния, достигают наших глаз.

Когда заряженная частица совершает колебания, то излучаемые этой частицей электромагнитные волны имеют частоту, равную частоте колебаний частицы. Далее мы рассмотрим, как излучаются радиоволны.

Электрическое и магнитное поля электромагнитной волны

Расчёты и опыты показывают, что если заряженная частица, являющаяся источником электромагнитных волн, совершает гармонические колебания, то на большом расстоянии от неё¹ электрическое и магнитное поля представляют собой гармонические² волны.

На рисунке 15.2 схематически изображена электромагнитная волна: показана зависимость от координат напряжённости электрического поля \vec{E} и индукции магнитного поля \vec{B} в некоторый момент времени и указана длина электромагнитной волны λ .

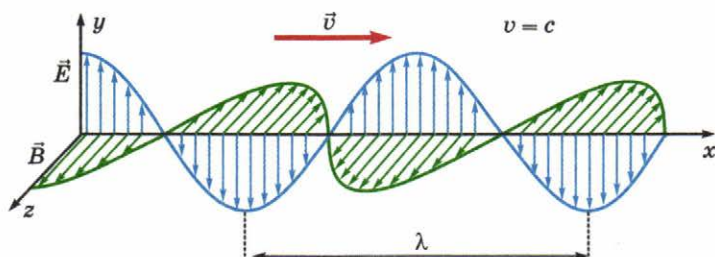


Рис. 15.2

Обратите внимание:

- в каждой точке пространства, в котором движется электромагнитная волна, модуль напряжённости электрического поля прямо пропорционален модулю индукции магнитного поля;
- вектор напряжённости \vec{E} электрического поля и вектор магнитной индукции \vec{B} направлены под прямым углом друг к другу;
- вектор напряжённости \vec{E} электрического поля и вектор магнитной индукции \vec{B} направлены *перпендикулярно* направлению распространения волны.

¹ Большом по сравнению с длиной волны.

² Гармоническими называют волны, имеющие синусоидальную форму.

Таким образом, *электромагнитная волна является поперечной волной*.

Как уже говорилось, скорость электромагнитной волны равна скорости света, которую обозначают обычно c .

- ?** 1. Объясните, почему скорость света c , длина электромагнитной волны λ и её частота ν связаны соотношением

$$c = \lambda\nu. \quad (1)$$

- ?** 2. Длины волн видимого света — от $3,8 \cdot 10^{-7}$ м (фиолетовый цвет) до $7,6 \cdot 10^{-7}$ м (красный цвет). В каких пределах заключена частота видимого света?

Где могут распространяться электромагнитные волны?

Сам Максвелл полагал, что электромагнитные волны, подобно звуковым, распространяются в некоторой среде. Существование такой «светоносной» среды, которую называли эфиром, предполагали и многие последователи Максвелла.

В конце 19-го века были поставлены исключительно точные эксперименты для обнаружения так называемого *эфирного ветра*, обусловленного движением Земли относительно предполагаемого эфира. Однако «эфирный ветер» обнаружить не удалось.

В начале 20-го века выдающийся физик А. Эйнштейн¹ создал *специальную теорию относительности*, которая объяснила электромагнитные явления, в том числе и распространение электромагнитных волн, без предположения об эфире. Далее мы рассмотрим элементы теории относительности Эйнштейна.

В отличие от звуковых волн электромагнитные волны могут распространяться *в вакууме*, где их скорость — около² 300 000 км/с. Это — *наибольшая возможная скорость*.

Электромагнитные волны распространяются также во многих средах, где их скорость *меньше*, чем в вакууме.

Свет может идти через пустоту миллиарды лет, принося нам всё новые интригующие сведения о звёздах и галактиках (мы расскажем об этом далее). Вот почему мы видим огромное множество звёзд, но «слышим» только великое молчание космоса: в межзвёздном пространстве нет среды, в которой может распространяться звук.

¹ А. Эйнштейн жил и работал в Швейцарии, Германии и США.

² Точное значение скорости света 299 792 458 м/с.

Эйнштейн предположил (и это предсказание было подтверждено на опыте), что световые волны можно рассматривать как *поток частиц* — фотонов. А возможность движения *частиц* в вакууме представляется вполне естественной.

Давление света

Согласно теории Максвелла электромагнитные волны обладают не только энергией, но и *импульсом*, то есть оказывают *давление*. Расчёты показывают, что давление солнечного света на отражающую поверхность вблизи Земли составляет примерно одну десятиллиардную часть атмосферного давления.

Столь малое давление света смог измерить российский физик П. Н. Лебедев. Он воспользовался тем, что на отражающую поверхность свет оказывает вдвое большее давление, чем на поглощающую.

? 3. Объясните это, используя механическую аналогию.

В сосуде, из которого был откачан воздух, на тонкой стеклянной нити учёный подвесил стержень с крылышками (рис. 15.3). Одна их сторона была зачернена и поэтому поглощала свет, а другая сторона была зеркальной — она отражала свет. Из-за разности давлений света на крылышки стержень поворачивался, и по углу закручивания нити можно было измерить различие в силе давления света на разные стороны крылышек. Результаты опыта Лебедева также подтвердили предсказания теории Максвелла.



Пётр Лебедев
1866–1912



Рис. 15.3

3. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В настоящее время изучены электромагнитные волны в очень широком диапазоне частот. Ниже в таблице представлена *шкала электромагнитных волн*, в которой указаны свойства электромагнитных волн разных диапазонов частот, способы их получения и применение.

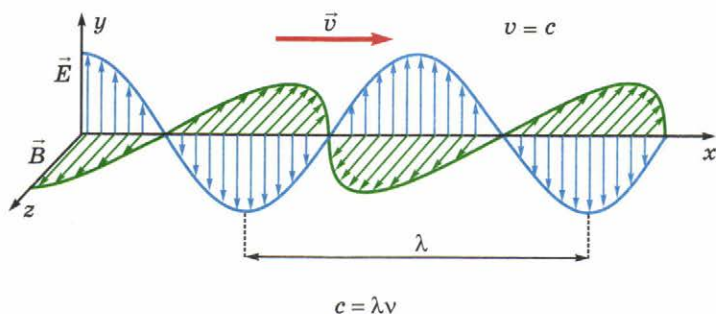
ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Длина волны в вакууме (м)	Название волн	Способ образования в природе или получения в технике	Основные применения
Более 10^4	Волны от низкочастотных колебаний	Генераторы переменного тока различной частоты	Электротехника
$10^{-1} \div 10^4$	Радиоволны	Генераторы электромагнитных колебаний	Радиотехника
$10^{-3} \div 10^{-1}$	Сверхвысокочастотные волны (СВЧ-волны)	Генераторы СВЧ-колебаний	Радиолокация, телевидение, микроволновые печи
$10^{-6} \div 10^{-3}$	Инфракрасное излучение	Излучение молекул и атомов	Инфракрасная фотосъёмка, дистанционные пульты управления
$4 \cdot 10^{-7} \div 8 \cdot 10^{-7}$	Видимый свет	Излучение атомов	Зрение
$10^{-9} \div 10^{-7}$	Ультрафиолетовое излучение	Излучение атомов при столкновениях с быстрыми электронами	Специальная фотография, медицина (загар)
$10^{-12} \div 10^{-9}$	Рентгеновское излучение	То же	Медицина (рентгеновские снимки), металлургия
Менее 10^{-12}	Гамма-излучение	Излучение ядер атомов	Метод меченых атомов

- ?** 4. Используя приведённую таблицу, вычислите и запишите в тетрадь интервалы, в которых изменяется частота:
- а) радиоволн;
 - б) ультрафиолетового излучения;
 - в) рентгеновского излучения.
- ?** 5. Во сколько раз наименьшая частота гамма-излучения больше наибольшей частоты радиоволн?



Электромагнитные волны



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

6. Электромагнитная волна длиной 4 м распространяется в положительном направлении оси x .
 - а) Чему равна разность фаз колебаний магнитной индукции в начале координат и в точке с координатой $x = 3$ м?
 - б) К какому диапазону волн относится эта волна?
7. Какие из следующих объектов являются источниками электромагнитных волн:
 - а) линия электропередачи переменного тока;
 - б) линия электропередачи постоянного тока;
 - в) электромагнит, подключённый к генератору переменного тока;
 - г) электрон, движущийся в электрическом поле;
 - д) протон, движущийся в магнитном поле;
 - е) равномерно движущийся ион?
8. К какому диапазону относятся электромагнитные волны с частотой $5 \cdot 10^{12}$ Гц?
9. Когда частоту световой волны увеличили в 3 раза, длина волны уменьшилась на 2 см.
 - а) Какова была первоначальная частота волны?
 - б) К каким диапазонам относятся начальная и конечная волны?

§ 16. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

1. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО

Передачу информации с помощью электромагнитных волн впервые осуществил российский инженер А. С. Попов.

7 мая 1895 года он продемонстрировал прибор, регистрирующий электромагнитные волны, порождённые удалённой грозой («грозоотметчик»). А 24 марта 1896 года на заседании физического отделения Российского физико-химического общества в Санкт-Петербурге А. С. Попов передал первую в мире радиограмму. Она состояла из двух слов — «Генрих Герц».

В следующем году благодаря радиограмме, посланной Поповым, удалось спасти жизнь 27 рыбакам, унесённым в море на оторвавшейся льдине.

В Западной Европе (Италии и Англии) передачей информации с помощью радиоволн первым занялся итальянский инженер Г. Маркони.

2. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Звуковые волны (с частотой от 20 Гц до 20 кГц) преобразуют в переменный электрический ток с помощью микрофона (рис. 16.1).

Однако преобразовывать их непосредственно в радиоволны такой же частоты для передачи на большие расстояния нет смысла, потому что электромагнитные волны столь низкой частоты быстро затухают.

На большие расстояния можно передавать только электромагнитные волны намного большей частоты — от 1 МГц до 30 000 МГц. Такие волны схематически изображены на рисунке 16.2. Вот почему для передачи по радио колебаний звуковой (низкой) частоты приходится использовать в качестве «почто-



Александр Попов
1859–1906



Рис. 16.1



Рис. 16.2

вого голубя» электромагнитные волны высокой частоты (её называют *несущей частотой*).

В радиопередатчике с помощью специальных приборов к высокочастотным электрическим колебаниям «присоединяют» колебания звуковой частоты (рис. 16.3). Этот процесс называют *модуляцией*, а образовавшуюся волну называют *модулированной*.



Рис. 16.3

В результате с помощью передающей антенны в пространство излучается модулированная волна, которая достигает антенн радиоприёмников и телевизоров (рис. 16.4).

Достигнув приёмной антенны, модулированная волна «раскачивает» в ней свободные электроны, вследствие чего в антенне возникают такие же по форме модулированные высокочастотные электрические колебания.

В радиоприёмнике из принятой модулированной волны «извлекают» переданную информацию, то есть получают колебания той же частоты, которые были созданы микрофоном. Этот процесс называют *детектированием*. Схематически он изображен на рисунке 16.5.



Рис. 16.4



Рис. 16.5

Наконец, электрические колебания звуковой частоты преобразуют в звуковые волны с помощью динамика (рис. 16.6). И мы слушаем по радио музыку, смотрим телепередачу или слышим по мобильному телефону голос другого человека.

Использование волн высокой частоты позволяет решить ещё одну принципиально важную для радиосвязи задачу.



Рис. 16.6

Благодаря тому, что каждая радиостанция использует свою несущую частоту, тысячи радиостанций могут работать одновременно, не мешая друг другу.

3. ПЕРЕДАЧА РАДИОВОЛН

Устройство, в котором создаются и поддерживаются электромагнитные колебания заданной частоты, называют *генератором электромагнитных колебаний*. Основной его элемент — уже знакомый вам *колебательный контур*, состоящий из катушки и конденсатора.

Конденсатор контура соединяют с передающей антенной, в которой возникает переменный ток с частотой, *равной собственной частоте колебательного контура*: свободные электроны в антенне совершают вынужденные колебания с этой частотой. Поскольку при этом заряженные частицы (электроны) движутся *с ускорением*, они излучают в пространство электромагнитные волны той же частоты.

При излучении электромагнитных волн расходуется энергия, поэтому колебательный контур необходимо постоянно «подпитывать» энергией. С этой целью колебательный контур периодически (с частотой, равной частоте колебаний в контуре) подключается к источнику тока. Этими подключениями «управляет» сам колебательный контур с помощью *транзистора*.

Почему радиоволны могут огибать Землю?

Это объясняется тем, что радиоволны отражаются ионосферой — слоем земной атмосферы, расположенным на высоте 50—100 км и содержащим большое количество ионов и свободных электронов (рис. 16.7).



Рис. 16.7

Особенно хорошо от ионосферы отражаются радиоволны с длиной волны в несколько десятков метров (так называемые *короткие волны*), поэтому радиостанции, вещающие на большие расстояния, работают обычно на таких волнах.

4. ПРИЁМ РАДИОВОЛН

Для настройки на волну определённой радиостанции в радиоприёмнике тоже используется *колебательный контур*.

Вследствие явления *резонанса* в колебательном контуре «раскачиваются» только колебания с частотой, близкой частоте его собственных колебаний — а она, как вы уже знаете, определяется индуктивностью катушки и электроёмкостью конденсатора в данном контуре.

Переключая диапазоны и поворачивая ручку настройки приёмника, вы изменяете индуктивность катушки и электроёмкость конденсатора в колебательном контуре, а следовательно, и частоту его собственных колебаний. Так и происходит «настройка» на нужную станцию.

После выбора нужной «несущей» частоты принятый модулированный сигнал сначала усиливают с помощью специальных приборов. Затем его преобразуют в низкочастотные колебания звуковой частоты, повторяющие колебания исходного звукового сигнала на передающей радиостанции. Как мы уже говорили, этот процесс называют *детектированием*.

Более подробно передачу и приём радиоволн мы рассмотрим в следующем параграфе.

Как работает мобильный телефон?

Мобильный, или сотовый, телефон — это миниатюрная комбинация телефона, радиоприёмника и радиопередатчика, ставшая возможной только благодаря достижениям современной физики.

Главное преимущество такого телефона состоит в том, что он поддерживает постоянную радиотелефонную связь при перемещении абонента в пределах так называемой *зоны покрытия*.

Вся зона покрытия разделена на ячейки, называемые также «сотами» (отсюда и название телефона). В каждой ячейке имеется свой приёмник-передатчик (их антенны устанавливаются на телебашнях, высоких зданиях и на специально построенных вышках).

Включённый сотовый телефон автоматически через определённый промежуток времени посылает сигналы, поддерживая радиосвязь с ближайшим приёмником-передатчиком.

При перемещении мобильного телефона из одной ячейки в другую он автоматически переключается на свободный канал ближайшего приёмника-передатчика.

Благодаря успехам современной физики и техники мобильные телефоны удалось сделать миниатюрными и в то же время доступными.

5. СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ

Современный мир немислим без Интернета. Он тоже стал возможным благодаря достижениям современной физики.

Всё большее число людей пользуются услугами Интернета, и в ближайшем будущем Интернет станет, видимо, основным способом получения и передачи информации. Для передачи информации в Интернете используются телефонные линии связи, оптоволоконные линии и радиоволны (в том числе ретранслируемые спутниками связи).

Большую помощь в поиске нужной информации в Интернете оказывают компьютеры. Во-первых, с помощью компьютеров огромные объёмы информации обрабатываются и структурируются. Во-вторых, благодаря компьютеру информация может быть представлена в наиболее удобной и наглядной мультимедийной форме — с широким использованием графики, звука, видеоизображения.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Передача и приём радиоволн





§ 17. ПЕРЕДАЧА И ПРИЁМ РАДИОВОЛН

1. ГЕНЕРАТОР НА ТРАНЗИСТОРЕ

Электромагнитные колебания возникают в колебательном контуре. Однако для того, чтобы они не затухали, контур надо периодически подпитывать энергией с частотой, равной собственной частоте колебаний контура.

Например, можно было бы воспользоваться схемой на рисунке 17.1.

- ?** 1. В какие промежутки времени ключ на схеме (рис. 17.1) должен быть замкнут, чтобы источник тока периодически подпитывал энергией колебательный контур?

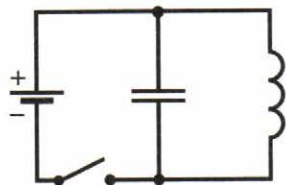


Рис. 17.1

Подсказка. Подзарядка конденсатора происходит, когда знак зарядов пластин совпадает со знаком зарядов соединённых с ними полюсов источника тока.

Описанное «ручное» управление поступлением энергии в колебательный контур можно было бы использовать для демонстрации незатухающих колебаний при малой собственной частоте колебаний контура (не больше нескольких герц).

Однако при частоте колебаний в *тысячи* и даже *миллионы* герц (а именно такова частота радиоволн) о «ручном» управлении периодическим поступлением энергии в колебательный контур не может быть и речи.

Незатухающие колебания в контуре могут происходить только при условии, что подпиткой контура энергией с нужной частотой будет управлять *сам контур!*

Незатухающие колебания, при которых колебательная система сама управляет поступлением энергии в систему, называют автоколебаниями.

Ключом, который сможет подключать источник тока к колебательному контуру с частотой собственных колебаний контура, может служить *транзистор*.

Напомним, что транзистор состоит из трёх полупроводников — *эмиттера, базы и коллектора*.

На рисунке 17.2 схематически изображён транзистор, в котором эмиттер и коллектор — полупроводники p -типа (с дырочной проводимостью), а база — полупроводник n -типа (с электронной проводимостью).

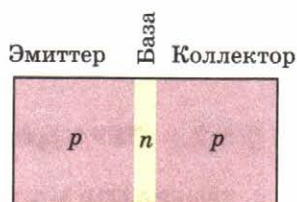


Рис. 17.2

Изображение транзистора на электрических схемах приведено на рисунке 17.3.

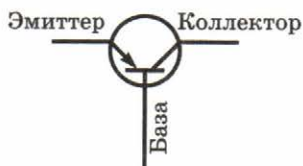


Рис. 17.3

Из курса физики 10-го класса вам известно: *изменяя разность потенциалов между эмиттером и базой, можно увеличивать или уменьшать силу тока, текущего от эмиттера к коллектору.*

Можно, в частности, сделать так, что при положительном знаке разности потенциалов между эмиттером и базой ток от эмиттера к коллектору будет идти, а при отрицательном — не будет. Тогда, если разность потенциалов между эмиттером и базой изменять с частотой собственных колебаний контура, *транзистор будет «пропускать» ток для подпитки контура с частотой собственных колебаний контура.*

Эта идея реализована в схеме на рисунке 17.4. Катушка L_{cb} , соединённая с эмиттером и базой транзистора, находится на одном сердечнике с катушкой колебательного контура L . В таком случае говорят, что катушки *индуктивно связаны*.

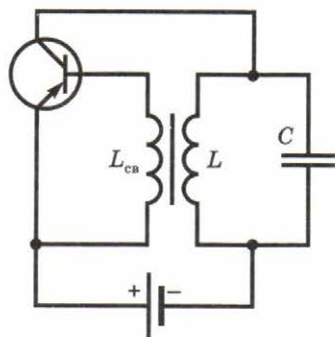


Рис. 17.4

? 2. Объясните, почему периодическое изменение силы тока в катушке L будет индуцировать ЭДС индукции в катушке L_{cb} с той же частотой.

? 3. Объясните, почему транзистор будет пропускать импульсы тока для подпитки контура с частотой собственных колебаний контура.

2. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

При *амплитудной* модуляции¹ амплитуда колебаний в контуре изменяется со звуковой частотой.

Если бы эта частота составляла не более нескольких герц, то изменять амплитуду колебаний в контуре можно было бы «в ручном режиме»: реостатом, соединённым последовательно с источником постоянного тока (рис. 17.5).

- ?** 4. В какую сторону на схеме (см. рис. 17.5) надо сдвинуть ползунок реостата, чтобы увеличить амплитуду колебаний в контуре? уменьшить?

Чтобы изменение амплитуды колебаний в контуре происходило автоматически с частотой звуковых колебаний, воспользуемся снова *индуктивно связанными катушками*.

Эта идея реализована в схеме, изображённой на рисунке 17.6.

- ?** 5. Объясните, используя этот рисунок, почему зависимость силы тока от времени в колебательном контуре имеет вид, схематически изображённый на рисунке 17.7.

Итак, мы сконструировали простейшее устройство, с помощью которого можно получать модулированные электромагнитные колебания. Они порождают модулированные электромагнитные волны, которые излучаются с помощью передающей антенны.

¹ Кроме амплитудной модуляции, используют также частотную, при которой со звуковой частотой изменяется частота несущей волны.

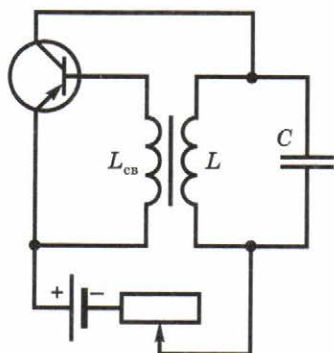


Рис. 17.5

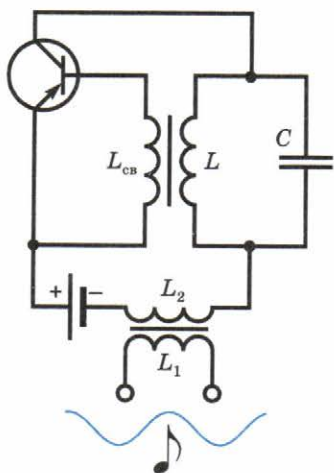


Рис. 17.6



Рис. 17.7

3. НАСТРОЙКА НА НУЖНУЮ ЧАСТОТУ

На антенну радиоприёмника попадает огромное множество электромагнитных волн, излучаемых всеми радиостанциями и мобильными телефонами. Все эти волны вызывают вынужденные электромагнитные колебания в антенне.

Если в цепь антенны включить колебательный контур (рис. 17.8), в нём также возникнут вынужденные колебания со всеми упомянутыми частотами. Но тут «вступает в игру» явление резонанса. Как вы уже знаете, оно состоит в том, что *амплитуда вынужденных колебаний имеет резкий максимум при частоте, равной собственной частоте колебательной системы.*

Это позволяет из огромного множества колебаний выбрать колебания *определённой частоты, равной частоте собственных колебаний контура.*

Частоту выбираемых контуром колебаний при настройке на заданную частоту волны изменяют двумя способами:

- *скачком*: заменяя одну катушку индуктивности контура на другую;
- *плавно*: изменяя электроёмкость конденсатора (обычно изменяя площадь пластин)¹.

В первом случае происходит переход с одного диапазона волн на другой. А во втором случае — плавная настройка на определённую частоту волны в пределах одного диапазона.

? 6. Индуктивность катушки колебательного контура равна 3 мкГн, а электроёмкость конденсатора можно изменять от 50 до 500 пФ.

- В каких пределах может изменяться собственная частота колебаний контура?
- Какие длины волн может принимать приёмник с таким контуром в цепи антенны?

На следующем этапе колебания выбранной частоты многократно *усиливают*. Для этого снова используют транзистор. Мы не будем останавливаться на этапе усиления.

¹ На рисунке 17.8 изображён конденсатор переменной ёмкости.

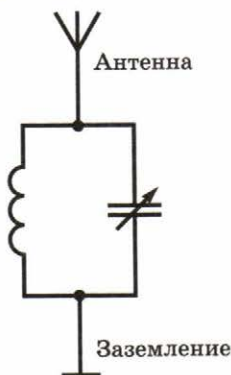


Рис. 17.8

4. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Усиленный высокочастотный модулированный сигнал надо теперь *демодулировать*, то есть выделить из него колебания звуковой частоты. Этот процесс называют *детектированием*. Осуществляют его в три этапа.

1. Сначала высокочастотный переменный ток превращают в *пульсирующий* (рис. 17.9).

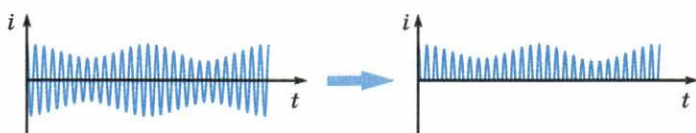


Рис. 17.9

2. Затем пульсирующий ток сглаживают (рис. 17.10).

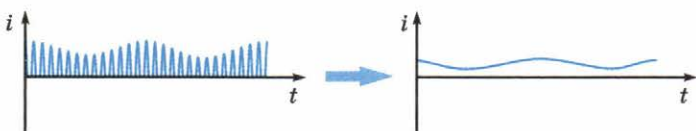


Рис. 17.10

3. На третьем этапе убирают постоянную составляющую тока (рис. 17.11).

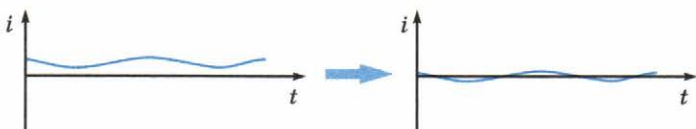


Рис. 17.11

На первом этапе используют детектор — прибор, обладающий *односторонней проводимостью*. Возьмём в качестве детектора полупроводниковый *диод*.

? 7. На вход электрической цепи (рис. 17.12) подаётся высокочастотное модулированное переменное напряжение.

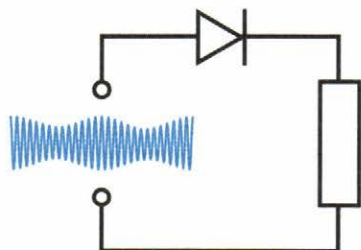


Рис. 17.12

Объясните, почему ток в цепи будет *пульсирующим*.

Подсказка. Диод обладает *односторонней проводимостью*.

На втором этапе для сглаживания пульсирующего тока используют так называемый *фильтр*, содержащий конденсатор (рис. 17.13).

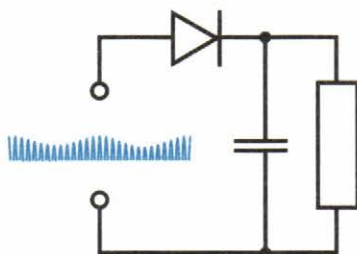


Рис. 17.13

- ?** 8. Объясните, почему во время импульса напряжения u и сила тока i в резисторе *меньше*, чем $\frac{u}{R}$, где R — сопротивление резистора.

Подсказка. Во время импульса напряжения ток в цепи будет *разветвляться*: одна часть тока будет идти через резистор, а другая часть тока будет заряжать конденсатор.

- ?** 9. Объясните, почему в промежутке между импульсами напряжения в резисторе продолжает течь ток *того же* направления.

Подсказка. Конденсатор разряжается через резистор.

Итак, благодаря фильтру пульсирующий ток сглаживается.

На третьем этапе остаётся убрать постоянную составляющую сглаженного тока, и мы сможем воспроизвести низкочастотные колебания звуковой частоты, которые были записаны на радиостанции с помощью микрофона и принесены к нам модулированной электромагнитной волной.

Постоянную составляющую можно убрать, например, с помощью ещё одного конденсатора (напомним, что через конденсатор постоянный ток не идёт). Мы не приводим его на следующей схеме, чтобы не загромождать её.

- ?** 10. На рисунке 17.14 изображена схема простейшего детекторного радиоприёмника. Справа на схеме — условное изображение динамика.

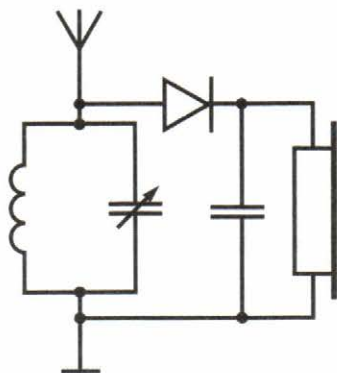


Рис. 17.14

- а) Объясните назначение каждого элемента схемы.
б) Объясните, как происходит настройка на нужную частоту (длину волны).
в) Объясните, как происходит детектирование модулированного высокочастотного сигнала.



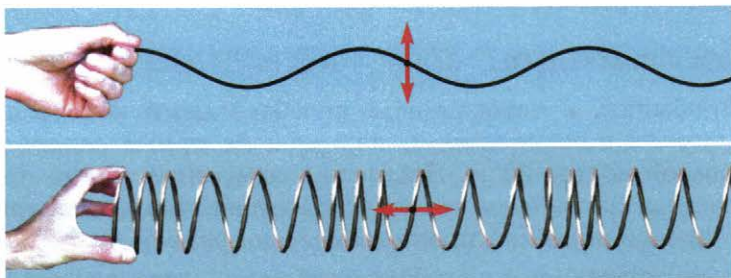
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

11. Приёмник, в котором есть колебательный контур с воздушным конденсатором, настроен на приём радиоволн с длиной волны 25 м. Насколько изменится длина принимаемых волн, если заполнить конденсатор диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной 6?
12. В колебательном контуре приёмника есть две сменные катушки индуктивностью L_1 и L_2 для приёма радиоволн разного диапазона ($L_2 > L_1$). Электроёмкость колебательного контура радиоприёмника можно изменять от C_1 до C_2 ($C_2 > C_1$).
- а) Радиоволны какой наименьшей частоты может принимать приёмник? А наибольшей?
б) При каком соотношении между L_1, L_2, C_1, C_2 диапазоны принимаемых волн не перекрываются?
13. Электроёмкость колебательного контура радиоприёмника можно изменять от 56 пФ до 670 пФ.
- а) Катушку какой индуктивности надо взять, чтобы наименьшая длина волны, на которую можно настроить приёмник, была равна 40 м?
б) Какая при этом будет максимальная длина волны, на которую можно настроить приёмник?
в) В каком диапазоне частот будут находиться принимаемые волны?



Волны

Поперечные и продольные волны



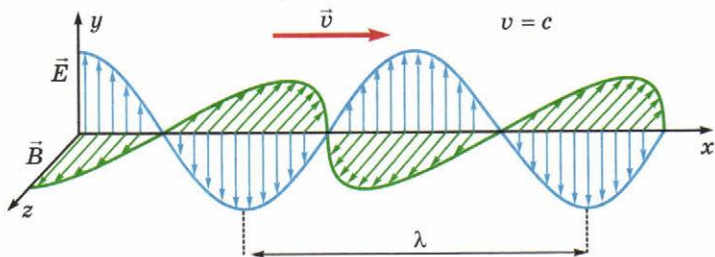
$$T = \frac{1}{\nu}$$

$$v = \lambda \nu$$

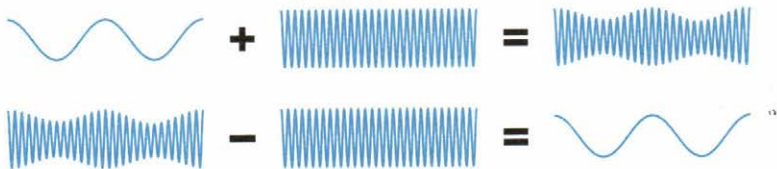
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$c = \lambda \nu$$

Электромагнитная волна



Передача и приём радиоволн



§ 18. ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**1. ЧТО ИЗУЧАЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА**

Как вы уже знаете, свет представляет собой *электромагнитные волны*. Например, длина волны света, соответствующего зелёному цвету, равна 0,55 мкм, то есть меньше *одной тысячной доли миллиметра*. Далее мы расскажем, как были измерены столь малые длины световых волн.

Вследствие того, что длины волн видимого света очень малы по сравнению с размерами предметов, видимых невооружённым глазом, долгое время световые явления изучали, не подозревая о волновой природе света. При этом очень полезным оказалось представление о *лучах света*.

Световой луч — это модель тонкого светового пучка.

Пучки света нельзя увидеть «со стороны», если они распространяются в вакууме или в чистом воздухе.

? 1. Почему в воздухе, содержащем пылинки или частички дыма, можно наблюдать ход световых лучей?

? **Поставим опыт**

Если задымить воздух, то можно наблюдать ход узкого пучка света лазерного фонарика при отражении его от зеркала (рис. 18.1).

Для определения хода лучей обычно используют геометрические построения, поэтому

часть оптики, которая изучает ход световых лучей, называют геометрической оптикой.

В 19-м веке было установлено

условие применимости геометрической оптики: размеры препятствий для света должны быть во много раз больше длин световых волн.

Наряду со световыми лучами в геометрической оптике используют также представление о *точечном источнике света*.

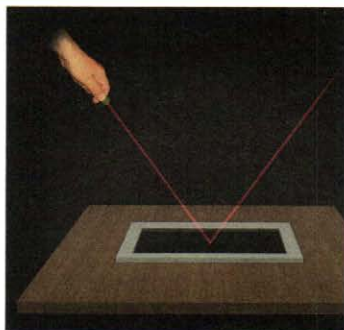


Рис. 18.1

Точечный источник света — модель источника света, размеры которого во много раз меньше расстояния до источника.

Например, точечными источниками света можно считать огромные звёзды, расстояние до которых исчисляется световыми годами, а также маленькую лампочку, если расстояние до неё равно нескольким метрам.

Если размерами источника света нельзя пренебречь по сравнению с расстоянием до него, источник называют *протяжённым*.

Протяжёнными источниками света надо считать, например, светящиеся трубки и лампы дневного света, если расстояние до них сравнимо с их размерами. Есть даже одна звезда, которую не всегда можно считать точечным источником света, хотя расстояние до неё примерно в сто раз больше её диаметра. Вы, конечно, догадались, что речь идёт о Солнце. Для объяснения солнечных затмений Солнце нужно рассматривать как протяжённый источник света.

С законами геометрической оптики вы уже знакомы из курса физики основной школы. Напомним их.

2. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА. ТЕНЬ И ПОЛУТЕНЬ

Закон прямолинейного распространения света

Опыты показывают, что

в вакууме и в однородной среде световые лучи распространяются прямолинейно.

? 2. Объясните, как можно использовать прямолинейность распространения света:

- для проверки прямолинейности линейки или бруска;
- для проверки того, что несколько врытых в землю вертикальных столбов находятся на одной прямой.

Тень

Если освещать предмет *точечным* источником света, то тень предмета будет *чёткой*, с резко очерченными краями (рис. 18.2).

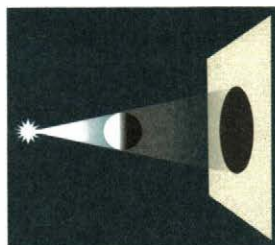


Рис. 18.2

Найти форму и размеры тени предмета на плоском экране обычно можно с помощью геометрических построений, используя прямолинейное распространение света.

- ?** 3. Прямой тонкий стержень длиной l , расположенный параллельно экрану на расстоянии d от экрана, освещён точечным источником света. Длина тени стержня равна $3l$.
- а) На каком расстоянии от экрана находится точечный источник света?
 - б) Как будет изменяться длина тени, если точечный источник приближать к стержню?
 - в) Как будет изменяться длина тени, если экран приближать к стержню?

- ?** 4. Картонный диск расположен параллельно экрану на расстоянии 20 см от него.
- а) Где должен находиться точечный источник света, чтобы тень диска имела форму круга?
 - б) На каком расстоянии от диска должен при этом находиться точечный источник света, чтобы площадь тени диска была в 2 раза больше площади диска?

Полутень

Если освещать предмет *протяжённым* источником света, то образуется также *полутень* — частично освещённая область экрана, на которую попадает свет не от всего источника света, а только от некоторой его части (рис. 18.3).

В некоторых случаях полной тени может вообще не быть, а будет наблюдаться только полутень.

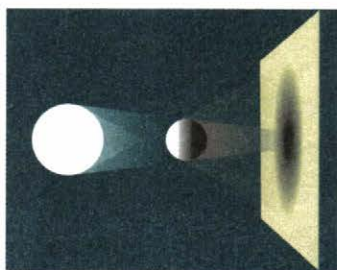


Рис. 18.3

- ?** 5. Картонный диск диаметром 20 см освещается светящимся кольцом того же диаметра. Диск и кольцо расположены параллельно экрану на расстоянии 40 см друг от друга, их центры находятся на одном перпендикуляре к экрану. Расстояние от диска до экрана 60 см.
- а) Чему равен диаметр тени диска на экране?
 - б) Чему равен диаметр полутени диска на экране?
 - в) Насколько надо уменьшить диаметр диска, чтобы полной тени от диска не было?

3. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Большинство предметов мы видим не потому, что они являются источниками света, а потому, что они *отражают* свет.

Рассмотрим сначала отражение света от *зеркальной* поверхности. Нас будут интересовать углы падения и отражения света.

Обратите внимание: углы падения и отражения света отсчитывают от перпендикуляра к отражающей поверхности, проведённого через точку падения луча.

Закон отражения света



Поставим опыты

При демонстрации опытов по геометрической оптике часто используют *оптический диск* (рис. 18.4).

Опыты показывают, что, когда свет падает на зеркальную поверхность (см. рис. 18.4):

- 1) отражённый луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведённым через точку падения луча;
- 2) угол отражения β равен углу падения α :
$$\beta = \alpha.$$

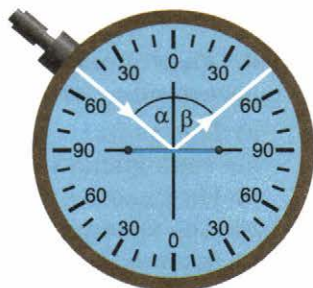


Рис. 18.4

6. Чему равны углы падения и отражения света на рисунке 18.4?
7. При каком угле падения падающий и отражённый лучи идут вдоль одной прямой?
8. При каком угле падения угол между падающим и отражёнными лучами равен 50° ?
9. Как изменится угол между падающим и отражённым лучами, если угол падения увеличить на 10° ?
10. Угол падения в 2 раза больше угла между отражённым лучом и зеркалом. Чему равен угол падения?
11. Солнечным зайчиком хотят осветить дно глубокого колодца. Под каким углом к горизонту надо расположить зерка-

ло, чтобы отражённый от него луч шёл вертикально вниз? Угол между солнечными лучами и горизонтом равен 48° .

Изображение в зеркале

На рисунке 18.5 изображён ход нескольких лучей, испущенных *точечным источником света* S и отражённых в зеркале.

? 12. Объясните, почему после отражения от зеркала лучи идут так, будто они испущены из точки S_1 , находящейся по другую сторону зеркала.

Точку S_1 называют *изображением* точечного источника S в зеркале. Обратите внимание: в точке, где находится изображение, пересекаются не сами лучи света, а их *продолжения*.

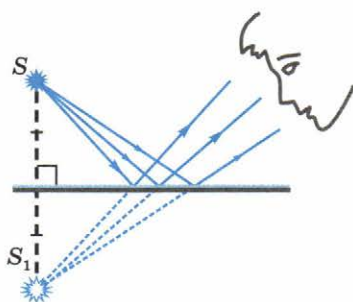


Рис. 18.5

Изображение, образованное не самими лучами, а их продолжениями, называют мнимым¹.

? 13. Объясните, почему *мнимое изображение точечного источника находится на таком же расстоянии от зеркала, что и сам источник*.

? 14. На рисунке 18.6 схематически изображён предмет (в виде стрелки AB) и зеркало. Перенесите рисунок в тетрадь.

а) Постройте изображение предмета в зеркале.

б) Изменится ли положение изображения, если оставить только верхнюю или нижнюю половину зеркала? Если нет, то что изме-

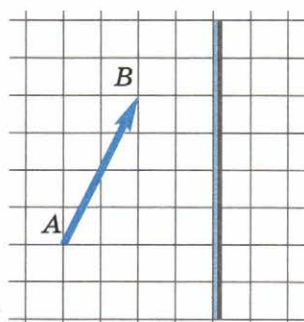


Рис. 18.6

¹ Заметим, что значениями слова «мнить» являются также «воображать», «представлять». Именно таковы были основные значения слова «мнить» в русском языке тогда, когда это слово начали применять к типу изображений. Учитывая современные значения слов, более точно было бы называть мнимое изображение *воображаемым*, потому что человек, который видит в зеркале изображение предмета, действительно *воображает (мнит)* предмет находящимся там, где находится его изображение за зеркалом.

нится? Обоснуйте свой ответ с помощью пояснительного чертежа.

Диффузное отражение

На рисунке 18.7 схематически показано отражение света, испущенного точечным источником света S , от шероховатой поверхности. Такое отражение называют диффузным¹ или рассеянным.

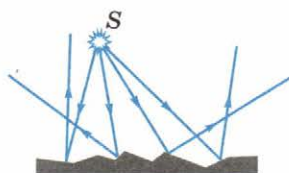


Рис. 18.7

? 15. Объясните, почему при диффузном отражении не возникает мнимых изображений предметов.

Большинство окружающих нас предметов мы видим потому, что они отражают свет *диффузно*. Глядя же на зеркало, мы видим не само зеркало, а *изображения предметов* в нём.

4. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Закон преломления света



Поставим опыты

Когда луч света падает на границу раздела двух прозрачных сред (например, воздуха и стекла), его направление изменяется, то есть луч *преломляется* (рис. 18.8).

Опыты показывают, что:

1) преломлённый луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведённым через точку падения луча;

2) отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления γ для двух данных сред постоянно:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n. \quad (1)$$

Величину n называют *относительным показателем преломления* двух данных сред.

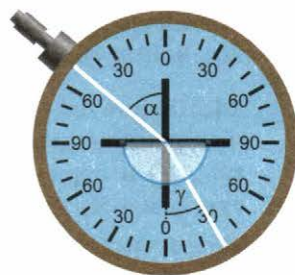


Рис. 18.8

¹ От латинского «диффузио» — распространение, растекание.

Если луч переходит в данную среду из вакуума, величину n называют *абсолютным показателем преломления* (или просто показателем преломления) данной среды.

Ту из двух сред, показатель преломления которой больше, называют *оптически более плотной*, чем другая среда.

Показатель преломления воздуха практически равен 1; показатель преломления воды 1,33, а показатель преломления стекла в зависимости от сорта стекла может быть от 1,5 до 2,1.

? 16. Чему равен показатель преломления стекла, из которого изготовлен полуцилиндр, в опыте, изображённом на рисунке 18.8?

? 17. Луч света падает из воздуха на поверхность воды под углом 60° . Чему равен угол преломления?

? 18. Луч света падает под углом 30° из воды на границу раздела «вода — воздух». Чему равен угол преломления?

Полное внутреннее отражение

? Поставим опыты

Когда луч света идёт из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (например, из воды в воздух), угол преломления *больше* угла падения (рис. 18.9).

Что же будет, если взять достаточно большой угол падения? Ведь угол преломления не может быть больше 90° !

Опыт показывает, что, если угол падения больше угла α_0 , для которого

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n},$$

преломлённого луча нет: будет только *отражённый* луч (рис. 18.10)! Это явление называют *полным внутренним отражением*, а угол α_0 называют *предельным углом полного отражения*.

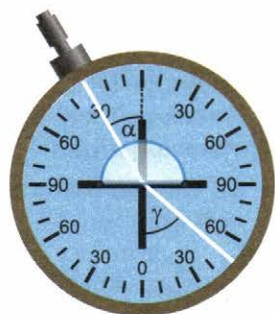


Рис. 18.9

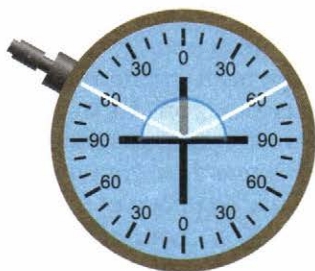


Рис. 18.10

? 19. Чему равен предельный угол полного отражения для луча, падающего из воды на границу раздела «вода — воздух»?

? 20. На рисунке 18.11 изображён ход луча в треугольной стеклянной призме.

а) Перенесите рисунок в тетрадь и постройте ход луча при преломлении на гранях призмы.

б) Объясните, почему при прохождении сквозь призму луч поворачивается к основанию треугольника в показанном сечении призмы.

в) Чему равен показатель преломления материала призмы, если её сечение — равносторонний треугольник, луч в призме идёт параллельно одной из граней и в результате прохождения сквозь призму луч повернулся на 60° ?

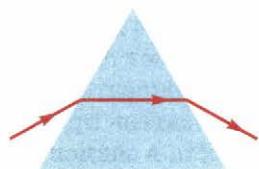


Рис. 18.11

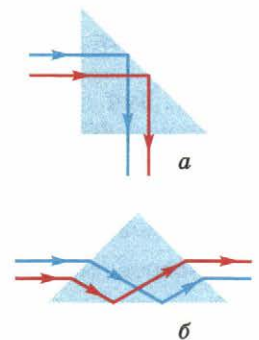


Рис. 18.12

? 21. На рисунке 18.12, *а* изображён ход лучей в *поворотной* призме, а на рисунке 18.12, *б* — в *оборачивающей*. В основании призм — равнобедренный прямоугольный треугольник.

а) Объясните смысл названий призм и ход лучей в каждой призме.

б) Можно ли изготовить поворотную и оборачивающую призмы из стекла с показателем преломления 1,5?

в) Будет ли поворотная призма играть свою роль, если погрузить её в воду?

Волоконная оптика

Явление полного внутреннего отражения используют в волоконной оптике при передаче световых сигналов по тонким стеклянным нитям — *световодам* (так называемым *оптическим волокнам*).

Ход луча света в световоде схематически показан на рисунке 18.13. Луч света следует за изгибами стек-

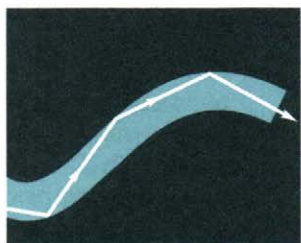


Рис. 18.13

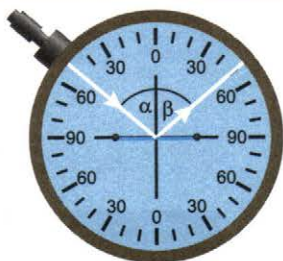
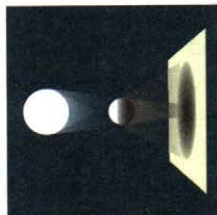
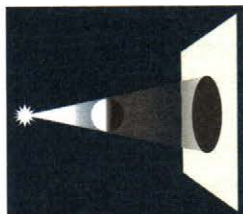
лянной нити, испытывая полное внутреннее отражение на её стенках. По оптическому волокну, состоящему из тонких стеклянных нитей толщиной в волос, передают сигналы для работы телевизоров, телефонов и компьютеров.

Оптические волокна используют и в медицине. С их помощью можно осветить внутренний орган и передать его изображение на монитор. Это позволяет производить обследование без операции.



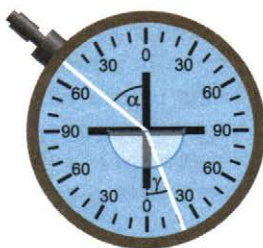
ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Тень и полутень



Закон отражения света

$$\beta = \alpha$$



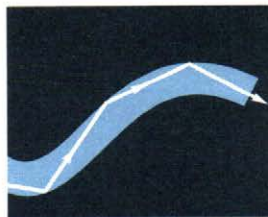
Закон преломления света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$$

Полное внутреннее отражение

Предельный угол
полного отражения

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$$





ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

22. Картонный диск диаметром 10 см освещается светящимся диском диаметром 20 см. Диски расположены параллельно экрану на расстояниях 30 и 90 см от экрана. Центры дисков — на одном перпендикуляре к экрану.

- а) Чему равны диаметры тени и полутени?
б) Чему равно отношение площади полутени к площади тени?

Подсказка. Полутень имеет форму широкого кольца.

23. Можно ли в маленьком плоском зеркале увидеть целиком изображение большого дома? Всего себя? Поясните свои ответы чертежами.

24. Какова должна быть высота укрепленного на стене зеркала, чтобы человек ростом h видел своё изображение в зеркале полностью?

25. На рисунке 18.14 изображён ход луча при прохождении сквозь плоскопараллельную прозрачную пластинку.

- а) Постройте ход луча.
б) Объясните, почему направление луча не изменилось.

- в) Чему равно смещение луча d , если толщина пластинки $h = 2$ см, угол падения $\alpha = 60^\circ$, а показатель преломления материала пластинки $n = 1,5$?

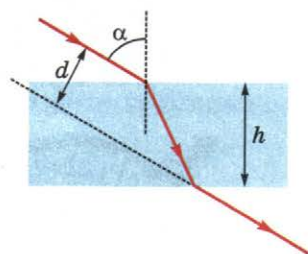


Рис. 18.14

26. От лампы, вмонтированной в дно бассейна, на поверхности воды образуется светлый круг радиусом 2 м (рис. 18.15).

- а) Чем обусловлено это явление?
б) Чему равна глубина бассейна?



Рис. 18.15

§ 19. ЛИНЗЫ

1. ВИДЫ ЛИНЗ. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЗЫ

С линзами и их свойствами вы познакомились в курсе физики основной школы. Напомним, что

линзой называют прозрачное тело, ограниченное сферическими¹ поверхностями.

Если линза посередине толще, чем у краёв, её называют *выпуклой* (рис. 19.1, а), а если она посередине тоньше, чем у краёв, то *вогнутой* (рис. 19.1, б). На рисунке 19.1 приведены обозначения линз на чертежах.

Мы будем рассматривать линзы, толщина которых намного меньше радиусов сферических поверхностей, ограничивающих линзу. Такие линзы называют *тонкими*. Приближённо можно считать, что тонкая линза лежит в одной плоскости. Её называют *плоскостью линзы*.

Точку *O* плоскости линзы, которой соответствует максимальная толщина выпуклой линзы (рис. 19.2) или минимальная толщина вогнутой линзы (рис. 19.3), называют *оптическим центром линзы*.

Прямую *AO*, перпендикулярную плоскости линзы и проходящую через её оптический центр, называют *главной оптической осью* линзы (см. рис. 19.2, 19.3). Другие прямые (например, *BO* и *CO*), тоже проходящие через оптический центр линзы, называют *побочными оптическими осями* линзы.

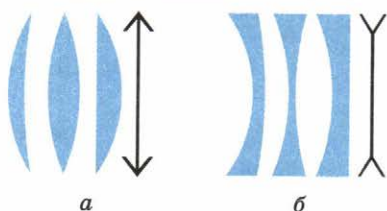


Рис. 19.1

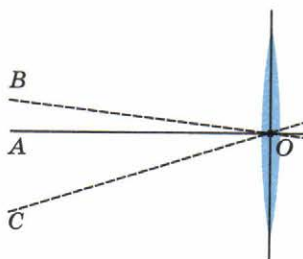


Рис. 19.2

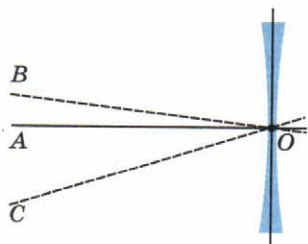


Рис. 19.3

¹ Одна из двух поверхностей линзы может быть плоской.

Ход луча, идущего через оптический центр линзы

Оптический центр линзы обладает замечательным свойством, которым мы будем часто пользоваться в дальнейшем.



Поставим опыт

Направим луч света в оптический центр линзы (собирающей или рассеивающей). Мы увидим, что *луч, проходящий через оптический центр линзы, не изменяет направления* (рис. 19.4, а, б). Схематически это изображено на рисунках 19.4, в, г.



1. Объясните, почему луч, проходящий через оптический центр линзы, не изменяет своего направления.

Подсказка. Вблизи оптического центра линзы две ограничивающие её поверхности параллельны. Вспомните ход луча сквозь плоскопараллельную пластинку (см. предыдущий параграф).

2. ФОКУСЫ ЛИНЗЫ. ФОКАЛЬНАЯ ПЛОСКОСТЬ

Рассмотрим ход *параллельного* пучка лучей сквозь выпуклую и вогнутую линзы.



Поставим опыт

Направим на выпуклую линзу параллельный пучок лучей (рис. 19.5). В результате преломления в линзе пучок станет *сходящимся*. Поэтому выпуклые линзы называют *собирающими*.



2. Используя рисунок 19.6, поясните аналогию между ходом лучей в собирающей линзе и в двух призмах.

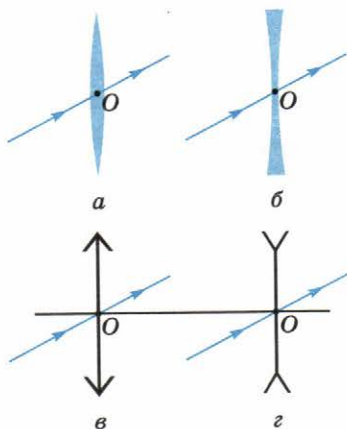


Рис. 19.4

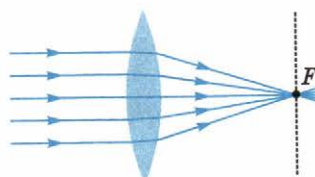


Рис. 19.5

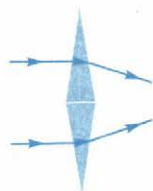


Рис. 19.6

Лучи, падающие на собирающую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в точке F , лежащей на главной оптической оси. Эту точку называют *главным фокусом линзы* (часто — просто *фокусом*).

- ?** 3. Объясните, почему из опыта, проиллюстрированного рисунком 19.5, следует, что *любой луч, падающий на собирающую линзу и идущий параллельно её главной оптической оси, после преломления в линзе проходит через её главный фокус* (рис. 19.7).

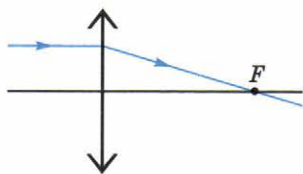


Рис. 19.7

Расстояние от плоскости линзы до её фокуса называют *фокусным расстоянием линзы* и обозначают также F . У каждой линзы — *два* главных фокуса. Они расположены на одинаковых расстояниях от линзы, но по разные стороны от неё.

- ?** 4. Объясните способ измерения фокусного расстояния собирающей линзы, показанный на рисунке 19.8. Свет на линзу падает от удалённого источника.



Рис. 19.8

- ?** 5. Расстояние между главными фокусами собирающей линзы равно 40 см. Чему равно фокусное расстояние линзы? Сделайте пояснительный рисунок.

Плоскость, перпендикулярную главной оптической оси и проходящую через главный фокус линзы, называют *фокальной плоскостью*.

? **Поставим опыт**

Если направить на линзу пучок лучей, параллельных любой побочной оптической оси, то после преломления в линзе они пересекутся в одной точке, лежащей в фокальной плоскости линзы (рис. 19.9). На рисунке фокальная плоскость изображена пунктиром.

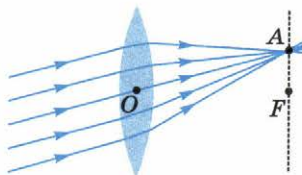


Рис. 19.9

Рассмотрим теперь ход параллельного пучка лучей в *вогнутой* линзе.



Поставим опыт

Если направить на вогнутую линзу параллельный пучок лучей, то после преломления пучок становится *расходящимся* (рис. 19.10). Поэтому вогнутую линзу называют *рассеивающей*.

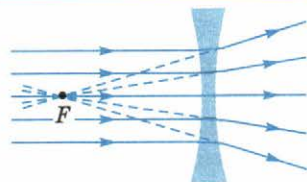


Рис. 19.10



6. Используя рисунок 19.11, поясните аналогию между ходом лучей в рассеивающей линзе и в двух призмах.

Лучи, падающие на рассеивающую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления в линзе идут так, будто они исходят из *одной* точки, находящейся с той стороны линзы, откуда падает параллельный пучок лучей (см. рис. 19.10).



Рис. 19.11

Итак, в данном случае пересекаются не сами преломлённые лучи, а их *продолжения*. Обратите внимание: *продолжения* лучей обозначают на чертежах *пунктиром* и не ставят на них стрелки, указывающие направление.

Точку, в которой пересекаются *продолжения* преломлённых лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси, тоже называют *главным фокусом* линзы и обозначают буквой *F*. Но в случае рассеивающей линзы этот фокус называют *мнимым*, потому что в нём пересекаются не сами лучи, а их продолжения.



7. Объясните, почему из опыта, проиллюстрированного рисунком 19.10, следует, что *любой луч, падающий на рассеивающую линзу и идущий параллельно её главной оптической оси, после преломления в линзе идёт так, что его продолжение проходит через её главный фокус* (рис. 19.12).

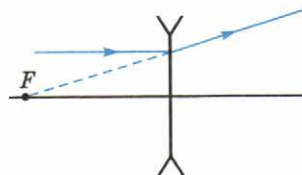


Рис. 19.12

У каждой рассеивающей линзы тоже есть два главных фокуса, расположенные на одинаковых расстояниях от линзы по разные стороны от неё.

- ?** 8. Изобразите в тетради ход пучка лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно её побочной оптической оси, и сделайте соответствующий вывод.

Оптическая сила линзы

В описанных опытах можно было заметить, что чем меньше фокусное расстояние линзы, тем она «сильнее», то есть тем больше отклоняет падающие на неё лучи.

Поэтому величину, *обратную* фокусному расстоянию линзы, называют *оптической силой линзы* и обозначают D :

$$D = \frac{1}{F}. \quad (1)$$

Оптическую силу измеряют в *диоптриях* (обозначают дптр). Если фокусное расстояние линзы равно 1 м, её оптическая сила равна 1 дптр.

3. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗАХ

До сих пор мы рассматривали ход *параллельного* пучка лучей в линзе. Изучим теперь прохождение сквозь линзу лучей, исходящих из *точечного источника света*.

Собирающая линза



Поставим опыт

Поместим точечный источник света в главный фокус собирающей линзы (рис. 19.13).

Мы увидим, что после преломления в линзе лучи идут *параллельно главной оптической оси линзы*.

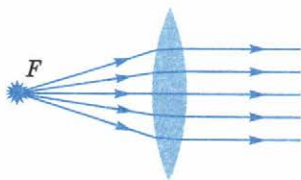


Рис. 19.13



- ?** 9. Объясните, почему из этого опыта следует, что *любой луч, проходящий через главный фокус собирающей линзы, после преломления в линзе идёт параллельно её главной оптической оси* (рис. 19.14).

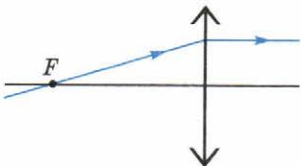


Рис. 19.14



Поставим опыт

Поместим теперь точечный источник света S за фокальной плоскостью и не на главной оптической оси.

После преломления в линзе лучи света пересекаются в одной точке S_1 (рис. 19.15). Её называют *изображением* источника.

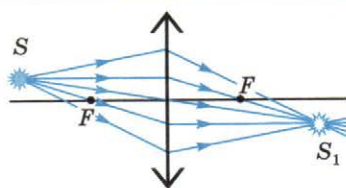


Рис. 19.15



10. Ход каких *трёх* лучей из пяти, изображённых на рисунке 19.15, вы могли бы *предсказать*, используя сведения из этого параграфа?

Далее мы будем говорить об изображении *точки* или *предмета*: они могут быть не источниками света, а отражать падающий на них свет.

Для нахождения изображения точки, не лежащей на главной оптической оси собирающей линзы, достаточно построить ход всего *двух* лучей:

- 1) луча, *идушего* через *оптический центр* линзы, — он не изменяет своего направления;
- 2) луча, *падающего* на линзу *параллельно* главной оптической оси, — после преломления в линзе он пройдёт через её главный фокус.

Воспользуемся этими двумя лучами для *построения* изображения точки в собирающей линзе.

Если исходящие из точки S лучи после преломления в линзе пересекаются, то точку S_1 их пересечения называют *действительным* изображением данной точки (рис. 19.16).

Действительное изображение точки *можно получить* на экране.

Действительное изображение S_1 лежит *по другую сторону* от *главной оптической оси*, чем сама точка S . Такое изображение называют *перевернутым*. Кроме того, действительное изображение лежит *по другую сторону* линзы, чем сама точка S .

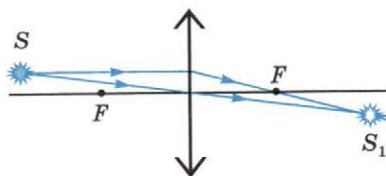


Рис. 19.16

Если же после преломления исходящих из точки S лучей в линзе пересекаются не сами лучи, а их продолжения, то точку S_1 пересечения *продолжений* лучей называют *мнимым* изображением данной точки (рис. 19.17).

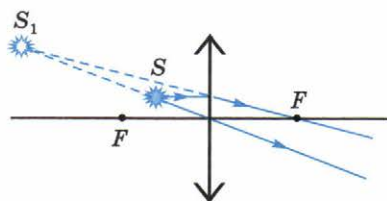


Рис. 19.17

Мнимое изображение точки *получить на экране нельзя*.

Мнимое изображение S_1 лежит *по ту же сторону от главной оптической оси*, что и сама точка S . Такое изображение называют *прямым*. Кроме того, мнимое изображение лежит *по ту же сторону линзы*, что и сама точка S .

? 11. Объясните с помощью построения хода лучей, почему изображение точки в собирающей линзе является:

- действительным, если данная точка находится *дальше* фокальной плоскости линзы;
- мнимым, если данная точка находится *ближе* фокальной плоскости линзы.

Рассеивающая линза

Для построения изображения точки в рассеивающей линзе обычно используют ход тех же двух «удобных» лучей:

- луча, *идущего через оптический центр линзы*, — он не изменяет своего направления;
- луча, *падающего на линзу параллельно главной оптической оси*, — после преломления в линзе он идёт так, что его продолжение проходит через главный фокус.

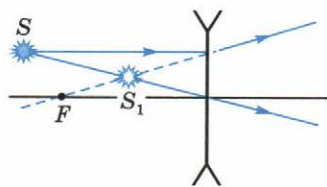


Рис. 19.18

? 12. Используя рисунок 19.18, объясните, почему *рассеивающая линза всегда даёт мнимое изображение точки*.

4. УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

При изучении создаваемого линзой изображения *протяжённого* предмета в качестве простейшей модели такого предмета берут стрелку, расположенную перпендикулярно главной оптической оси с началом на этой оси.

На рисунках 19.19 *a–в* приведены примеры построения изображений¹ предмета в собирающей и рассеивающей линзах.

Обозначим длину предмета h , а длину его изображения H .

Увеличением линзы Γ называют² отношение длины изображения H предмета к длине самого предмета h :

$$\Gamma = \frac{H}{h}. \quad (2)$$

Например, если $\Gamma = 0,5$, то изображение предмета в 2 раза *меньше* предмета.

Изображение называют:

- *увеличенным*, если $\Gamma > 1$,
- *уменьшенным*, если $\Gamma < 1$,
- *в натуральную величину*, если $\Gamma = 1$.

Обозначим d расстояние от предмета до линзы, а f — расстояние от линзы до изображения этого предмета (см. рис. 19.19, *a*).

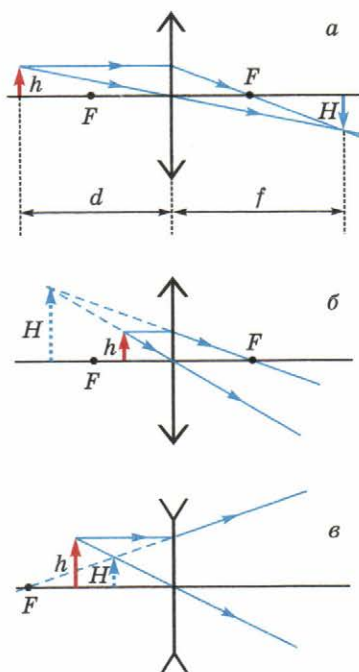


Рис. 19.19

- ?** 13. Докажите построением хода лучей, что действительное изображение предмета в собирающей линзе будет:
- уменьшенным, если $d > 2F$;
 - в натуральную величину, если $d = 2F$;
 - увеличенным, если $d < 2F$;
- ?** 14. Докажите построением хода лучей, что *мнимое изображение предмета в собирающей линзе всегда увеличенное*.
- ?** 15. Докажите построением хода лучей, что *изображение предмета в рассеивающей линзе всегда уменьшенное*.
- ?** 16. Докажите, что

$$\Gamma = \frac{f}{d}.$$

¹ Мнимое изображение часто обозначают пунктиром.

² Буква Γ — большая буква греческого алфавита; читается «гамма».

5. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

- ?** 17. Используя рисунок 19.19, а, объясните, почему в случае действительного изображения справедливы формулы

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \quad (3)$$

$$\frac{H}{h} = \frac{f - F}{F}. \quad (4)$$

Приравнивая правые части формул (3) и (4), получаем:

$$df = Ff + Fd. \quad (5)$$

Мы получили соотношение, связывающее расстояния от предмета и его изображения до линзы с фокусным расстоянием линзы. Обычно его записывают в виде

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (6)$$

Это соотношение называют формулой тонкой линзы.

- ?** 18. Используя рисунок 19.19, б, объясните, почему в случае мнимого изображения в собирающей линзе формула линзы имеет вид

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (7)$$

- ?** 19. Используя рисунок 19.19, в, объясните, почему в случае рассеивающей линзы формула линзы имеет вид

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}. \quad (8)$$

Формулы (7), (8) можно записать в виде формулы (6), если:
— считать $f > 0$ для действительного изображения и $f < 0$ — для мнимого;
— считать $F > 0$ для собирающей линзы и $F < 0$ — для рассеивающей.

- ?** 20. Линза с фокусным расстоянием 10 см делит расстояние между предметом и экраном, на котором получено чёткое изображение предмета, в соотношении 1 : 2.

- а) Какой из формул линзы: (6), (7) или (8) — надо в данном случае пользоваться?
б) Чему равно расстояние от предмета до экрана?

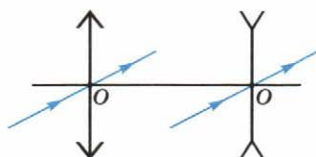


Линзы

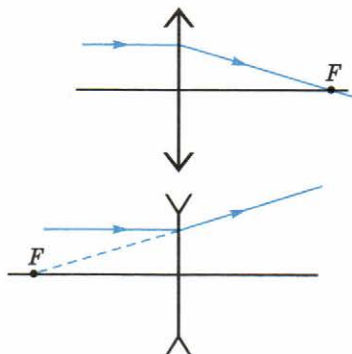
Виды линз



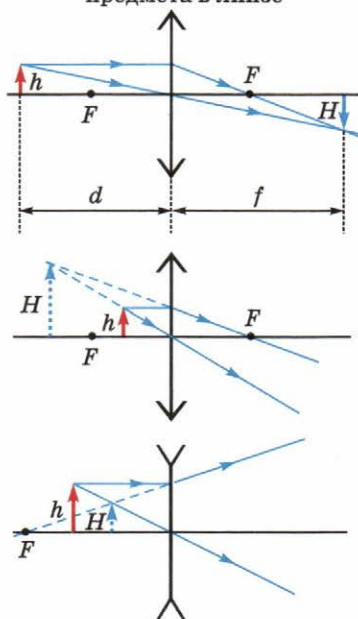
Ход луча, идущего через оптический центр линзы



Ход луча, идущего параллельно главной оптической оси линзы



Построение изображения предмета в линзе



Оптическая сила линзы

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

Увеличение линзы

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

Формула тонкой линзы

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

Действительное изображение $f > 0$

Мнимое изображение $f < 0$

Собирающая линза $F > 0$

Рассеивающая линза $F < 0$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

21. Стёкла дедушкиных очков — собирающие линзы с оптической силой 4 дптр. На каком расстоянии от садовой скамейки внук держит эти очки, выжигая формулу тонкой линзы?
22. На рисунках 19.20, a – $г$ показаны главные оптические оси четырёх линз, точка S и изображение этой точки S_1 в линзе. Перенесите рисунки в тетрадь и на каждом из них:
- проведите луч, проходящий через оптический центр линзы;
 - определите положение линзы и её вид (собирающая или рассеивающая);
 - определите положение фокусов линзы;
 - определите тип изображения (действительное или мнимое).

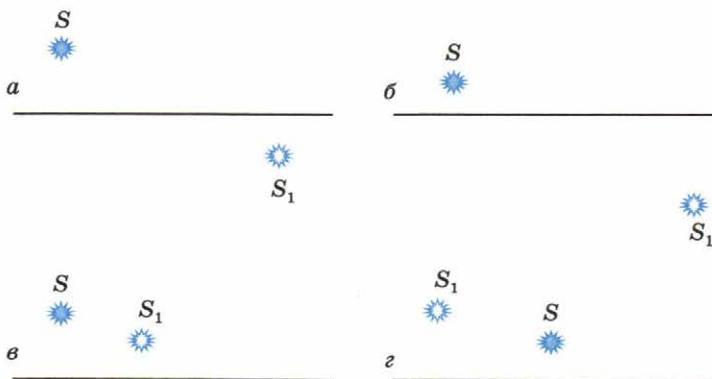


Рис. 19.20

23. Маленькая лампа находится на расстоянии 90 см от вертикального экрана. На каком расстоянии от лампы надо поместить линзу с фокусным расстоянием 20 см, чтобы на экране получилось чёткое изображение лампы? Сколько решений имеет эта задача?

§ 20. ГЛАЗ И ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1. ГЛАЗ

Строение глаза

Замечательными оптическими приборами являются созданные самой природой в процессе эволюции глаза человека и животных. На рисунке 20.1 изображено строение глаза человека.

Роговица и *хрусталик* выполняют вместе роль *собирающей линзы*, с помощью которой на *сетчатке*, состоящей из светочувствительных клеток, получается *действительное уменьшенное и перевёрнутое изображение* предметов. Схематически это показано на рисунке 20.2.

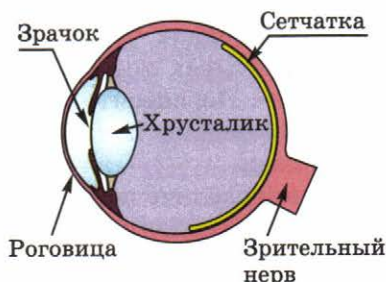


Рис. 20.1

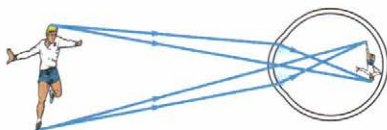


Рис. 20.2

Изображение на сетчатке передаётся по зрительному нерву в мозг, который автоматически переворачивает изображение обратно, поэтому мы воспринимаем предметы неперевернутыми.

Преломление света происходит в основном на внешней поверхности роговицы. Наводка на резкость осуществляется благодаря изменению оптической силы хрусталика, которое производит крошечная мышца, охватывающая его. Когда человек хочет рассмотреть близкий предмет, мозг человека посылает в эту мышцу сигнал, по которому она сжимает хрусталик. При этом он утолщается, вследствие чего его оптическая сила увеличивается.

Автоподстройку глаза на резкость называют *аккомодацией*.

Существует, однако, *предел аккомодации*, из-за которого не удаётся хорошо рассмотреть предмет, расположенный ближе 10—15 см от глаза.

Самое «удобное» расстояние для рассматривания предметов людьми, не имеющими дефектов зрения, — примерно 25 см. Это расстояние называют *расстоянием наилучшего зрения*.

Расслабленный глаз настроен «на бесконечность», то есть на рассматривание удалённых предметов. Поэтому при чтении или при работе за компьютером не забывайте давать глазам передышку: время от времени смотрите вдаль, лучше всего — в окно. Это помогает также осмыслить прочитанное.

? 1. Оптическую систему глаза можно представить как собирающую линзу, оптический центр которой находится на расстоянии 17,1 мм от сетчатки. Чему равна оптическая сила глаза при рассматривании:

- а) очень удалённых предметов?
- б) предмета на расстоянии наилучшего зрения?

Недостатки зрения и их исправление

Недостаток зрения, при котором человеку трудно рассмотреть близкие предметы, называют *дальнозоркостью*¹.

В глазу дальнозоркого человека даже при максимально возможной оптической силе глаза действительное изображение близкого предмета оказывается на некотором расстоянии *дальше* сетчатки (рис. 20.3, а).

Исправить дальнозоркость помогают очки с *собирающими* линзами: собирающая линза как бы увеличивает оптическую силу глаза, вследствие чего изображение близкого предмета попадает на сетчатку (рис. 20.3, б).

Недостаток зрения, при котором человек хорошо видит близкие предметы, но плохо различает удалённые, называют *близорукостью*².

В глазу близорукого человека даже при минимально возможной оптической силе глаза изображения удалённых предметов оказываются ближе сетчатки (рис. 20.3, в).

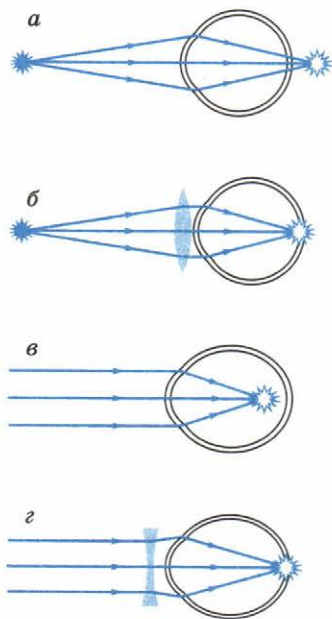


Рис. 20.3

¹ Дальнозорким человека называют потому, что он плохо видит близкие предметы и, чтобы рассмотреть их лучше, отодвигает *дальше* от глаз.

² Близорукий человек часто берёт рассматриваемый предмет в *руки* и подносит его *близко* к глазам.

Исправить близорукость помогают очки с *рассеивающими* линзами: рассеивающая линза как бы уменьшает оптическую силу глаза, благодаря чему изображение далёкого предмета попадает на сетчатку (рис. 20.3, з).

Чтобы оценить оптическую силу стёкол в очках, исправляющих тот или иной дефект зрения, можно воспользоваться тем, что оптическая сила D системы, состоящей из двух близко расположенных линз с оптической силой D_1 и D_2 соответственно, приближённо выражается равенством

$$D = D_1 + D_2.$$

При использовании этого равенства оптическую силу *собирающей* линзы надо считать *положительной*, а *рассеивающей* линзы — *отрицательной*.

- ?** 2. Человек хорошо видит предметы, расположенные не ближе 1 м от глаза. Расстояние от сетчатки до оптического центра собирающей линзы, являющейся моделью оптической системы глаза, примите равным 17,1 мм.
- а) Человек страдает дальзоркостью или близорукостью?
б) Чему равна оптическая сила глаза при рассматривании предмета, расположенного на расстоянии 1 м от глаза?
в) Какова оптическая сила очков, позволяющих данному человеку чётко видеть предметы, расположенные на расстоянии наилучшего зрения?

2. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Фотоаппарат и видеокамера

На рисунке 20.4 схематически изображено устройство фотоаппарата или видеокамеры.

Мы видим, что фотоаппарат напоминает глаз: роль роговицы и хрусталика выполняет объектив, а роль сетчатки — фотоплёнка или светочувствительный элемент, на котором фиксируется изображение.

Наводка на резкость в фотоаппарате производится либо изменением фокусного расстояния объектива, либо изменением расстояния от объектива до светочувствительного элемента.

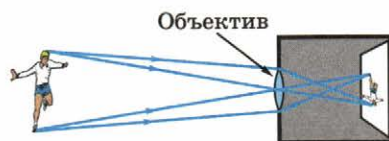


Рис. 20.4

? 3. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата 15 мм. Объектив фотоаппарата считайте тонкой линзой.

а) В каких пределах может изменяться расстояние от объектива до фотоплёнки, если с помощью данного фотоаппарата можно получать чёткие изображения предметов, расположенных не ближе 1,5 м от объектива?

б) Чему равна высота изображения дерева высотой 5 м на фотоплёнке, если дерево находится на расстоянии 60 м от фотоаппарата?

В случае глаза и фотоаппарата действительное изображение предмета *во много раз меньше* самого предмета, то есть увеличение линзы $\Gamma \ll 1$. Легко убедиться, что в таком случае действительное изображение предмета находится чуть-чуть дальше фокальной плоскости собирающей линзы.

Рассмотрим пример.

? 4. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата 8 мм. На каком расстоянии от фокальной плоскости находится изображение предмета, удалённого от фотоаппарата на 10 м?

Благодаря тому, что изображение удалённого предмета находится очень близко к фокальной плоскости объектива, во многих задачах о фотосъёмке удалённых предметов расстояние до изображения можно принимать равным фокусному расстоянию объектива. Это значительно упрощает расчёт.

Рассмотрим пример.

? 5. Поверхность Земли фотографируют со спутника, который движется по орбите высотой 120 км над поверхностью Земли. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата 12 см. Изображение фиксируется на светочувствительном элементе, состоящем из отдельных точек, причём расстояние между соседними точками равно 2 мкм.

а) Во сколько раз размеры изображений меньше размеров предметов?

б) Каков минимальный размер предмета на поверхности Земли, изображение которого попадёт более чем на одну точку светочувствительного элемента?

в) Каким должно быть время экспозиции (промежуток времени, когда объектив фотоаппарата открыт), чтобы изображения предметов не казались смазанными из-за движения спутника?

Киноаппарат и проектор

Действие киноаппарата и проектора основано на том, что действительное изображение предмета будет очень сильно *увеличенным*, если предмет находится чуть-чуть дальше фокальной плоскости собирающей линзы.

На киноэкране мы видим действительное, сильно увеличенное и перевёрнутое изображение ярко освещённых маленьких кадров киноплёнки. На рисунке 20.5 изображён принцип действия киноаппарата.

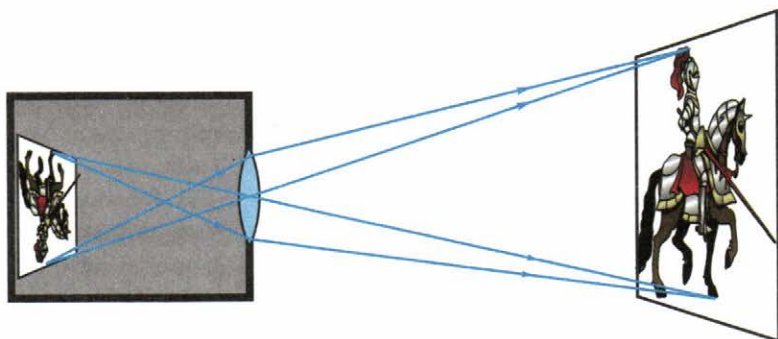
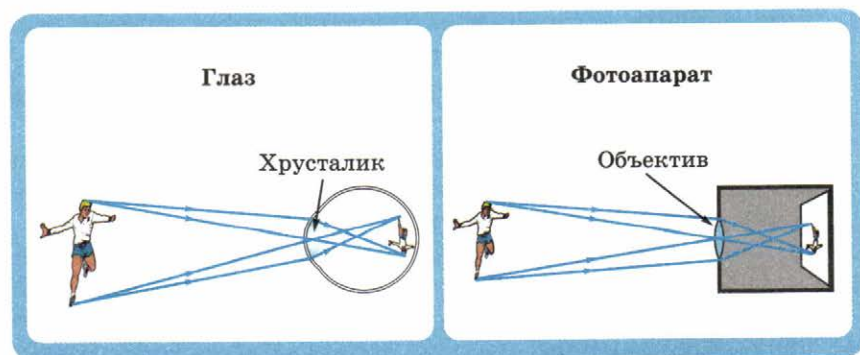


Рис. 20.5

- ?** 6. Экран высотой 2 м находится на расстоянии 10 м от проектора. Чему равно фокусное расстояние объектива проектора, если высота проектируемого на экран слайда 2 см?

? ЧТО МЫ УЗНАЛИ





ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

7. Чему равен размер изображения дома высотой 21 м на сетчатке глаза, если рассматривать дом с расстояния 1 км?
8. Человек хорошо видит предметы, расположенные не дальше 18 см от глаза.
 - а) Человек страдает дальнозоркостью или близорукостью?
 - б) Чему равна оптическая сила глаза при рассматривании предмета, расположенного на расстоянии 18 см от глаза?
 - в) Какова оптическая сила очков, позволяющих данному человеку чётко видеть предметы, расположенные на расстоянии наилучшего зрения?
9. Расстояние между соседними светочувствительными клетками сетчатки равно 5 мкм. С какого расстояния две лампы, расстояние между которыми 50 см, будут казаться одной светящейся точкой?

Подсказка. Расстояние между изображениями этих ламп на сетчатке должно быть меньше расстояния между соседними светочувствительными клетками сетчатки.
10. Чему равен размер изображения Луны на сетчатке глаза? Для оценки примите, что диаметр Луны в 100 раз меньше расстояния от Земли до Луны.
11. Фотоплёнка находится в фокальной плоскости объектива фотоаппарата с фокусным расстоянием 5 см. Диаметр входного отверстия фотоаппарата 3 мм. При этом изображение точечного источника света, расположенного на расстоянии 10 м от фотоаппарата, имеет вид светлого пятна. Чему равен диаметр этого пятна?

Подсказка. Диаметр светлого пятна определяется ходом лучей света, идущих через крайние точки входного отверстия.
12. Во сколько раз изображение на экране больше кинокадра, если фокусное расстояние объектива киноаппарата равно 5 см, а кинокадр находится на 0,5 мм дальше фокальной плоскости линзы?



§ 21. БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ ВОПРОСЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

1. ИЗОБРАЖЕНИЕ В ОДНОМ И ДВУХ ЗЕРКАЛАХ

Область видения предмета в зеркале

Область пространства, из которой можно увидеть изображение точки S в зеркале, называют *областью видения* этого изображения.

Для нахождения области видения учтём, что в *любую* её точку приходит один из лучей, исходящий из точки S после отражения в зеркале (рис. 21.1). Значит, область видения заключена между лучами, исходящими из точки S и отражёнными *крайними* точками зеркала. На рисунке 21.2 область видения точки S выделена.

Легко заметить, что это та область пространства, из которой видно *изображение* S_1 данной точки, если рассматривать его «сквозь зеркало». Другими словами, зеркало — это как бы окно, сквозь которое мы заглядываем в «зазеркалье», то есть в «мир изображений».

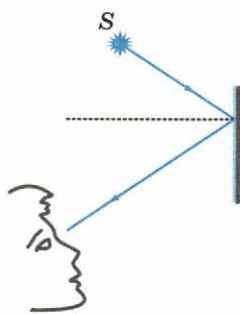


Рис. 21.1

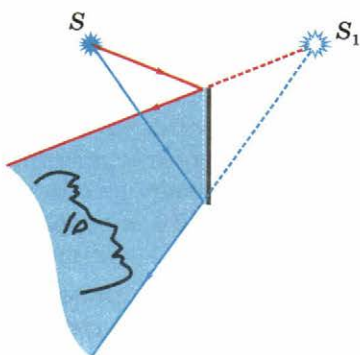


Рис. 21.2

? 1. На рисунке 21.3 изображены стрелка AB и зеркало. Перенесите рисунок в тетрадь и найдите построением:

- область видения изображения точки A ;
- область видения изображения точки B ;
- область видения изображения всей стрелки.

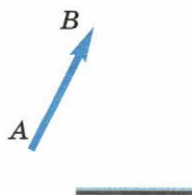


Рис. 21.3

Подсказка. Из области видения всей стрелки должны быть видны изображения точек A и B .

Изображение в двух зеркалах

Точечный источник света S находится между зеркалами 1 и 2 , перпендикулярными друг другу (рис. 21.4). Обозначим S_1 и S_2 изображения источника S в первом и втором зеркале (рис. 21.5).

Но это ещё *не все* изображения источника! Ведь лучи света, отражённые одним зеркалом, могут после этого попасть на другое зеркало и, отразившись от него, сформировать одно или несколько новых изображений.

? 2. Постройте изображение:

а) S_{12} источника, получившееся в результате отражения лучей света сначала от зеркала 1 , а затем от зеркала 2 .

б) S_{21} источника, получившееся в результате отражения лучей света сначала от зеркала 2 , а затем от зеркала 1 .

в) Объясните, почему изображения S_{12} и S_{21} совпадают.

Итак, два зеркала, расположенные под *прямым* углом друг к другу, дают *три* изображения. Попробуйте сами убедиться в этом на опыте.

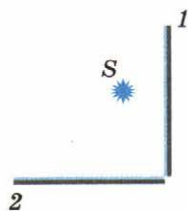


Рис. 21.4

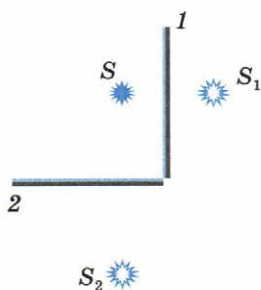


Рис. 21.5

(Handwritten scribble)

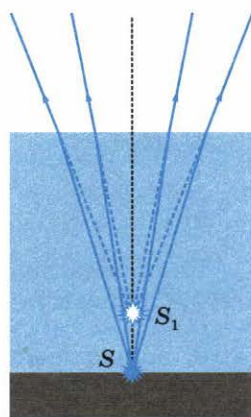


Рис. 21.6

2. ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ НА ГРАНИЦЕ «ВОДА — ВОЗДУХ»

Видимая глубина водоёма

Почему видимая глубина реки или моря всегда кажется меньшей, чем она есть на самом деле?

Для ответа на этот вопрос построим ход лучей света, исходящих из точки S на дне водоёма и направленных под малыми углами к вертикали (рис. 21.6).

Мы видим, что продолжения преломлённых лучей пересекаются в точке S_1 , которая *ближе* к поверхности воды, чем точка S . Точка S_1 — это изображение точки S . Его и увидит человек, смотрящий в воду сверху вниз, поэтому дно будет казаться ему находящимся *ближе*, чем оно есть на самом деле.

? 3. Каким изображением точки S является точка S_1 — действительным или мнимым?

Во сколько же раз *кажу́щаяся* глубина меньше *истинной*?

Когда человек смотрит в воду вертикально вниз, можно считать, что для всех лучей, исходящих от точки S и попадающих в глаз человека, углы падения и преломления малы. Это упрощает расчёты, поскольку синусы и тангенсы малых углов приближённо равны значениям самих углов в радианной мере:

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha.$$

На рисунке 21.7 изображён ход двух лучей: один направлен вертикально, а другой — под *малым* углом α к вертикали (для наглядности на рисунке этот угол взят не слишком малым).

Введём обозначения:

γ — угол преломления второго луча;

n — показатель преломления воды;

b — расстояние между точками, в которых лучи переходят из воды в воздух;

H — глубина водоёма;

h — расстояние от изображения S_1 до поверхности воды.

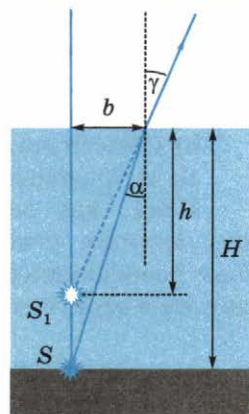


Рис. 21.7

? 4. Объясните, почему:

а) $H = \frac{b}{\alpha}$; в) $\frac{\alpha}{\gamma} = \frac{1}{n}$;

б) $h = \frac{b}{\gamma}$; г) $h = \frac{H}{n}$.

Итак, *кажу́щаяся глубина водоёма в $n = 1,33$ раза меньше истинной.*

? 5. Плосковыпуклую линзу с фокусным расстоянием F кладут на поверхность воды плоской стороной вниз (рис. 21.8).



Рис. 21.8

а) Постройте ход двух лучей: падающего на линзу сверху вдоль главной оптической оси и параллельного ему, для случая, если бы под линзой был воздух.

б) На том же чертеже постройте ход этих же лучей для случая, когда под линзой вода.

в) Объясните, почему падающие на линзу лучи, параллельные её главной оптической оси, после преломления в линзе и на поверхности воды пересекутся в воде на глубине nF , где n — показатель преломления воды.

Тень от предмета в воде

Рассматривая тень от предмета в воде, надо различать случаи *солнечного* и *пасмурного* дня.

В *солнечный* день можно считать предмет освещённым *точечным* бесконечно удалённым источником света.

? 6. В дно озера глубиной 2 м врыт вертикальный столб высотой 3 м. Солнечные лучи падают на поверхность воды под углом 60° . Сделайте чертёж и ответьте на следующие вопросы. Чему равны:

а) длина тени столба на поверхности воды?

б) угол преломления солнечных лучей?

в) длина тени столба на дне озера?

В *пасмурный* день, когда небо обложено облаками, надо рассматривать *всё небо* как *протяжённый* источник света.

В таком случае лучи света идут со *всех точек* неба, однако вследствие преломления лучей на поверхности воды под непрозрачным предметом, плавающим на воде, образуется тень. На рисунке 21.9 она выделена серым треугольником.



Рис. 21.9

? 7. Объясните, почему максимальный угол преломления γ_0 равен предельному углу полного отражения (рис. 21.9).

? 8. На тихой поверхности озера в пасмурный день плавает тонкий непрозрачный круг радиусом 20 см. Сделайте чертёж и ответьте на следующие вопросы.

а) Форму какого объёмного тела имеет тень под кругом?

б) Какова максимальная глубина тени?

3. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЛИНЗЕ

Изображение точки, лежащей на главной оптической оси линзы

Для построения изображения такой точки нельзя воспользоваться уже знакомыми нам двумя «удобными» лучами, с помощью которых строят изображение точки в линзе (проходящим через оптический центр линзы и параллельным её главной оптической оси). Дело в том, что в данном случае оба эти луча сливаются в *один* луч, идущий вдоль главной оптической оси.

Однако построить изображение точки, лежащей на главной оптической оси линзы, можно. Это можно сделать несколькими способами, мы покажем два из них. Все способы используют основное свойство линзы: *после преломления в линзе лучей, исходящих из одной точки, эти лучи или их продолжения пересекаются в одной точке.*

Мы покажем построение изображения точки, лежащей на главной оптической оси, только в собирающей линзе, причём для случая, когда эта точка лежит дальше фокальной плоскости линзы. Остальные случаи мы предлагаем вам рассмотреть самостоятельно.

1. Замена точки «стрелкой».

Будем рассматривать точку A как начало *стрелки* AB , параллельной плоскости линзы, и построим с помощью «удобных» лучей её изображение A_1B_1 в линзе (рис. 21.10). Точка A_1 — изображение точки A .

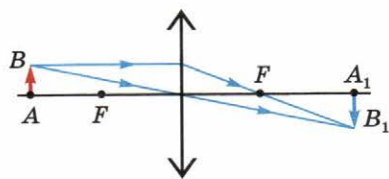


Рис. 21.10

? 9. Постройте таким же способом изображение точки, лежащей:

- на главной оптической оси ближе фокуса собирающей линзы;
- на главной оптической оси рассеивающей линзы.

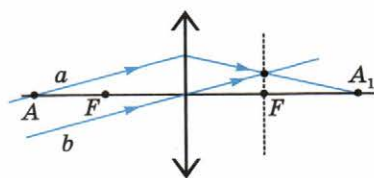


Рис. 21.11

2. Использование побочной оптической оси.

Возьмём луч b , идущий вдоль любой побочной оптической оси линзы: он пройдёт сквозь линзу, не изменив направления (рис. 21.11).

Построим теперь ход луча a , исходящего из точки A и *параллельного* лучу b . Как мы знаем, после преломления в линзе пучок параллельных лучей пересекается в точке, лежащей в фокальной плоскости линзы. Следовательно, после преломления в линзе луч a пересечётся с лучом b в фокальной плоскости. Это позволяет нам найти направление луча a после преломления в линзе. Изображение A_1 точки A — это точка пересечения луча a с главной оптической осью.

? 10. Постройте таким же способом изображение точки, лежащей:

- на главной оптической оси ближе фокуса собирающей линзы;
- на главной оптической оси рассеивающей линзы.

Ход произвольного луча

Ход произвольного луча, падающего на линзу, после его преломления в линзе можно построить, используя вспомогательный луч, идущий через оптический центр линзы. Надо знать только положение фокусов линзы и её вид (собирающая или рассеивающая).

? 11. Объясните приведённое на рисунке 21.12 построение хода падающего на линзу луча a после его преломления в линзе.

? 12. Перенесите в тетрадь рисунки 21.13 и 21.14 и постройте ход луча a , падающего на линзу, для этих случаев.

Нахождение фокусов линзы по ходу произвольного луча

Если известен ход луча до и после его преломления в линзе, то можно найти положение фокусов линзы и определить её вид (собирающая или рассеивающая). Для этого можно использовать тот же самый вспомогательный луч.

? 13. Объясните нахождение фокусов линзы по заданному ходу луча a на рисунке 21.12.

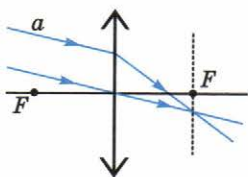


Рис. 21.12

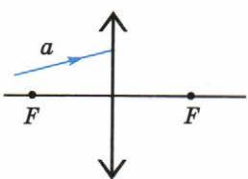


Рис. 21.13

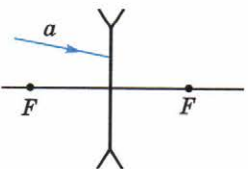


Рис. 21.14

Изображение треугольника в линзе

Чтобы построить изображение в линзе не стрелки, а двумерной фигуры (например, треугольника), надо построить изображения основных точек этой фигуры (для треугольника — изображения его трёх вершин). Обычно предполагается, что изображениями отрезков являются отрезки¹.

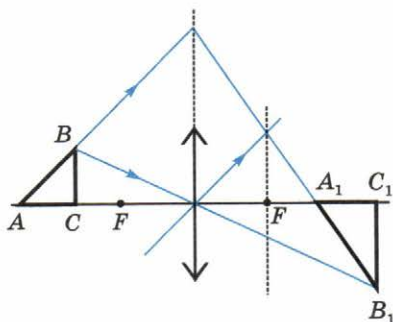


Рис. 21.15

- ?** 14. Объясните построение изображения $A_1B_1C_1$ треугольника ABC на рисунке 21.15.

- ?** 15. Перенесите рисунок 21.16 в тетрадь и постройте изображение $A_1B_1C_1$ треугольника ABC .

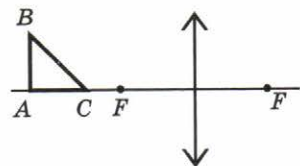


Рис. 21.16



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

16. На стене AB комнаты висит картина (рис. 21.17, вид сверху). Человек хочет повесить на стене BC вертикальное зеркало так, чтобы, находясь у стены CD , он мог видеть в зеркале всю картину. Найдите минимальную ширину зеркала и находящуюся у стены CD точку, из которой можно в этом зеркале видеть всю картину.
17. Сколько изображений точки дают два зеркала, расположенные под углом 60° друг к другу?
18. В дно водоёма глубиной 3 м вбита вертикальная свая высотой 2 м. Угол падения солнечных лучей на поверхность

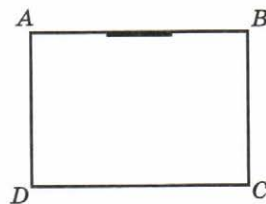


Рис. 21.17

¹ Это можно считать справедливым для отрезков, не пересекающих фокальную плоскость линзы и малых по сравнению с её фокусным расстоянием.

воды равен 30° . Чему равна длина тени сваи на дне водоёма? Есть ли в условии лишние данные?

19. В озере в пасмурный день плавает деревянный куб со стороной $a = 10$ см (рис. 21.18). Плотность древесины $\rho = 600$ кг/м³.

а) На какой глубине находится нижняя грань куба?

б) На какой глубине находится нижняя точка тени от куба?

в) Можно ли увидеть тень от куба в воде, глядя в воду сверху?

20. Перенесите в тетрадь рисунки 21.19 и 21.20 и найдите построением положение фокусов линзы и её вид (собирающая или рассеивающая) в каждом случае.

21. Плосковыпуклая линза плавает на поверхности воды. Фокусное расстояние линзы в воздухе равно 12 см. На высоте 24 см над линзой находится точечный источник света S .

а) На какой глубине находится изображение источника?

б) Является изображение действительным или мнимым?

22. На главной оптической оси линзы диаметром 6 см с фокусным расстоянием 20 см находится точечный источник света S . Расстояние от источника до линзы 60 см.

а) На каком расстоянии от линзы находится изображение источника?

б) Чему равен диаметр светлого пятна на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы?

Подсказка. Рассмотрите ход лучей, идущих через наиболее удалённые от центра точки линзы.

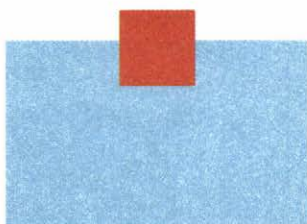


Рис. 21.18

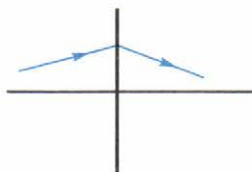


Рис. 21.19

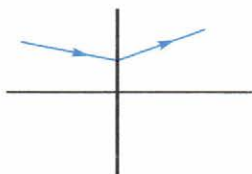


Рис. 21.20



Геометрическая оптика

Законы геометрической оптики



Закон отражения света

$$\beta = \alpha$$

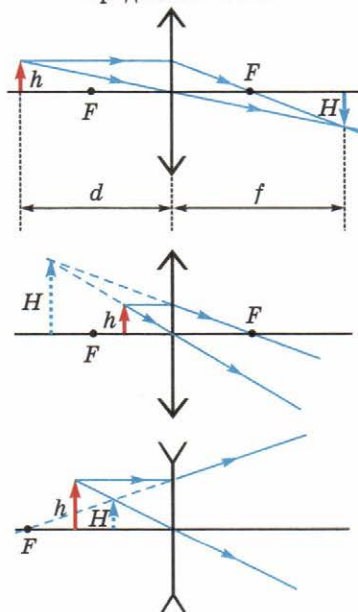


Закон преломления света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$$

Предельный угол полного отражения $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$

Построение изображения предмета в линзе



Оптическая сила линзы

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

Увеличение линзы

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

Формула тонкой линзы

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

Действ. изображение $f > 0$

Мнимое изображение $f < 0$

Собирающая линза $F > 0$

Рассеивающая линза $F < 0$

§ 22. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН**1. СВЕТ — ЧАСТИЦЫ ИЛИ ВОЛНЫ?**

Физическую природу света начали изучать в 17-м веке.

Как вы уже знаете из курса физики основной школы, датский астроном О. Рёмер смог первым измерить скорость света, наблюдая за затмениями спутников Юпитера. В дальнейшем полученный им результат был уточнён. Согласно современным данным, скорость света составляет 300 000 км/с.

Учёным были известны *две* различные формы движения, казавшиеся тогда *взаимоисключающими*:

- движение *тел*;
- распространение *волн*.

Эти формы движения принципиально различаются тем, что при движении тел вещество перемещается, а при распространении волн перемещения вещества нет.

Возник вопрос: что же представляет собой *свет*: это движение потока *частиц* или распространение *волн*?

Корпускулярная теория света. И. Ньютон предположил, что свет является потоком мельчайших частиц. Такое представление о природе света называют *корпускулярной*¹ теорией света.

Корпускулярная теория убедительно объясняет прямолинейное распространение света, а также его отражение. Она объясняет также распространение света в пустоте (благодаря чему мы видим Солнце и далёкие звёзды).

Для распространения же волн, как тогда считали, необходима материальная среда, возмущениями которой и являются волны (подобно звуковым волнам в веществе).

Но если такая материальная среда существует, то почему Земля и планеты тысячелетиями движутся вокруг Солнца, не испытывая никакого сопротивления этой среды?



Исаак Ньютон
1643–1727

¹ От латинского «корпускулум» — частица.

Волновая теория света. Создателем *волновой* теории света был голландский учёный Х. Гюйгенс. Главным доводом в пользу волновой теории он считал тот факт, что световые лучи свободно проходят друг сквозь друга, а это характерно именно для распространения волн. В пересекающихся же потоках частиц должны происходить столкновения между частицами.

Более ста лет ни одна из упомянутых двух теорий света не могла одержать верх над другой. И только в начале 19-го века английский физик Т. Юнг поставил опыты, которые однозначно решили этот спор в пользу *волновой* теории света.

Правда, ещё через сто лет, в начале 20-го века, вопрос о физической природе света встал перед физиками снова. Но об этом мы расскажем в следующей главе.

В своих опытах Юнг установил, что для света наблюдается явление, которое объясняет волновая теория света, но которое нельзя объяснить в рамках корпускулярной теории. Это явление состоит в том, что в одних областях пространства волны *усиливают* друг друга, а в других — *ослабляют*.



Христиан Гюйгенс
1629–1695

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Наглядное представление о волнах можно получить, изучая волны на поверхности воды.



Поставим опыт

Сложение волн. На рисунке 22.1 показаны волны на поверхности воды, порожденные различными источниками. Мы видим, что происходит *сложение волн*: в одних местах волны взаимно *усиливают* друг друга, а в других, наоборот, *ослабляют*.



Рис. 22.1

Сложение волн называют *интерференцией*¹.

¹ От латинских слов «интер» — между и «ференс» — несущий, переносящий.

Устойчивая интерференционная картина, когда амплитуда колебаний в каждой точке пространства постоянна во времени, возникает только при сложении волн с одинаковой длиной волны и постоянной разностью фаз.

Такие волны называют когерентными¹.



Поставим опыт

На рисунке 22.2 показана в теневой проекции² устойчивая интерференционная картина когерентных волн, порождённых двумя точечными источниками (их положения обозначены красными точками).

Условия интерференционных максимумов и минимумов

Линии максимумов и минимумов. Обратите внимание: вдали от источников волн, на расстояниях, существенно превышающих расстояние между ними, интерференционные максимумы и минимумы располагаются почти вдоль прямых линий (см. рис. 22.2).

Чтобы понять, почему так происходит, рассмотрим случай, когда источники волн колеблются в одинаковой фазе.

Условие максимумов. Интерференционные максимумы наблюдаются в тех точках пространства, где максимум одной волны накладывается на максимум другой.

Для этого необходимо, чтобы в эти точки пространства волны приходили в одинаковой фазе (рис. 22.3).

¹ В переводе с латинского — «взаимосвязанными», «согласованными».

² Волны подсвечиваются и проектируются на экран.



Рис. 22.2

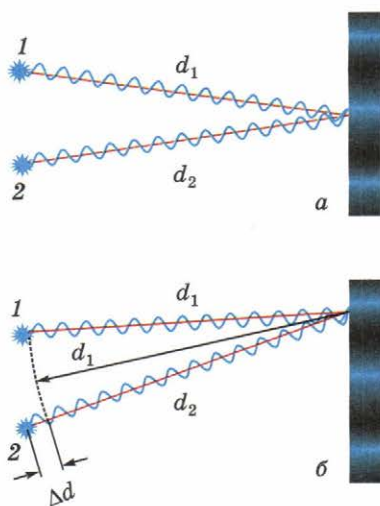


Рис. 22.3

Обозначим d_1 и d_2 расстояния, проходимые волнами до данной точки пространства (см. рис. 22.3). Разность $\Delta d = d_2 - d_1$ называют *разностью хода волн*.

? 1. Объясните, почему если точечные источники волн колеблются в одинаковой фазе, то в данную точку пространства волны придут в одинаковой фазе, если разность хода волн равна нулю, одной длине волны, двум длинам волн и т. д.

? 2. Чему равна разность хода волн на схематических рисунках 22.3, а и б?

В общем случае

интерференционные максимумы наблюдаются в точках пространства, в которых разность хода волн от точечных источников равна целому числу длин волн:

$$\Delta d = k\lambda, \quad (1)$$

где k — целое число.

Условие минимумов. Интерференционные минимумы будут наблюдаться в тех точках пространства, куда волны приходят *в противофазе* (рис. 22.4). Тогда максимум одной волны накладывается на минимум другой, в результате чего волны взаимно ослабляют друг друга (до полного погашения, если их амплитуды равны).

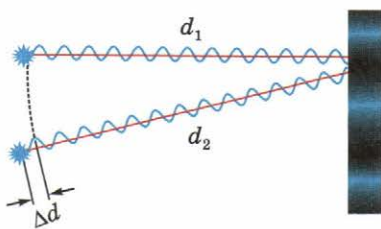


Рис. 22.4

? 3. Чему равна разность хода волн на схематическом рисунке 22.4?

В общем случае

интерференционные минимумы наблюдаются в точках пространства, в которых разность хода волн от источников равна нечётному числу полуволин:

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

где k — целое число.

Обратите внимание: первому интерференционному минимуму соответствует $k = 0$.

Чтобы понять происхождение линий максимумов и минимумов, рассмотрим результат сложения волн в точке C , удалённой от точечных источников волн A и B на расстояние, намного превышающее расстояние d между источниками (рис. 22.5).

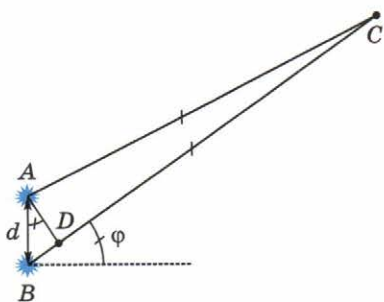


Рис. 22.5

Обозначим ϕ угол между направлением на точку C (практически одинаковым для обоих источников) и перпендикуляром к линии AB .

Возьмём на BC точку D , для которой $DC = AC$. Для волн, пришедших из точек A и B в точку C , разность хода волн

$$\Delta d = BD.$$

Поскольку точка C находится от точек A и B на расстоянии, большем по сравнению с d , угол при вершине C равнобедренного треугольника ACD очень мал. Следовательно, углы CAD и CDA при основании этого треугольника очень близки к прямым углам¹. Поэтому треугольник ADB с хорошей точностью можно считать прямоугольным с прямым углом D .

? 4. Объясните, почему

$$\Delta d = d \sin \phi. \quad (3)$$

Подсказка. Воспользуйтесь рисунком 22.5.

Вспомним теперь формулы (1) и (2), выражающие условия интерференционных максимумов и минимумов. Из этих формул и формулы (3) следует, что интерференционные максимумы будут наблюдаться под углами ϕ_k , удовлетворяющими уравнению

$$d \sin \phi_k = k\lambda, \quad (4)$$

где k — целое число.

Каждому из этих уравнений (с любым целым k) соответствует *прямая*. Это и есть те прямые, вдоль которых расположены интерференционные максимумы на рисунке 22.2.

Интерференционный максимум, соответствующий *нулевой* разности хода волн ($k = 0$), расположен на горизонтальной прямой. Его называют *центральной* максимумом (максимумом

¹ Напомним, что сумма углов треугольника равна 180° .

нулевого порядка). На рисунке 22.2 он отмечен голубой линией. Следующий максимум, соответствующий $k = 1$, называют *первым* интерференционным максимумом (*первого порядка*); соответствующий $k = 2$ — *вторым* (*второго порядка*) и т. д.

5. Объясните, почему, когда два точечных источника волн колеблются в одинаковой фазе, центральные интерференционные максимумы лежат на серединном перпендикуляре к отрезку, соединяющему эти источники.
6. Под каким углом φ_1 наблюдается интерференционный максимум первого порядка (см. рис. 22.2), если $\lambda = 2$ см, $d = 12$ см?
7. Напишите уравнение для углов, под которыми будут наблюдаться интерференционные *минимумы*.

3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Кольца Ньютона

Как ни странно, первый опыт, в котором наглядно проявилась *волновая* природа света, поставил И. Ньютон.



Поставим опыт

Положим плосковыпуклую линзу выпуклой стороной вниз на стекло и осветим её сверху (рис. 22.6, а).

Глядя на линзу сверху, мы отчётливо увидим цветные кольца (рис. 22.6, б).

Больше ста лет этот простой и красивый опыт с успехом повторяли многие учёные, но никто (начиная с самого Ньютона) не мог объяснить появления колец Ньютона (как назвали их учёные).

Разгадку колец Ньютона нашёл Т. Юнг в начале 19-го века. Он объяснил их как результат *интерференции* световых волн, отражённых от нижней поверхности линзы и лежащего под ней стекла (им соответствуют лучи 1 и 2 на рисунке 22.7).

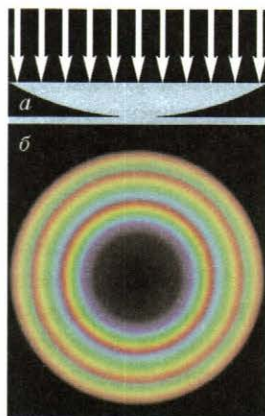


Рис. 22.6

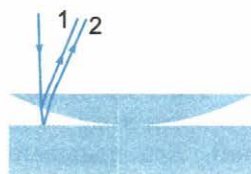


Рис. 22.7

Почему кольца Ньютона *цветные*? Как мы увидим далее, это объясняется тем, что разным цветам соответствуют различные длины волн света.

Обратите внимание: в этом опыте интерферируют волны, образовавшиеся в результате разделения света от *одного* источника на *две части*, которые отразились от разных поверхностей (см. рис. 22.7). Заслуга Юнга как раз и состоит в том, что он догадался: свет от *одного* источника можно *разделить* на две части, которые, интерферируя друг с другом, порождают устойчивую интерференционную картину.

Получить же два *отдельных* когерентных источника света довольно трудно. Дело в том, что атомы излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому их фазы не согласованы друг с другом. Из-за этого устойчивой интерференционной картины при сложении световых волн от *различных* источников получить не удаётся.

Просветление оптики

В сложных оптических приборах происходит многократное отражение света на границе воздуха и стекла. В результате уменьшается интенсивность света, проходящего сквозь прибор.

Чтобы уменьшить интенсивность отражённого света, поверхность стекла покрывают тонкой прозрачной плёнкой с показателем преломления меньшим, чем у стекла (рис. 22.8). Это называют *просветлением оптики*.

Толщину плёнки h и показатель её преломления n подбирают так, чтобы для волн, отражённых от верхней и нижней поверхностей плёнки, выполнялось условие интерференционного *минимума*¹. Тогда две отражённые волны будут взаимно *гасить* друг друга. А поскольку вследствие закона сохранения энергии суммарная интенсивность отражённого и прошедшего сквозь стекло света практически неизменна (поглощение света в плёнке очень мало), интенсивность прошедшего сквозь стекло света *увеличивается*.

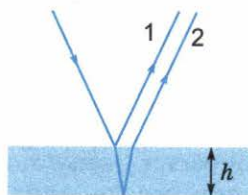


Рис. 22.8

? 8. Пусть на плёнку падает свет с длиной волны λ . Чему равна длина волны света в плёнке?

¹ При отражении света от поверхностей плёнки и стекла происходит изменение фазы волны на π . В данном случае это не влияет на *разность* хода волн, которая определяется только толщиной плёнки и показателем её преломления.

Подсказка. При переходе волны из одной в среды в другую остаётся неизменной *частота* волны.

- ?** 9. Объясните, почему условие интерференционного минимума для волн, отражённых от верхней и нижней поверхностей плёнок, имеет вид

$$h = \frac{\lambda}{4n}(2k + 1). \quad (5)$$

Естественный свет состоит из световых волн разной длины, поэтому нельзя погасить *все* отражённые волны *одной* плёнкой. Её толщину подбирают так, чтобы полное гашение имело место для средней части солнечного спектра (зелёный цвет).

- ?** 10. Чему равна наименьшая толщина просветляющей плёнки, с помощью которой можно было бы полностью погасить отражение зелёного света с длиной волны 0,55 мкм, если показатель преломления плёнки 1,3?

Цвета тонких плёнок

Почему мыльный пузырь, состоящий из *бесцветной* воды и *бесцветного* раствора мыла, играет всеми *цветами* радуги (рис. 22.9)?

Подобное появление яркой цветной окраски можно наблюдать, если пролить масло или бензин на воду (рис. 22.10). Яркие цвета тонких плёнок объясняются *интерференцией света*, отражённого от двух поверхностей тонкой плёнки — верхней и нижней.

Ход лучей света при этом такой же, как в случае просветления оптики (см. рис. 22.8). Отличие состоит в том, что толщина мыльной плёнки или плёнки бензина на воде *не постоянна*.

А так как условие интерференционных максимумов и минимумов для разных длин волн соответствуют разным значениям толщины плёнки и угла наблюдения, на плёнке переменной толщины возникает игра цвета, поскольку разным длинам волн соответствуют разные цвета.



Рис. 22.9

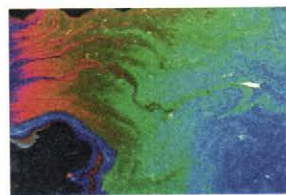


Рис. 22.10



Интерференция волн

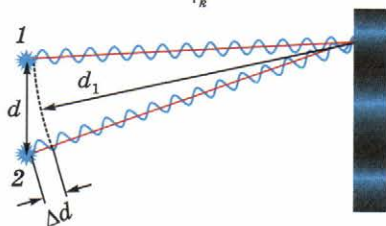
Интерференция волн
на поверхности воды



Условие максимумов

$$\Delta d = k\lambda$$

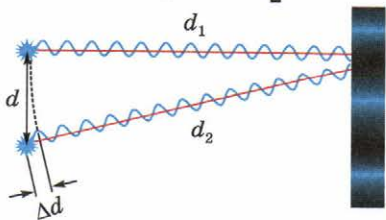
$$d \sin \varphi_k = k\lambda$$



Условие минимумов

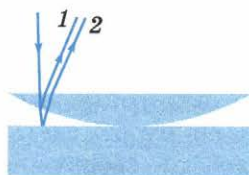
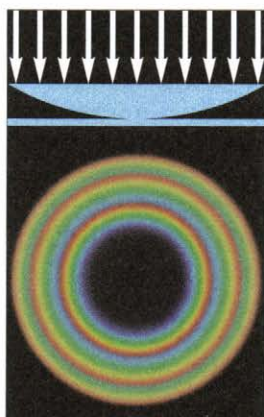
$$\Delta d = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$$

$$d \sin \varphi_k = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$$

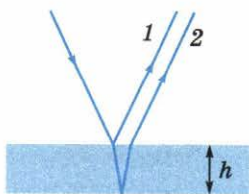


Интерференция
световых волн

Кольца Ньютона



Просветление
оптики





ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

11. На рисунке 22.2 изображена интерференционная картина когерентных волн, созданных двумя точечными источниками, колеблющимися в одинаковой фазе.
- Сколько линий интерференционных максимумов с различными значениями k наблюдается в этом опыте?
 - Во сколько раз расстояние между источниками волн больше длины волны?
 - Под какими углами наблюдаются интерференционные максимумы второго и третьего порядков?

12. **Зеркало Ллойда.** Интерференцию света наблюдают с помощью зеркала, используя один точечный источник света.



а) Объясните схему опыта, используя рисунок 22.11.



Рис. 22.11

б) Чему равно расстояние s на экране между соседними максимумами, если длина волны света $\lambda = 0,5$ мкм, $L = 20$ м, $h = 5$ мм?

13. **Полосы равной толщины.** Между квадратными стеклянными пластинками зажат волос (рис. 22.12). Если направить на верхнюю пластинку перпендикулярный ей пучок света, то при наблюдении сверху видны параллельные волосу полосы. На рисунке 22.13 показаны эти полосы при освещении светом, пропущенным через зелёный светофильтр.



Рис. 22.12

а) Объясните причину возникновения интерференционных полос, используя рисунок 22.14.

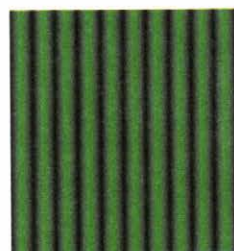


Рис. 22.13

б) Один из максимумов наблюдается в точке A , а соседний — в точке B (рис. 22.15). Объясните, почему $CB_1 = \frac{\lambda}{2}$, где λ — длина волны света.

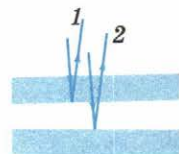


Рис. 22.14

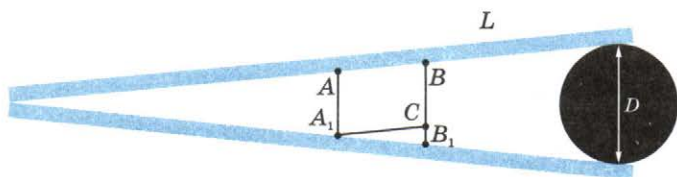


Рис. 22.15

в) Объясните, почему справедливо следующее соотношение (D — диаметр волоса, L — сторона стеклянной пластины):

$$\frac{\lambda}{2 \cdot AB} = \frac{D}{L}.$$

Подсказка. Воспользуйтесь подобием треугольника A_1CB_1 и треугольника, образованного сторонами стеклянных пластин и диаметром волоса.

г) Приняв, что рисунок 22.13 дан с *тройным* увеличением, найдите толщину волоса. Длину волны зелёного цвета примите равной $0,55$ мкм. Сторона стеклянной пластинки 20 см.

д) Чему будет равно расстояние между светлыми полосами, если использовать красный светофильтр, пропускающий свет с длиной волны $0,7$ мкм?

14. Мыльная плёнка натянута на вертикальную квадратную рамку, две стороны которой горизонтальны. Под действием силы тяжести плёнка приняла форму клина. При освещении горизонтальным пучком света с длиной волны $0,66$ мкм наблюдается интерференционная картина, состоящая из 10 полос. Насколько толщина плёнки внизу больше, чем сверху? Показатель преломления плёнки примите равным показателю преломления воды.

§ 23. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

1. ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

В предыдущем параграфе мы познакомились с явлением интерференции, которое имеет место только для волн. Наблюдение интерференции света явилось, как мы знаем, одним из подтверждений волновой природы света.

В этом параграфе мы познакомимся с другим явлением, подтверждающим волновую природу света, — *дифракцией*¹.

Дифракцией называют отклонение волн от прямолинейного распространения, в том числе — огибание волнами препятствий.

Например, дифракция звуковых волн проявляется в том, что мы можем слышать звук, издаваемый источником звука, даже тогда, когда этот источник для нас невидим. Это может быть, скажем, голос человека в соседней комнате или звук транспорта на улице.



Поставим опыт

Очень наглядно видна дифракция волн на поверхности воды. На рисунке 23.1 показаны в теневой проекции волны, прошедшие слева направо через узкое отверстие в перегородке.

В этом опыте мы можем наблюдать не только явное отклонение волн от прямолинейного распространения, но и ещё один замечательный факт.

Обратите внимание: если размер отверстия сравним с длиной волны, то прошедшие сквозь него волны распространяются так, как будто это отверстие является *точечным источником волн*.

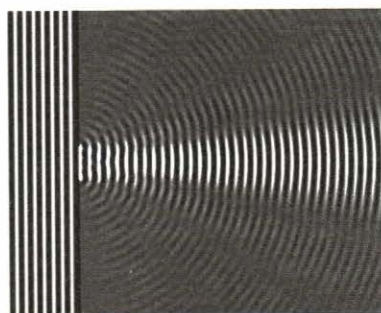


Рис. 23.1

Этот факт чрезвычайно важен для понимания волновых процессов: он является основой волновой теории. Далее мы рассмотрим это подробнее.

¹ От латинского «дифрактус» — разломанный.

2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракцию света впервые описал итальянский учёный Ф. Гримальди в середине 17-го века. Он помещал различные предметы в пучок солнечного света, прошедший через крошечное отверстие в оконной ставне, и наблюдал тени этих предметов на экране.

Учёный предполагал, что тени должны быть очень чёткими, потому что используемый им источник света (отверстие в ставне) очень мал. Однако вместо чёткой границы света и тени, предсказываемой геометрической оптикой, на границах теней наблюдались чередующиеся тёмные и светлые полосы (на рисунке 23.2 изображена чёрно-белая фотография тени от волоса).

Именно Гримальди и ввёл в науку слово *дифракция*, назвав так наблюдаемое им новое явление. Он предположил, что дифракция света указывает на его *волновую природу*.

Используя современные приборы, дифракцию света можно продемонстрировать очень эффектно. Например, на рисунке 23.3 показана дифракция лазерного луча, прошедшего через очень узкое отверстие (0,2 мм).

Теорию дифракции построил французский учёный О. Френель в начале 19-го века, развив волновую теорию Гюйгенса.

3. ОПЫТ ЮНГА

Самый знаменитый опыт, в котором ярко (во всех смыслах) проявилась волновая природа света, поставил уже знакомый нам Т. Юнг. В опыте Юнга имеют место и *дифракция*, и *интерференция* света.



Рис. 23.2

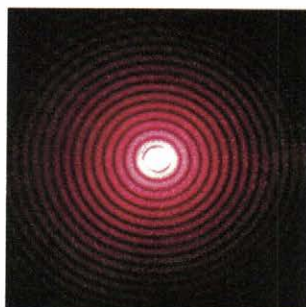


Рис. 23.3



Томас Юнг
1773–1829



Схема опыта Юнга показана на рисунке 23.4, *а*. Пучок белого света проходит сначала через *одну* узкую щель, а затем — через *две* близко расположенные щели. Если бы свет всегда «подчинялся» только законам геометрической оптики, мы наблюдали бы на экране две белые полосы. Однако в действительности на экране видна *одна* белая полоса, по обе стороны которой расположены чередующиеся *цветные* полосы (рис. 23.4, *б*).

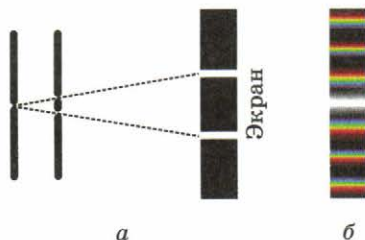


Рис. 23.4

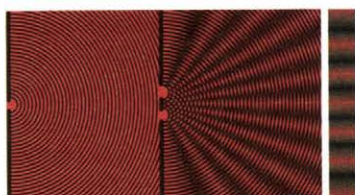


Рис. 23.5

Объяснение этому опыту в рамках волновой теории света даёт схематический рисунок 23.5 для световых волн, соответствующих красному цвету.

- Две щели вследствие *дифракции* играют роль точечных источников света, испускающих *когерентные* волны.
- При сложении этих волн возникает *интерференционная картина* с линиями максимумов и минимумов, очень похожая на интерференционную картину при сложении волн на поверхности воды (см. рис. 22.2).
- В точках экрана, находящихся на линиях максимумов, наблюдаются светлые полосы, а в точках экрана, находящихся на линиях минимумов, — тёмные.

Выясним теперь: почему в опыте Юнга на экране появляются *цветные* полосы, хотя опыт проводится с *белым* светом?

Дело в том, что разным *цветам* соответствуют разные *длины волн* света. Поэтому единственным *общим* интерференционным максимумом для волн *различной* длины является только *центральный* максимум (нулевого порядка). А поскольку белый свет состоит из всех цветов радуги, мы видим на экране белую полосу в общем центральном интерференционном максимуме.

? 1. Почему положение центрального максимума в опыте Юнга одно и то же для волн с различной длиной волны?

В центральном максимуме волны «различных цветов» складываются вместе, в результате чего появляется белая полоса.

Условия интерференционных максимумов всех других порядков, кроме нулевого, зависят от длины волны. Например, там, где расположены максимумы для волн, соответствующих красному цвету, появляются красные полосы.

Может возникнуть вопрос: для чего в опыте Юнга нужна первая щель? Почему нельзя наблюдать интерференцию, сразу пропуская свет через две близко расположенные щели?

Проницаемость Юнга как раз и состояла в том, что он догадался: первая щель должна сыграть роль точечного источника света, свет от которого *делится* двумя щелями на две когерентные волны. Вот почему в опыте Юнга удаётся наблюдать устойчивую интерференционную картину.

Результаты опыта Юнга показались его современникам весьма странными: ведь и правда трудно поверить в то, что тёмные полосы на экране возникают вследствие того, что свет, прошедший через одну из двух рядом расположенных щелей, *гасит* свет, прошедший через другую щель!

Однако дальнейшее развитие волновой теории света и подтверждение её многими опытами преодолели все сомнения учёных. Волновая теория света одержала победу над корпускулярной теорией.

Однако, как мы увидим в следующей главе, эта победа оказалась не окончательной.

Измерение длин волн света

Сходство явлений, наблюдаемых в опыте Юнга и в опыте с волнами от двух точечных источников, позволяет использовать те же соображения, чтобы рассчитать соотношение между длиной волны света λ , расстоянием d между двумя щелями и углом φ_k , под которым будет наблюдаться интерференционный максимум порядка k (рис. 23.6).

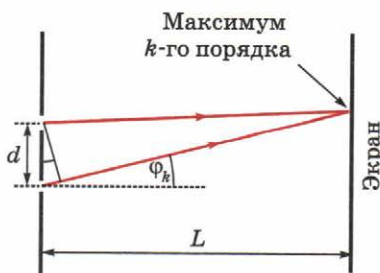


Рис. 23.6

- ?** 2. Объясните, почему интерференционные максимумы будут наблюдаться под углами φ_k , для которых

$$d \sin \varphi_k = k\lambda. \quad (1)$$

Подсказка. Воспользуйтесь рисунком 23.6 и учтите, что расстояние до экрана намного больше расстояния между щелями.

В своем опыте Юнг первым измерил длины волн видимого света. Оказалось, что *наименьшая длина волны соответствует фиолетовому цвету, а наибольшая — красному.*

- ?** 3. Под какими углами наблюдаются в опыте Юнга интерференционные максимумы первого порядка для волн, соответствующих границам видимого диапазона световых волн — фиолетовому и красному цветам, если $\lambda_{\text{ф}} = 0,38$ мкм и $\lambda_{\text{к}} = 0,76$ мкм? Расстояние между щелями равно 1 мм.

Мы видим, что если $d \gg \lambda$, то углы, под которыми наблюдаются интерференционные максимумы с небольшими значениями k , очень малы. Чтобы измерить их с достаточной точностью, надо взять большое расстояние до экрана.

При этом расчёты значительно упрощаются благодаря тому, что синусы и тангенсы малых углов с хорошей точностью равны значениям самих углов в радианной мере.

- ?** 4. Объясните, почему расстояние s на удалённом экране между соседними интерференционными полосами, соответствующими свету с длиной волны λ , выражается простой формулой

$$s = L \frac{\lambda}{d}, \quad (2)$$

где L — расстояние до экрана.

Подсказка. Воспользуйтесь тем, что формулу (1) для малых углов можно записать в виде $d \cdot \varphi_k = k\lambda$, и тем, что $s_k = L\varphi_k$.

Формула (2) объясняет, почему при наблюдении интерференционных полос на удалённом экране удаётся измерить длину волны света, которая во много раз меньше размеров тел, видимых невооружённым глазом.

Перепишем эту формулу в виде

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{L}{s}. \quad (3)$$

Мы видим теперь, что расстояние d между щелями во столько же раз больше длины волны λ , во сколько раз расстояние L до экрана больше расстояния s между соседними интерференционными полосами.

- ?** 5. Чему равна длина волны света, если расстояние между соседними соответствующими этому цвету интерференционными полосами на экране равно 2,6 мм? Расстояние от двух щелей до экрана 20 м, расстояние между щелями 0,5 см.

4. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

Опыт можно усовершенствовать, а полученные с его помощью результаты значительно уточнить, если заменить две щели большим числом параллельных щелей, расположенных на равных расстояниях друг от друга. Для этого используют дифракционные решётки.

Их изготавливают с помощью машины, наносящей на стеклянную пластинку параллельные штрихи на малых расстояниях друг от друга.

Периодом d дифракционной решётки называют суммарную ширину щели и непрозрачного промежутка.

Для получения более чётких интерференционных максимумов параллельно решётке помещают собирающую линзу. Экран располагают в фокальной плоскости линзы. Это позволяет значительно уменьшить расстояние до экрана.

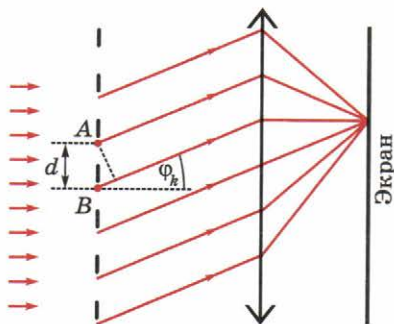


Рис. 23.7

- ?** 6. Используя рисунок 23.7, объясните принцип действия дифракционной решётки для световых волн, соответствующих определённой длине волны.
- ?** 7. Объясните, почему интерференционные максимумы наблюдаются под углами φ_k , для которых

$$d \sin \varphi_k = k\lambda. \quad (4)$$

- ?** 8. Выведите соотношение для углов, под которыми наблюдаются интерференционные минимумы.

- ?** 9. На дифракционную решётку с периодом 1 мкм падает пучок света с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$ (оранжевый цвет). Фокусное расстояние помещённой за решёткой линзы 10 см .
- а) Под каким углом наблюдается первый интерференционный максимум?
- б) Чему равно расстояние между центральной белой полосой и ближайшей к ней оранжевой полосой на экране?
- ?** 10. Каков наибольший порядок интерференционного максимума который можно получить с помощью дифракционной решётки с периодом 2 мкм , если длина волны света равна $0,55 \text{ мкм}$?

Подсказка. Воспользуйтесь формулой (4) и тем, что значение синуса не может превосходить 1.

- ?** 11. Почему для изучения видимого света используют дифракционные решётки с числом штрихов на 1 мм , не превышающим 1200 ?

- ?** 12. На рисунке 23.8 изображена часть интерференционной картины, полученной на экране в результате дифракции белого света на дифракционной решётке.



Рис. 23.8

- а) Объясните, что означает белая полоса в левой части рисунка.
- б) Интерференционные максимумы каких порядков видны на рисунке?
- в) Какой вывод о соотношении длин волн для света, соответствующего разным цветам радуги, можно сделать, используя эти данные?

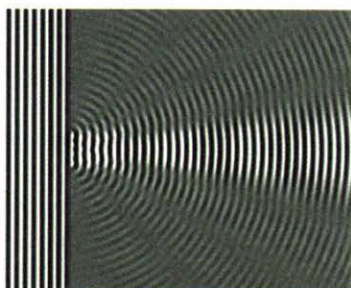
Разрешающая способность оптических приборов

Явление дифракции накладывает ограничения на возможность получения чётких изображений очень малых предметов с помощью оптического микроскопа. Дело в том, что дифракция становится очень заметной, когда размеры предмета сравнимы с длиной волны света. А поскольку длины волн видимого света — десятые доли микрона, изображения предметов размером около одного или нескольких микрон будут размытыми при наблюдении даже в самый лучший оптический микроскоп.



Дифракция волн

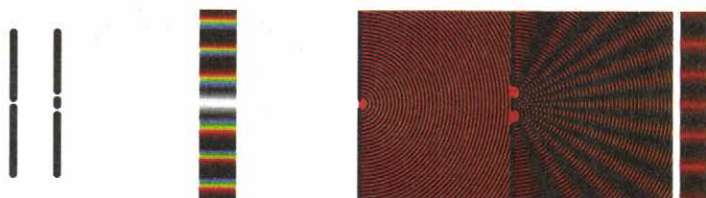
Дифракция волн
на поверхности воды



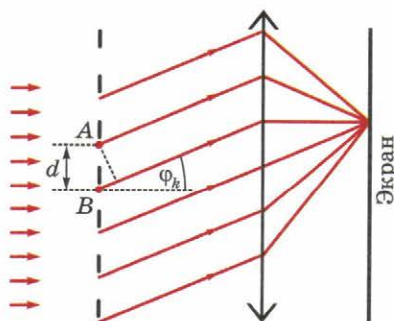
Дифракция
световых волн



Опыт Юнга



Дифракционная решётка



Условие максимумов

$$d \sin \varphi_k = k \lambda$$

Условие минимумов

$$d \sin \varphi_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

13. В опыте Юнга используют свет, длина волны которого равна $0,55 \text{ мкм}$. Чему равно расстояние на экране между полосами, соответствующими второму и третьему интерференционным максимумам, если расстояние между щелями равно $0,5 \text{ мм}$, а расстояние от двух щелей до экрана равно 10 м ?
14. Объясните, почему дифракционную решётку называют *дифракционной*.
15. Параллельный пучок белого света падает на дифракционную решётку перпендикулярно её поверхности. С помощью расположенной вблизи решётки собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 50 \text{ см}$ на экране получают чёткое изображение спектра. Число штрихов в решётке составляет 100 на 1 мм .
- а) Чему равно расстояние на экране от центрального интерференционного максимума до интерференционного максимума первого порядка для света, соответствующего фиолетовому цвету?
- б) Чему равна ширина всего спектра первого порядка — от фиолетового до красного цвета?
16. Дифракционная решётка с числом штрихов 1000 на 1 мм находится в аквариуме (рис. 23.9). На неё направляют из воздуха луч лазера с длиной световой волны $0,5 \text{ мкм}$. На рисунке изображён схематически ход луча, соответствующего первому интерференционному максимуму.
- а) Чему равна длина световой волны в воде?
- б) Чему равен угол α ?
- в) Чему равен угол β ?



Рис. 23.9

§ 24. ЦВЕТ

1. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Разложение белого света в цветной спектр

Первый шаг к разгадке цвета сделал Исаак Ньютон, будучи юным выпускником Кембриджского университета. Повторим знаменитый опыт Ньютона по разложению белого света.



Поставим опыт

Направим в темноте узкий пучок солнечного света на боковую грань треугольной стеклянной призмы.

В результате преломления света в призме на белом экране можно получить красивую цветную полосу, где можно различить все цвета радуги: *красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый*¹ (рис. 24.1, а). Эту цветную полосу (рис. 24.2) Ньютон назвал *спектром*².

Если же пропускать сквозь призму узкий пучок света определённого цвета (например, от лазерной указки), то после прохождения через призму он не изменит ни форму, ни цвет (рис. 24.1, б).

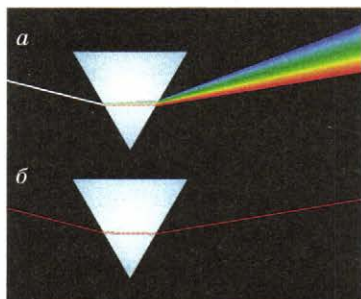


Рис. 24.1



Рис. 24.2

Из своего опыта Ньютон заключил, что

белый свет является составным, то есть является смесью всех цветов радуги.

Когда пучок белого света проходит через стеклянную призму, составляющие его лучи разных цветов преломляются *по-разному*: сильнее всего преломляются фиолетовые лучи, а слабее всего — красные.

В результате и получается цветной спектр.

¹ В предложении «Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан» первые буквы слов совпадают с первыми буквами названий цветов в радуге.

² От латинского «спектрум» — видимое.

Дисперсия света

Каждому цвету радуги соответствует определённая длина волны. Наибольшая длина волны соответствует красному цвету (0,76 мкм), а наименьшая — фиолетовому (0,38 мкм). То, что лучи разных цветов преломляются в стекле по-разному, означает, что *показатель преломления вещества зависит от длины световой волны*.

Зависимость показателя преломления света от длины волны называют дисперсией¹ света.

У воды и стекла показатель преломления для фиолетового света больше, чем для красного, — поэтому фиолетовые лучи и отклоняются призмой сильнее, чем красные.

? 1. Сравните отклонение световых лучей разного цвета при прохождении сквозь стеклянную призму с отклонением света в результате дифракции. Что у них общего и чем они различаются?

Далее мы увидим, что *показатель преломления вещества тем больше, чем меньше скорость света в этом веществе*. То, что для «фиолетовых лучей» показатель преломления в стекле больше, чем для «красных», говорит о том, что скорость волн, соответствующих фиолетовому цвету, меньше, чем волн, соответствующих красному цвету.

Спектроскоп

Спектр излучаемого источником света может многое рассказать об этом источнике. Например, по спектру излучения можно определить температуру тела: не очень сильно нагретый металл излучает красный свет, а сильно нагретый раскаляется «добела», потому что в излучаемом им свете есть не только «красные», но и «голубые» лучи.

Спектр света изучают с помощью *спектроскопа* (рис. 24.3).



Рис. 24.3

¹ В переводе с латинского «дисперсия» означает «рассеяние».

В основе действия спектроскопа лежит разложение света в спектр с помощью треугольной стеклянной призмы или дифракционной решётки.

Благодаря изучению спектров удалось определить состав и температуру далеких звёзд. Об этом мы расскажем далее.

2. ОКРАСКА ПРЕДМЕТОВ

Почему при освещении предметов белым светом мы видим их окрашенными в разные цвета?

Дело в том, что разные предметы по-разному отражают и поглощают лучи разных цветов.

Например, красная роза отражает «красные» лучи, входящие в состав белого света, а почти все другие лучи поглощает (схема на рис. 24.4, а).

Зелёные же листья отражают в основном «зелёные» лучи (рис. 24.4, б).

Как глаз различает цвета?

На сетчатке глаза расположены светочувствительные элементы, называемые «колбочками». Есть три типа колбочек: их можно условно назвать «красными», «зелёными» и «синими», потому что «красные» колбочки наиболее чувствительны к красному цвету, «зелёные» — к зелёному, а «синие» — к синему.

Когда в глаз попадает свет красного цвета, то в мозг посылают сигналы в основном «красные» колбочки. Обработав эти сигналы, мозг и «сообщает» нам, что видимый свет — красный. Аналогично происходит с зелёным или синим светом.

А когда же мы видим *белый* цвет? Тогда, когда от всех трёх видов колбочек в мозг идут сигналы примерно одинаковой интенсивности. Такую смесь цветов мы и воспринимаем как белый цвет.

Таким образом, всё многообразие видимых нами цветов обусловлено соотношением между интенсивностью сигналов, посылаемых в мозг тремя типами колбочек.

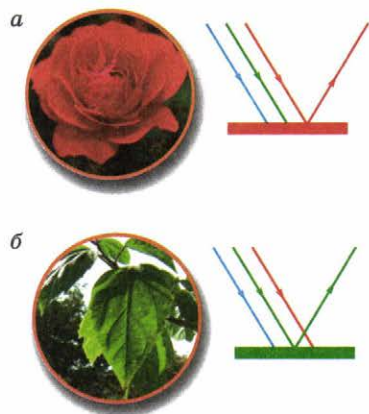


Рис. 24.4

Сколько цветов на экране телевизора или компьютера?

Свойство глаза «раскладывать» все цвета на красный, зелёный и синий использовали при создании цветных телевизоров и мониторов (дисплеев) компьютеров.



Поставим опыт

Нанесите осторожно на экран цветного телевизора каплю воды: она будет служить маленькой, но довольно сильной линзой.

Сквозь каплю можно увидеть, что любое цветное изображение на экране состоит из светящихся *красных*, *зелёных* и *синих* точек — то есть точек, имеющих как раз те цвета, к которым наиболее чувствительны колбочки сетчатки глаза.

Сложение цветов на экране телевизора схематически показано на рисунке 24.5.

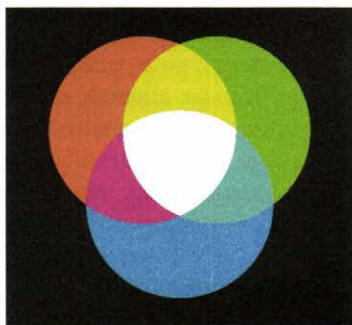


Рис. 24.5

3. ИНФРАКРАСНОЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Инфракрасное излучение

В 1800 году английский астроном У. Гершель, помещая чувствительный термометр в разные части спектра, заметил, что при приближении к *красному* концу спектра показания термометра *повышаются*.

Тогда учёный решил поместить термометр *за красной границей спектра* — и показания термометра увеличились еще больше! Хотя за красной границей спектра глаз не видел света, прибор явно указывал на наличие излучения.

Так было открыто *инфракрасное*¹ *излучение*, то есть электромагнитное излучение с длинами волн меньшими, чем у видимого света: от 0,8 мкм до 1—2 мм.



2. Во сколько раз длина волны инфракрасного излучения, равная 1 мм, больше длины световой волны видимого света с наибольшей длиной волны?

¹ От латинского «инфра», что означает «ниже», «под».

Инфракрасные волны излучаются нагретыми телами, поэтому инфракрасное излучение называют иногда *тепловым*. На него приходится около половины энергии солнечного излучения.

Человек не видит инфракрасного излучения, но ощущает «тепловые лучи» кожей и всем организмом — Солнце греет нас именно инфракрасными лучами.

Инфракрасное излучение используется при аэрофотосъёмке, а также в бытовой технике, например в широко распространённых пультах дистанционного управления (рис. 24.6).



Рис. 24.6



Поставим опыт

Увидеть выходящее из дистанционного пульта инфракрасное излучение можно, глядя на него с помощью цифрового фотоаппарата или видеокамеры.

Ультрафиолетовое излучение

Вскоре после открытия Гершелем инфракрасного излучения немецкий учёный И. Риттер решил исследовать химическое действие различных участков спектра. Для этого учёный использовал хлористое серебро, которое под действием света чернеет.

Выяснилось, что почернение серебра увеличивается при приближении к *фиолетовому* концу спектра. Тогда Риттер решил выйти за *фиолетовую* границу видимого спектра — и почернение серебра оказалось тут ещё большим, чем в видимой части спектра!

Так было открыто *ультрафиолетовое*¹ излучение, то есть электромагнитное излучение, у которого длины волн меньше, чем у видимого света: от 100 нм до 400 нм.



3. Во сколько раз нижняя граница длин волн ультрафиолетового излучения меньше длины световой волны видимого света с наименьшей длиной волны?

¹ От латинского «ультра», что означает «сверх».

Ультрафиолетовое излучение разрушает сложные биологические молекулы и поэтому в больших дозах губительно действует на всё живое. К счастью, оно сильно поглощается атмосферой.

В небольших дозах ультрафиолетовое излучение не только полезно, но даже необходимо. Например, витамин D, необходимый для нормального роста костей, вырабатывается в организме только под воздействием ультрафиолетовых лучей. Поэтому детям так важно бывать в солнечную погоду на улице: сквозь оконные стёкла ультрафиолетовые лучи практически не проходят.

Почему мы видим такой узкий участок спектра?

Диапазон волн *видимого* света составляет лишь крошечную часть диапазона волн, приходящихся на все виды электромагнитного излучения (см. «Шкалу электромагнитных волн», § 15).

? 4. Во сколько раз длина волны света, соответствующего красному цвету, меньше длины радиоволны частотой 100 МГц?

? 5. Во сколько раз длина волны света, соответствующего фиолетовому цвету, меньше длины волны рентгеновского излучения частотой 10^{18} Гц?

Почему же природа «оставила» нам такое «узкое окошко» для видения?

Во-первых, именно на видимую часть спектра приходится максимум солнечного излучения.

Во-вторых, на эту же часть спектра приходится максимум прозрачности земной атмосферы.

И наконец, если бы природа «подарила» нам более широкий диапазон видимого света, мы видели бы предметы *нечёткими*. Дело в том, что вследствие дисперсии изображение на сетчатке, даваемое оптической системой глаза, будет чётким только для сравнительно узкого диапазона световых волн.

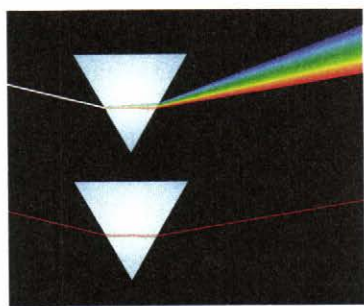
Так что можно подивиться мудрости природы: в процессе эволюции она заботливо «подобрала» нам такое «окошко», через которое мы можем чётко увидеть как можно *больше*.

А то, чего не видно невооружённым глазом, мы научились видеть с помощью специальных приборов. Например, благодаря инфракрасной съёмке удалось увидеть ядро нашей Галактики, скрытое облаками межзвёздной пыли.



Цвет

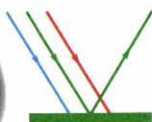
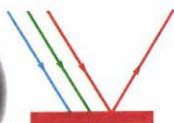
Дисперсия



Спектр



Окраска предметов
в отражённом свете



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

6. Чем определяется видимый глазом цвет: длиной световой волны или её частотой?
7. Каким будет казаться цвет травы, если смотреть на неё через красный светофильтр?
8. У вас есть красный и зелёный фломастеры. Каким из них надо написать на белом листе бумаги слово «Можно», а каким цветом — слово «Нельзя», чтобы при рассмотрении этого листа через зелёный светофильтр было видно первое слово, а через красный — второе?
9. Почему в ясный солнечный день тени на снегу голубоватые?
10. Жёлтый цвет на экране телевизора или компьютера получается в результате смешения красного и зелёного цветов. Почему глаз не отличает эту смесь цветов от жёлтого цвета в солнечном спектре?

§ 25. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВОЛНОВОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКОЙ

1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Как вы уже знаете, свет представляет собой электромагнитные волны. Напомним, что в электромагнитной волне вектор напряжённости переменного электрического поля и вектор магнитной индукции переменного магнитного поля направлены перпендикулярно направлению распространения волны (§ 15).

Поэтому свет считают поперечной волной.

Свет, излучаемый нагретыми телами, в том числе Солнцем, называют естественным. Он состоит из электромагнитных волн со всеми направлениями вектора напряжённости электрического поля, перпендикулярными направлению распространения волн. Такой свет называют неполяризованным.

Свет, состоящий из волн с определённым направлением вектора напряжённости электрического поля, называют поляризованным. За направление поляризации принимают направление вектора напряжённости электрического поля волны.

? 1. На рисунках 25.1, а, б схематически изображены две световые волны, распространяющиеся вдоль оси x . На каком рисунке изображена волна, поляризованная вдоль оси z ?

Вещества или устройства, предназначенные для получения поляризованного света, называют поляризаторами. В школьных опытах часто используют *поляроид* — плёнку, пропускающую световые волны с определённым направлением вектора напряжённости электрического поля.

Естественный свет становится частично или полностью поляризованным также после *отражения*: например, свет поляризуется при отражении от воды или стекла.

Источниками поляризованного света являются жидкокристаллические экраны телевизоров и мониторы компьютеров.

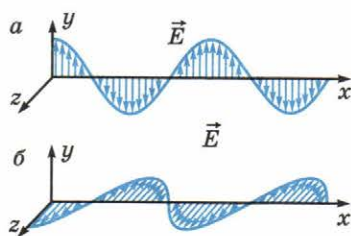


Рис. 25.1

Естественные поляризаторы — кристаллы *турмалина* (прозрачный зеленоватый минерал).



Поставим опыт

Если расположить один за другим две турмалиновые пластинки так, чтобы они поляризовали свет в одном направлении, и посмотреть сквозь них на естественный неполяризованный свет, они будут казаться почти полностью прозрачными (рис. 25.2, *а*).

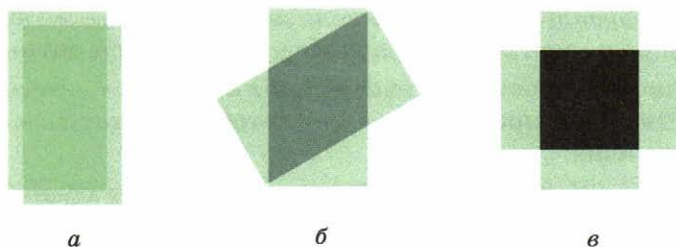


Рис. 25.2

Но если начать поворачивать одну пластинку относительно другой, то через обе пластинки будет проходить всё меньше света (рис. 25.2, *б*). Когда пластинки повернуты друг относительно друга на 90° , свет через них почти не проходит (рис. 25.2, *в*).



2. Объясните этот опыт.

Применения поляризации

Поляроидами покрывают хорошие солнцезащитные очки и ветровые стёкла автомобилей. Благодаря этому гасятся яркие блики поляризованного света, образовавшегося в результате отражения солнечного света от поверхности воды или мокрого асфальта, а также свет фар встречных автомобилей (стёкла фар также иногда покрывают поляроидами).



3. Как должны быть ориентированы направления поляризации поляроидов, которыми покрывают фары автомобилей и ветровые стёкла, чтобы фары не слепили глаза: одинаково или под углом 90° друг к другу?



4. Объясните, почему при фотографировании картин, защищённых стеклом, используют поляроидные фильтры.

Поляризацию используют также для исследования напряжений, возникающих в твёрдых телах под нагрузкой.

На явлении поляризации также основан принцип действия жидкокристаллических дисплеев, которые находят сегодня чрезвычайно широкое применение.

2. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВОЛНОВОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКОЙ

Основное понятие волновой теории — *фронт волны* или *волновой фронт*. Он играет в волновой теории света такую же важную роль, как световой луч в геометрической оптике.

Волновой фронт в данный момент времени — это совокупность точек пространства, до которых в этот момент дошла волна.

На рис. 25.3, а изображён волновой фронт волны, испущенной точечным источником волн.

? 5. Объясните, почему такие волны называют *сферическими*.

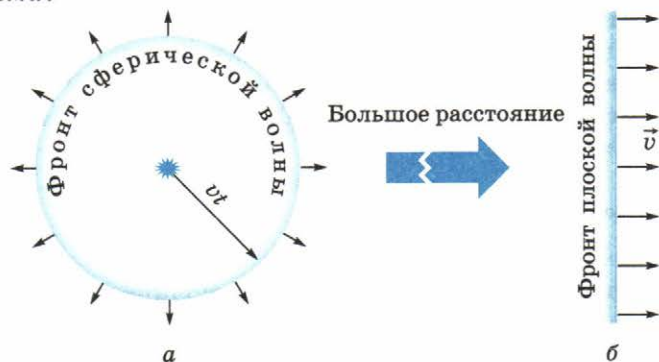


Рис. 25.3

Участок фронта сферической волны можно приближённо считать плоским, если размеры этого участка малы по сравнению с расстоянием до точечного источника (рис. 25.3, б). Волну, фронт которой можно приближённо считать плоскостью, называют *плоской волной*.

Мы видим, что для сферических и плоских волн в каждой точке пространства фронт волны перпендикулярен направлению распространения волны в этой точке. Согласно волновой теории это утверждение справедливо и для других волн.

Принцип Гюйгенса — Френеля

Создатель волновой теории света голландский учёный Х. Гюйгенс предположил, что

каждая точка фронта световой волны является источником вторичных сферических волн (рис. 25.4).

Это положение называют *принципом Гюйгенса*.

Французский учёный О. Френель дополнил принцип Гюйгенса положением о том, что

вторичные волны интерферируют друг с другом (принцип Гюйгенса — Френеля).

Рисунок 25.4 схематически объясняет, как, зная положение волнового фронта в некоторый момент времени t , можно с помощью принципа Гюйгенса — Френеля найти положение волнового фронта через небольшой промежуток времени Δt . Для этого надо построить *огibaющую* поверхность, *касающуюся* фронтов сферических «вторичных» волн в момент времени $t + \Delta t$.



Огюстен Френель
1788–1827

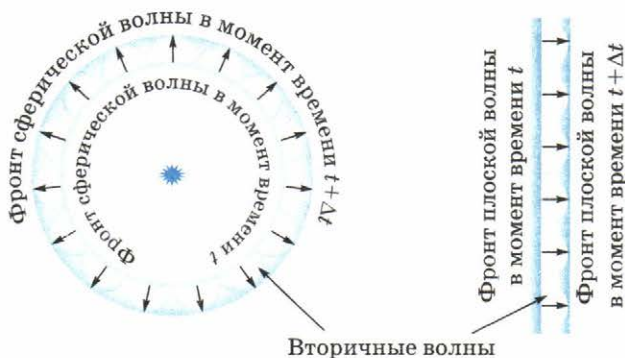


Рис. 25.4

Используя принцип Гюйгенса — Френеля, можно объяснить все наблюдаемые опыты, в которых проявляется волновая природа света. Этот принцип объясняет также все законы *геометрической оптики*: закон прямолинейного распространения света, а также законы отражения и преломления света.

Объяснение законов отражения и преломления света с помощью волновой теории

Когда плоская волна падает на границу раздела двух сред, каждая точка границы становится источником вторичных сферических волн. Они распространяются в обе стороны от границы раздела (рис. 25.5).

Огибающая вторичных волн, возвращающихся в первую среду, представляет собой фронт отражённой волны.

Используя геометрические построения (см. задание 13), можно доказать, что *угол отражения равен углу падения*.

Огибающая же вторичных волн, идущих во вторую среду, представляет собой фронт преломлённой волны.

Обозначим скорость света в первой среде v_1 , а во второй — v_2 . Используя геометрические построения (см. задание 14), можно доказать, что *углы падения и преломления при переходе света из первой среды во вторую связаны со скоростями света в этих средах соотношением*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1)$$

- ?** 6. Используя формулу (1) и закон преломления света, объясните, почему

$$n = \frac{v_1}{v_2}, \quad (2)$$

где n — *относительный* показатель преломления света при переходе из первой среды во вторую.

- ?** 7. Объясните, почему из формулы (2) следует, что

показатель преломления среды n равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в этой среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3)$$

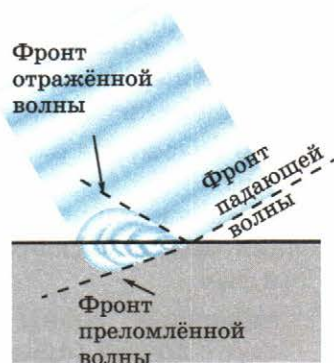


Рис. 25.5

Формула (3) раскрывает физический смысл показателя преломления.

? 8. Где скорость света больше — в воде или в воздухе? Во сколько раз больше?

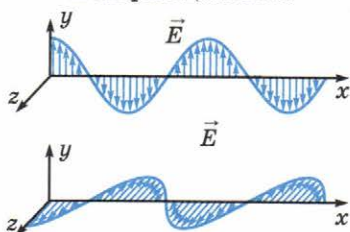
Итак, волновая теория света объясняет законы отражения и преломления света, а также раскрывает *физический смысл показателя преломления*.

Таким образом,

законы геометрической оптики являются следствиями волновой теории света, когда длина световой волны намного меньше размеров препятствий.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Поляризация света



Физический смысл показателя преломления

Относительный показатель преломления

$$n = \frac{v_1}{v_2}$$

Абсолютный показатель преломления

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

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

9. Световая волна частотой $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц переходит из воздуха в среду, где скорость света в 1,5 раза меньше, чем в вакууме.
- Чему равен показатель преломления этой среды?
 - Чему равна частота световой волны в данной среде?
 - Чему равна длина световой волны в воздухе?
 - Чему равна длина световой волны в данной среде?
10. Световая волна частотой $7,2 \cdot 10^{14}$ Гц распространяется в прозрачной среде. Длина волны в среде равна 0,3 мкм.
- Чему равна скорость света в этой среде?
 - Чему равен показатель преломления этой среды?

11. Показатель преломления воды для световых волн, соответствующих красному цвету, равен 1,331, а соответствующих фиолетовому цвету — 1,343.

а) Чему равна скорость световых волн, соответствующих красному цвету, в воде?

б) Чему равна скорость световых волн, соответствующих фиолетовому цвету, в воде?

в) Во сколько раз разность этих скоростей больше первой космической скорости?

12. При переходе света из воды в воздух длина световой волны изменилась на 0,12 мкм.

а) Увеличилась или уменьшилась длина волны?

б) Чему равна длина волны этого света в воздухе?

в) Чему равна длина волны этого света в воде?

г) Чему равна частота этой волны в воздухе?

д) Чему равна частота этой волны в воде?

13. Используя рисунок 25.6, объясните в рамках волновой теории закон отражения света.

14. Используя рисунок 25.7, объясните в рамках волновой теории, почему углы падения и преломления связаны со скоростями света в двух средах соотношением

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

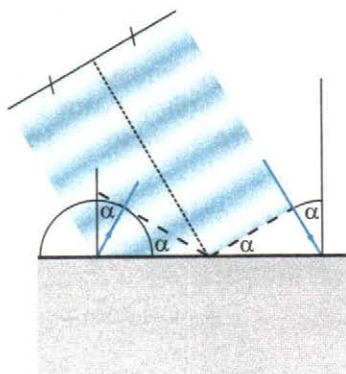


Рис. 25.6

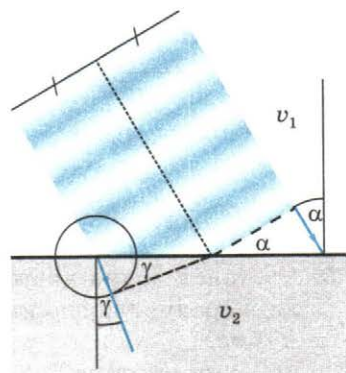


Рис. 25.7

Волновая оптика

Опыт Юнга



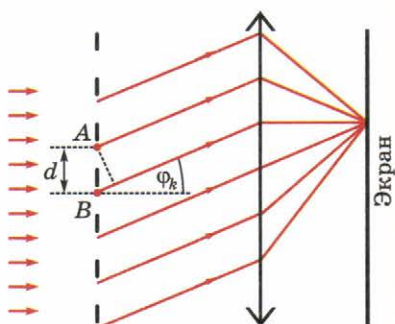
Условие максимумов

$$d \sin \varphi_k = k\lambda$$

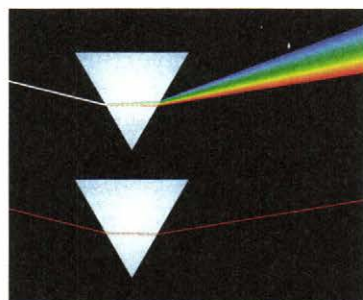
Условие минимумов

$$d \sin \varphi_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Дифракционная решётка



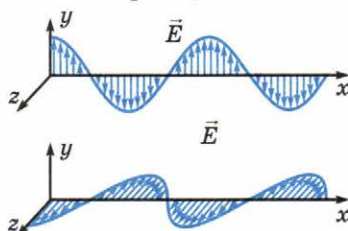
Дисперсия света



Спектр



Поляризация света



**Относительный
показатель
преломления**

$$n = \frac{v_1}{v_2}$$

**Абсолютный
показатель
преломления**

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

**§ 26. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ****1. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ****Движение тел**

Вы уже знаете, что движение *относительно*: движение любого тела можно рассматривать только относительно какого-либо другого тела (тела отсчёта).

Для описания движения и взаимодействия тел удобнее всего выбрать *инерциальную систему отсчёта*. Напомним, что так называют систему отсчёта, в которой выполняется закон инерции. В инерциальных системах отсчёта (*и только в них!*) изменение скорости тела, то есть ускорение, обусловлено действием на это тело других тел.

Инерциальных систем отсчёта существует *бесконечно много*, причём

во всех инерциальных системах отсчёта все механические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково.

Это положение первым сформулировал Галилей, поэтому его называют *принципом относительности Галилея*.

Из принципа относительности Галилея следует, что не существует какой-либо *одной* выделенной системы отсчёта, которую можно было бы назвать покоящейся в абсолютном смысле: *все инерциальные системы отсчёта равноправны*.

А это означает, что *скорость любого тела относительна*: её можно определить только *по отношению к какому-то другому телу*. Например, фраза «ракета летит со скоростью 10 км/ч» лишена смысла, если не указать, относительно какого тела (например, планеты или другой ракеты) движется эта ракета.

**2. СПРАВЕДЛИВ ЛИ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ?**

Долгое время учёным казалось, что ответ на поставленный выше вопрос отрицательный.

Объяснялось это тем, что описание электромагнитных явлений зависит от выбора системы отсчёта.

Пусть, например, в лаборатории покоится заряженное тело, а мимо него с *постоянной* скоростью едет велосипедист (рис. 26.1). Обе системы отсчёта — и лабораторная, и связанная с велосипедистом — *инерциальные*. Но одинаковы ли поля, существующие вокруг заряженного тела в этих системах отсчёта?

? 1. Какие поля существуют вокруг заряженного тела:

- в лабораторной системе отсчёта?
- в системе отсчёта, связанной с велосипедистом?

Итак, мы видим, что даже существование магнитного поля зависит от выбора инерциальной системы отсчёта! Это может поставить под сомнение справедливость принципа относительности для электромагнитных явлений.

Зависимость от выбора системы отсчёта проявляется и в других электромагнитных явлениях.

Вспомним, например, уже известные вам опыты Фарадея, в которых он открыл явление электромагнитной индукции (§ 5).

Пусть катушка (рис. 26.2, а) и магнит (рис. 26.2, б) движутся при проведении этих опытов с *постоянной* скоростью. Тогда с каждым из этих тел можно связать *инерциальную* систему отсчёта.

В обоих случаях в катушке возникает индукционный ток. Однако, как вы уже знаете, *причины* возникновения индукционного тока в катушке в этих системах отсчёта *различны!*

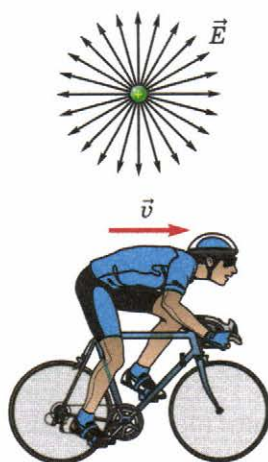


Рис. 26.1

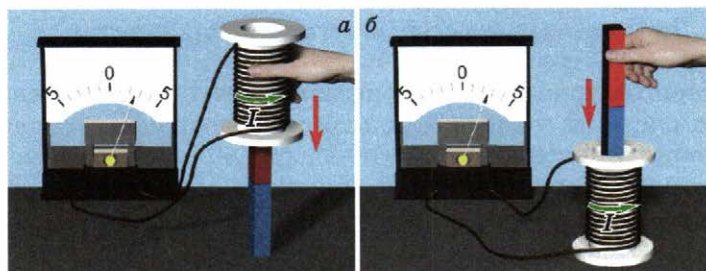


Рис. 26.2

? 2. Каковы причины возникновения индукционного тока в опытах, показанных на рисунках 26.2, а, б?

Множество других опытов также указывает на то, что наблюдаемые электромагнитные явления в разных инерциальных системах *одинаковы*, хотя они и описываются *по-разному*.

Рассмотрим теперь распространение света.

Как вы знаете, английский физик Дж. Максвелл при построении теории электромагнитных явлений предположил, что свет представляет собой электромагнитную волну. В последующем это предположение подтвердил на опыте немецкий физик Г. Герц.

Многочисленные опыты подтверждали справедливость теории Максвелла. Но из неё следовал один очень странный вывод, который долгое время не удавалось проверить на опыте. Согласно теории Максвелла *скорость света в вакууме во всех инерциальных системах отсчёта одинакова!* Иными словами, скорость света абсолютна, то есть не зависит от системы отсчёта.

Физики решили проверить этот странный вывод из теории Максвелла на опыте.

Первыми поставили такой опыт американские физики А. Майкельсон и Э. Морли в конце 19-го века. Они измерили скорость света, распространяющегося по направлению движения Земли по её орбите и в противоположном направлении.

Точность эксперимента была достаточной, чтобы обнаружить изменение скорости света, обусловленное движением Земли по орбите.

Однако этот опыт, а также все последующие убедительно показывали, что *свет в вакууме распространяется всегда с одной и той же скоростью* (близкой к 300 000 км/с).

3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Установленная на опыте независимость скорости света от выбора системы отсчёта отрицала, казалось бы, возможность обобщения принципа относительности на электромагнитные явления: ведь согласно этому принципу абсолютной скорости просто не может быть!

Но в то же время опыты бесспорно указывали на то, что все явления — в том числе и электромагнитные — протекают во всех инерциальных системах отсчёта *одинаково!*

Возникшее противоречие пытались разрешить многие крупнейшие физики. Но нашёл разгадку в 1905 году никому тогда не известный скромный служащий патентного бюро в швейцарском городе Берне. Звали его Альберт Эйнштейн¹.

Установленные на опыте факты он положил в основу теории, названной впоследствии *специальной теорией относительности*.

Основные положения этой теории называют *постулатами специальной теории относительности*. Вот они:



Альберт Эйнштейн
1879–1955

- 1) Все физические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.
- 2) Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта.

Первый постулат называют *принципом относительности Эйнштейна*, чтобы отличить его от принципа относительности Галилея, относящегося не ко всем физическим, а только к *механическим* явлениям.

Скорость света обозначают c .

? 3. В космосе вдоль одной прямой летят космические корабли A и B . Корабль A движется впереди, причём расстояние между кораблями увеличивается со временем. В некоторый момент с корабля A посылают световой сигнал на корабль B , сигнал отражается там от зеркала и возвращается на корабль A .

- а) С какой скоростью движется свет от A к B относительно пассажира корабля A ? относительно пассажира корабля B ?
- б) С какой скоростью движется свет от B к A относительно пассажира корабля A ? относительно пассажира корабля B ?
- в) Равны ли промежутки времени, в течение которых свет двигался от A к B и обратно? Если нет, то какой из них больше?

Специальная теория относительности привела к переосмыслению основных понятий физики — понятий *простран-*

¹ А. Эйнштейн жил и работал в Швейцарии, Германии и США.

ства и времени. До Эйнштейна пространство и время рассматривали *по отдельности*, причём никто не сомневался в том, что время течёт во всех инерциальных системах отсчёта *одинаково*.

Как мы увидим в следующем параграфе, эта «очевидная одинаковость» времени в различных инерциальных системах отсчёта противоречит постулатам теории относительности. Эйнштейн показал, что в разных инерциальных системах отсчёта время течёт по-разному. Например, в системе отсчёта, связанной с быстро движущейся ракетой, время течёт чуть-чуть медленнее, чем на Земле. Но и на Земле, движущейся относительно ракеты, время тоже течёт медленнее, чем на ракете!

При внимательном рассмотрении оказывается, что противоречий здесь нет, потому что, как мы увидим в следующем параграфе, понятие одновременности *относительно*.

Многочисленные опыты, поставленные в 20-м веке, подтвердили предсказания специальной теории относительности. Например, «время жизни» нестабильных частиц, движущихся относительно Земли со скоростью, близкой к скорости света, намного дольше, чем таких же частиц, движущихся с небольшими скоростями.

Основываясь на повседневном опыте, трудно представить, что время в разных системах отсчёта течёт по-разному. Но ведь вокруг нас нет непосредственно наблюдаемых предметов, движущихся со скоростью, сравнимой со скоростью света.

Предсказания теории относительности настолько отличаются от того, что мы наблюдаем в нашем «медленном» мире, что при изучении основ этой теории нельзя рассчитывать на то, что новое всегда можно понять по аналогии с уже известным. Это — *принципиально* новое для вас знание!



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Постулаты теории относительности

- 1) Все физические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.
- 2) Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта.



§ 27. НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

Как вы знаете, одно из важнейших понятий механики — *материальная точка*. Это — модель тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь. Положение материальной точки задаётся *тремя* координатами.

Основное же понятие специальной теории относительности — *событие*. В *заданной системе отсчёта* событие задаётся не только *тремя* координатами, указывающими, *где* оно произошло, но ещё и *четвёртой* величиной — моментом времени, указывающим, *когда* оно произошло.

Рассмотрим в качестве примера два события:

- 1) выход человека утром из подъезда своего дома;
- 2) возвращение его к себе домой вечером.

Можно ли утверждать, что эти два события происходят *в одной точке*¹ пространства?

Казалось бы, ответ на этот вопрос может быть только утвердительным: ведь дом за день никуда не переместился! Однако это верно только в системе отсчёта, связанной с Землёй, на которой стоит дом. А, например, в системе отсчёта, связанной с Солнцем, надо учесть, что человек вместе с Землёй участвует в её суточном вращении и движется по орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Следовательно, за каждый час своего пребывания вне дома человек вместе с Землёй пролетает в космосе больше 100 000 км! Значит, если человек вернулся домой, скажем, через девять часов, то за время своего отсутствия он пролетел в космосе около миллиона километров — даже если этим человеком была бабушка, которая всё это время просидела на лавочке у подъезда!

Итак, утверждение о том, что два события произошли *в одной точке* пространства, является *относительным*: его справедливость зависит от выбора системы отсчёта, в которой рассматривают эти события.

Но тут пока нет ничего для нас нового: относительность положения имеет место и в классической механике, основанной на законах Ньютона.

¹ Будем считать, что можно пренебрегать размерами самого дома.

А как обстоит дело с *одновременностью* двух событий: является ли она также относительной, то есть зависит ли она от выбора системы отсчёта?

Согласно классической физике, основанной на законах Ньютона, понятие одновременности двух событий является абсолютным.

Одинаковое течение времени во всех системах отсчёта казалось всем совершенно очевидным. Например, если два приятеля, добирающиеся в школу из *разных концов города*, выходят из дома ровно в восемь часов утра по сигналу точного времени, то говорят, что они вышли из дома *одновременно*.

Покажем теперь, что из постулатов теории относительности следует, что два события, *одновременных* в одной системе отсчёта, могут быть *не одновременными* в другой системе отсчёта, движущейся относительно первой.

Рассмотрим пример. Для этого нам понадобится хорошее воображение.

Представим себе длинный вагон, мчащийся мимо платформы со скоростью \bar{v} , сравнимой со скоростью света.

В некоторый момент времени в центре вагона происходит вспышка света (рис. 27.1, а). *Одновременно* ли достигнет свет передней и задней стенок вагона? Сейчас мы увидим, что ответ на этот «очевидный» вопрос зависит от того, из какой системы отсчёта мы наблюдаем за происходящим.

Обозначим A событие, состоящее в том, что свет достиг передней стенки вагона, а B — состоящее в том, что свет достиг задней стенки.

Система отсчёта «вагон». С точки зрения пассажира вагона (то есть в системе отсчёта, связанной с вагоном) оба события произойдут *одновременно*.

Действительно, фронт световой волны — это сфера, центр которой совпадает с местом вспышки света, а радиус увеличивается со скоростью c . А поскольку расстояния от центра вагона до передней и задней стенок одинаковы, фронт волны достигнет их *одновременно* (рис. 27.1, б). Итак, в системе отсчёта «вагон» события A и B произошли *одновременно*.

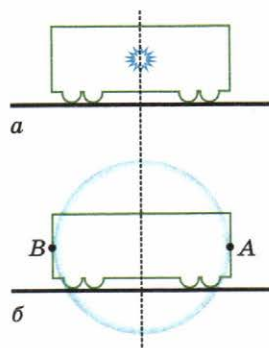


Рис. 27.1

Система отсчёта «платформа».

Рассмотрим теперь те же самые два события A и B (достижение светом передней и задней стенок вагона) с точки зрения стоящего на платформе наблюдателя.

Учтем, что в его системе отсчёта (как и в любой системе отсчёта!), свет *тоже* распространяется в любом направлении со скоростью c . Поэтому фронт волны *тоже* будет сферой, *центр которой совпадает с местом вспышки света*, а радиус увеличивается со скоростью c .

Однако с точки зрения наблюдателя на платформе свет от вспышки проходит *разные* расстояния до передней и задней стенок! Ведь задняя стенка вагона движется *навстречу* фронту световой волны, а передняя, наоборот, *удаляется* от него. Значит, в системе отсчёта, связанной с платформой, свет дойдёт до задней стенки *раньше*, чем до передней!

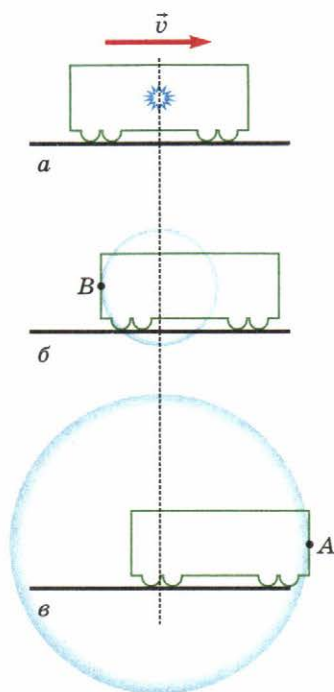


Рис. 27.2

? 1. Расскажите о событиях, изображённых на рисунках 27.2, a – $в$.

Мы видим, что в системе отсчёта, связанной с платформой, событие A произошло *позже*, чем событие B . И так, события A и B , *одновременные* в системе отсчёта, связанной с вагоном, *не одновременны* в системе отсчёта, связанной с платформой!

При каком условии относительность одновременности может стать заметной? Ответ: только при рассмотрении двух событий в системах отсчёта, которые движутся друг относительно друга *со скоростью, сравнимой со скоростью света*. А скорости тел, с которыми мы встречаемся в повседневной жизни, во много раз меньше скорости света.

? 2. Во сколько раз меньше скорости света в вакууме:

- а) скорость звука в воздухе?
- б) первая космическая скорость?

2. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ

Одним из следствий постулатов теории относительности является уже упоминавшееся в предыдущем параграфе *замедление времени* в движущейся системе отсчёта.

Пусть пассажир уже знакомого нам поезда, быстро мчащегося мимо платформы, заснул (событие A), проспал ровно 1 ч по часам, висящим в вагоне, после чего проснулся (событие B). Рассмотрим события A и B в двух системах отсчёта: связанной с вагоном и с платформой.

Система отсчёта «вагон». В этой системе отсчёта события A и B произошли в одной точке пространства с промежутком времени 1 ч.

Система отсчёта «платформа». Представим, что платформа такая длинная, что всё то время, пока пассажир спал, поезд ехал мимо неё. Предположим, пассажир заснул (событие A), проезжая мимо часов в начале платформы (рис. 27.3, *a*), а проснулся (событие B), проезжая мимо часов в конце платформы (рис. 27.3, *б*).

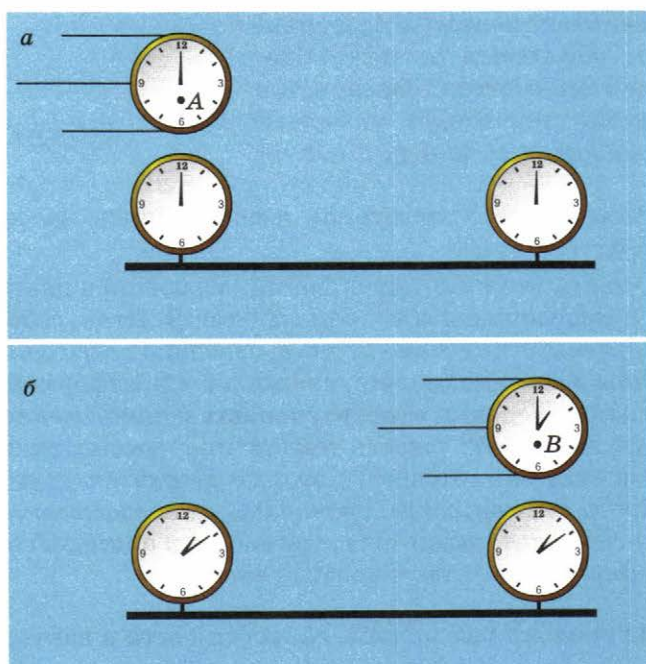


Рис. 27.3

Обратите внимание: в системе отсчёта, связанной с платформой, события *A* и *B* произошли в *разных точках* пространства. Чтобы найти промежуток времени, разделяющий эти события, наблюдатель на платформе должен сравнить показания двух разных часов в своей системе отсчёта, которые находятся в разных точках.

Обозначим t_0 промежуток времени, измеренный часами пассажира, а t — промежуток времени, разделяющий показания двух *разных* часов на платформе, мимо которых проносился поезд в те моменты, когда происходили события *A* и *B*.

Исходя из постулатов теории относительности, можно доказать¹, что

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

где v — модуль скорости вагона относительно платформы, c — модуль скорости света.

Знаменатель в формуле (1) меньше 1, поэтому $t > t_0$. Следовательно, по часам в системе отсчёта, связанной с платформой, промежуток времени, разделяющий события *A* и *B*, больше, чем по часам в системе отсчёта, связанной с вагоном. Это означает, что *промежуток времени между двумя событиями относителен, то есть зависит от выбора системы отсчёта*.

Промежуток времени между двумя событиями *наименьший* в той системе отсчёта, в которой эти события произошли *в одной точке* (в рассмотренном выше примере это события *A* и *B* в системе отсчёта, связанной с вагоном).

Замедление времени в движущейся системе отсчёта, предсказываемое специальной теорией относительности, имеет симметричный характер: для *любой* системы отсчёта движущиеся *относительно неё* часы отстают по сравнению с часами, покоящимися в этой системе отсчёта.

Но противоречия здесь нет, потому что показания *одних и тех же* «движущихся» часов сравнивают при этом с показаниями часов, находящихся в разных точках пространства в «покоящейся» системе отсчёта.

¹ Доказательство справедливости этой формулы выходит за рамки школьного курса физики.

При каком условии может проявиться замедление времени? Из приведённой выше формулы для промежутков времени видно, что замедление времени проявляется только в случае движения со скоростью, сравнимой со скоростью света. Даже при скорости, равной половине скорости света, время в движущейся системе отсчёта, замедляется не очень значительно: за 1 ч по часам пассажира прошло бы 1 ч 9 мин по часам на платформе. И, конечно, наш вагон и пассажир в нём — только воображаемые: вряд ли поезда будут когда-либо мчаться со скоростью, равной половине скорости света!

Чем ближе скорость такого вагона к скорости света c , тем заметнее различие во времени. Так, при скорости вагона, равной $0,75 c$, часы в вагоне будут идти примерно в 1,5 раза медленнее, чем на платформе, а если скорость вагона будет составлять $0,98 c$, время в нём замедлится в 5 раз.

Можно ли замедление времени проверить на опыте? Скорость элементарных частиц в космических лучах и современных ускорителях очень близка к скорости света. И для таких частиц эффекты, предсказываемые теорией относительности, полностью подтвердились на опыте. Например, многие частицы нестабильны, то есть через очень малый промежуток времени распадаются на другие частицы. Опыты показали, что чем быстрее относительно Земли движется нестабильная частица, тем больше её «время жизни» в связанной с Землёй системе отсчёта. Причём измеренное на опыте замедление времени находится в точном соответствии с записанной выше формулой. Например, нестабильные частицы, называемые мюонами, рождаются из других космических частиц на высоте около 10 км над Землёй и обнаруживаются на уровне моря. Но время их жизни в их собственной системе отсчёта настолько мало, что с точки зрения ньютоновской механики они могли бы пролететь расстояние всего лишь около 1 км.

3. ЭНЕРГИЯ ТЕЛА

Используя постулаты теории относительности, Эйнштейн вывел формулу для полной энергии движущегося тела массой m :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

Формула (2) приводит к результатам, благодаря которым 20-й век стал «веком атома». Чтобы увидеть их, запишем формулу (2) для случая, когда $v \ll c$. Можно показать, что в этом случае¹

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}, \quad (3)$$

поэтому формула (2) принимает вид

$$E = mc^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) = mc^2 + \frac{mv^2}{2}. \quad (4)$$

Второе слагаемое в формуле (4) нам хорошо знакомо: это *кинетическая* энергия тела.

Первое же слагаемое — это *энергия покоя*

$$E_0 = mc^2. \quad (5)$$

Формула (5) — символ физики 20-го века. Из неё следует, что даже *покоящееся тело обладает энергией* вследствие того, что у него есть масса. Подробнее мы рассмотрим это в Главе 9. Выполнив следующее задание, вы сможете оценить заключённую в теле энергию.

- ?** 3. Чему равна энергия покоя тела массой 1 г?
- ?** 4. Какую массу угля надо сжечь, чтобы выделившееся при сгорании количество теплоты было равно энергии покоя тела массой 1 г? Сколько вагонов понадобилось бы для перевозки этой массы угля, если один вагон вмещает 50 т? Удельную теплоту сгорания угля примите равной 30 МДж/кг.

Из формулы $E_0 = mc^2$ следует, что при изменении массы тела на Δm выделяется энергия $\Delta E_0 = \Delta mc^2$. Этот вывод подтверждается в ядерных реакциях, например в реакции деления ядер урана, используемой на атомных электростанциях.

¹ Чтобы убедиться в справедливости этой формулы при $v \ll c$, возведите обе её части в квадрат и приведите к одному знаменателю. Вы увидите, что левую и правую части можно считать равными, если пренебречь $\frac{v^4}{c^4}$.

При этом суммарная масса продуктов реакции меньше массы исходного ядра урана всего лишь на сотые доли процента! В следующих параграфах мы расскажем об этом подробнее.

Почему же в обыденной жизни мы не замечаем колоссальных запасов энергии, таящихся в окружающих нас телах только вследствие того, что они обладают массой? Дело в том, что в окружающих нас явлениях энергия тел изменяется настолько мало, что соответствующее изменение массы невозможно измерить даже самыми точными приборами.

? 5. Насколько масса 3 л воды при температуре кипения больше, чем при комнатной температуре? Удельная теплоёмкость воды $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Кинетическая энергия тела в специальной теории относительности определяется формулой $E_k = E - E_0$.

Скорость света — предельная скорость. Из формулы (5) для полной энергии тела следует, что, когда скорость тела приближается к скорости света, знаменатель этой формулы стремится к нулю, поэтому энергия тела стремится к *бесконечности*. Это означает, что никакое тело с массой, отличной от нуля, не сможет достичь скорости света.

Другими словами, скорость света является *предельной скоростью*: ни одно тело, обладающее массой, не может двигаться со скоростью света.

Эйнштейн показал, что свет можно представить как поток частиц, названных *фотонами*. Масса фотона равна *нулю*, а энергия отлична от нуля; он движется со скоростью света относительно *любой* системы отсчёта.

4. ОТМЕНЯЕТ ЛИ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ КЛАССИЧЕСКУЮ МЕХАНИКУ?

Ответим сразу на этот вопрос: нет, не отменяет! Все формулы классической механики вытекают из формул специальной теории относительности при движении тел со скоростями, во много раз меньшими скорости света.

Например, мы уже видели, что при таком движении к энергии покоя добавляется слагаемое, которое при скоростях, малых по сравнению со скоростью света, совпадает с выражением для кинетической энергии тела в классической механике.

Теория относительности позволяет проиллюстрировать одно из важнейших положений научного метода — *принцип соответствия*. Согласно этому принципу новая научная теория не отвергает старую, а включает её в себя как частный случай. Новая научная теория только устанавливает рамки применимости старой теории. Например, все выводы теории относительности для тел и частиц, движущихся со скоростями, намного меньшими скорости света, полностью совпадают с предсказаниями классической механики.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Некоторые следствия специальной теории относительности

Относительность одновременности: два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчёта, могут не быть одновременными в другой инерциальной системе отсчёта

Замедление времени

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Полная энергия движущегося тела

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Энергия покоя

$$E_0 = mc^2$$

Изменение энергии покоя при изменении массы

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2$$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

- На сколько уменьшается масса 10 л воды при замерзании? Начальная температура воды и конечная температура льда равны 0 °С.
- По часам командира фотонного звездолёта прошёл 1 ч. Чему соответствует этот промежуток времени для ждущей командира на Земле девушки, если звездолёт движется относительно Земли со скоростью 240 000 км/с?
- На сколько меньше скорости света должна быть скорость электрона в данной системе отсчёта, чтобы его полная энергия в этой системе отсчёта была равна энергии покоя протона?

§ 28. ФОТОЭФФЕКТ. ФОТОНЫ**1. ГИПОТЕЗА ПЛАНКА****«Ультрафиолетовая катастрофа»**

Как вы знаете из курса физики основной школы, есть три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение. Напомним, что при теплопередаче энергия переходит от более нагретого тела к менее нагретому, то есть от тела, имеющего более высокую температуру, к телу с более низкой температурой. Два тела находятся в *тепловом равновесии*, если их температуры *равны*.

При исследовании условий теплового равновесия *вещества с излучением* учёные обнаружили сильнейшее противоречие между теорией и экспериментом.

Расчёты, основанные на теории Максвелла, предсказывали, что тепловое равновесие между веществом и излучением может иметь место только при *абсолютном нуле температуры* ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Это означало, что любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, должно посредством излучения отдавать энергию электромагнитному полю до тех пор, пока тело не охладится до абсолютного нуля. Другими словами, вещество во всей Вселенной давным-давно должно было бы остыть до абсолютного нуля, отдав всю внутреннюю энергию электромагнитному полю.

Опыт же неопровержимо свидетельствует, что тепловое равновесие между веществом и излучением возможно при *любой температуре*: оно устанавливается в результате излучения и поглощения телом электромагнитных волн (рис. 28.1).

Это «катастрофическое» несоответствие предсказаний классической физики и опыта учёные образно называли «*ультрафиолетовой катастрофой*», потому что расчёты, выполненные в рамках теории Максвелла, показывали, что ответственными за это противоречие теории с экспериментом являются электромагнитные волны с очень малой длиной волны, то есть находящиеся за *фиолетовой* границей спектра видимого света.

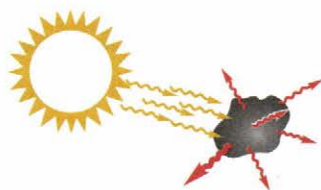


Рис. 28.1

Кванты света

Общий принцип науки гласит: если теория противоречит опыту, надо изменять *теорию*. И в 1900 году немецкий физик М. Планк высказал предположение, которое выходило за рамки теории Максвелла, но объясняло результаты опытов.

Планк предположил, что

свет излучается и поглощается веществом отдельными порциями — *квантами*¹, причём энергия кванта E и частота излучения ν связаны соотношением

$$E = h\nu. \quad (1)$$

Это предположение назвали *гипотезой Планка*. Её схематически поясняет рисунок 28.2.

Величину h назвали *постоянной Планка*. Измерения показали, что

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

2. ЯВЛЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

В конце 19-го века немецкий учёный Г. Герц обнаружил, что свет может вырывать электроны из металла.

Поставим опыт

Направим свет ртутно-кварцевой лампы на цинковую пластину, соединённую с электроскопом (рис. 28.3). Под действием излучения лампы пластинка приобретает *положительный* электрический заряд. Это означает, что *под действием света из цинковой пластинки вылетают электроны*.



Макс Планк
1858–1947

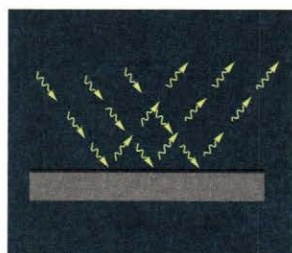


Рис. 28.2



Рис. 28.3

¹ От латинского слова «квантум» — сколько.

Вырывание электронов из вещества под действием света называют фотоэффектом.

- ?** 1. Как установить на опыте, что цинковая пластина приобретает под действием излучения **положительный заряд**?

На рисунке 28.4 схематически изображена установка для исследования фотоэффекта.

В баллон, из которого откачан воздух, помещены электроды 1 и 2. Поток света падает на электрод 1 и вырывает из него электроны. Часть электронов попадает на электрод 2, в результате чего между электродами 1 и 2 возникает электрический ток. Его называют **фототоком**. Силу фототока измеряют миллиамперметром, а напряжение между электродами — вольтметром.

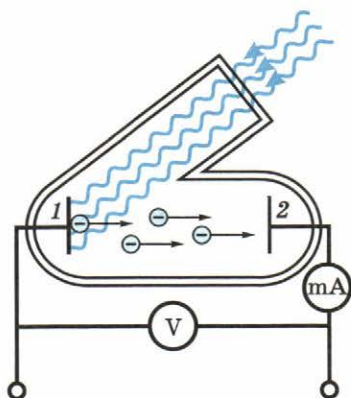


Рис. 28.4

- ?** 2. В какую сторону направлен фототок: от электрода 1 к электроду 2 или наоборот?

На рисунке 28.5 приведён полученный на опыте график зависимости силы фототока от напряжения между электродом 2 и электродом 1.

Мы видим, что, если разность потенциалов между электродом 2 и электродом 1 **положительна** и достаточно велика, сила фототока становится равной I_n . Это значение силы тока называют **током насыщения**: при таком значении силы фототока все вырываемые светом электроны достигают электрода 2.

Если же разность потенциалов между электродом 2 и электродом 1 **отрицательна** и по модулю больше определённого значения U_3 , которое называют **задерживающим напряжением**, сила фототока равна нулю. Объясняется это тем, что кинетическая энергия вырванных электронов недостаточна, чтобы они смогли преодолеть **отталкивание** от отрицательного электрода 2.

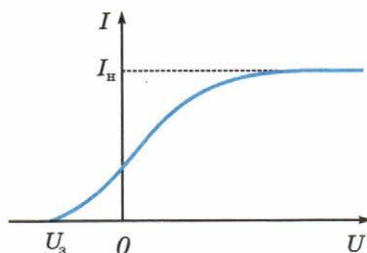


Рис. 28.5

3. Объясните, почему *максимальная* кинетическая энергия вырываемых светом электронов связана с модулем задерживающего напряжения соотношением

$$\frac{mv^2}{2} = eU_0. \quad (2)$$

Здесь m , v — масса и скорость электрона, e — модуль заряда.

Подсказка. Воспользуйтесь законом сохранения энергии и связью между напряжением и работой электрического поля.

4. Задерживающее напряжение в опыте по фотоэффекту равно 5 В. Чему равны:
- максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов?
 - максимальная скорость фотоэлектронов?

Законы фотоэффекта

В начале 20-го века несколько учёных, в том числе российский физик А. Г. Столетов, установили на опыте следующие законы фотоэффекта.

1. *Количество электронов*, вырываемых светом каждую секунду с поверхности металла, пропорционально поглощённой энергии света.

2. *Максимальная кинетическая энергия* вырванных электронов E_k линейно возрастает при увеличении частоты ν падающего света (рис. 28.6).

3. Когда частота ν падающего света меньше некоторого определенного значения ν_{\min} (называемого *красной границей фотоэффекта*), фотоэффект не наблюдается (см. рис. 28.6).



Александр Столетов
1839–1896

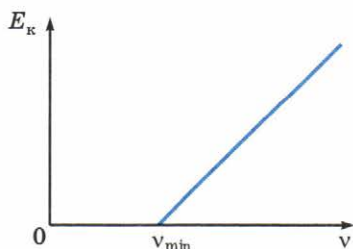


Рис. 28.6

Название «красная граница фотоэффекта» объясняется тем, что значение ν_{\min} ограничивает частоту вызывающего фотоэффект света со стороны *малых* частот, то есть *больших* длин волн света. А большие длины волн соответствуют «красной» части видимого спектра.

Однако в действительности красная граница фотоэффекта далеко не всегда соответствует *красному* цвету. Например, для цинка красная граница фотоэффекта лежит в ультрафиолетовой области, поэтому в описанном выше опыте и понадобилась ртутно-кварцевая лампа, которая испускает ультрафиолетовое излучение. Для калия красная граница фотоэффекта соответствует жёлтому цвету, а для цезия — оранжевому.

Может ли классическая физика объяснить законы фотоэффекта?

Первый закон фотоэффекта можно объяснить с помощью классической физики. Однако *второй* и *третий* законы фотоэффекта не находят в ней объяснения, и вот почему.

Согласно второму закону фотоэффекта максимальная кинетическая энергия вырванных электронов *линейно возрастает* при увеличении *частоты* падающего света. Согласно же классической электродинамике энергия световой волны *зависит только от её амплитуды и не зависит от частоты*.

По той же причине не находит объяснения в рамках классической физики и третий закон фотоэффекта: она не может объяснить, почему фотоэффект прекращается при достаточно малой частоте света.

3. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Эйнштейн воспринял гипотезу Планка об излучении и поглощении света отдельными порциями как указание на то, что свет представляет собой поток частиц, названных впоследствии *фотонами*.

Чтобы, поглотив фотон, электрон смог вырваться из металла, он должен совершить некоторую *работу* против сил электрического поля, поскольку ионная решетка притягивает электрон. Эту работу называют *работой выхода* и обозначают $A_{\text{вых}}$.

Электрон-вольт. Энергию фотона, кинетическую энергию фотоэлектрона и работу выхода часто задают в электрон-вольтах (обозначают эВ).

1 эВ равен модулю изменения энергии электрона при прохождении им разности потенциалов, равной 1 В.

? 5. Чему равен 1 эВ в джоулях?

Максимальная кинетическая энергия будет у тех фотоэлектронов, которые, поглотив фотон, вырвались из металла, не потеряв энергию на столкновения с другими частицами металла.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Из закона сохранения энергии следует, что

энергия $h\nu$ поглощённого электроном фотона равна сумме работы выхода $A_{\text{вых}}$ и максимальной кинетической энергии вылетевшего электрона:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}. \quad (3)$$

Соотношение (3) называют *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

? 6. Поток фотонов с энергией 4 эВ каждый вырывает из металлической пластинки фотоэлектроны, максимальная кинетическая энергия которых равна 1,5 эВ. Чему равна работа выхода электронов из этого металла (в электрон-вольтах)?

Рассмотрим, как теория фотоэффекта объясняет второй и третий законы фотоэффекта.

Согласно уравнению Эйнштейна (3) максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов линейно зависит от частоты света:

$$E_{\text{к}} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (4)$$

А это и есть второй закон фотоэффекта (см. выше в этом параграфе).

Далее, если энергия падающих фотонов меньше работы выхода, то есть $h\nu < A_{\text{вых}}$, то фотоны не смогут вырывать электроны из металла. Это объясняет существование красной границы фотоэффекта (третий закон фотоэффекта).

Теория Эйнштейна объясняет также физический смысл красной границы фотоэффекта.

? 7. Объясните, почему из уравнения (4) следует, что наименьшая частота света ν_{min} , при которой может происходить фотоэффект, определяется уравнением

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (5)$$

- ?** 8. Объясните, почему справедливы следующие формулы, применяемые при решении задач, связанных с фотоэффектом:

$$h\nu = h\nu_{\min} + \frac{mv^2}{2},$$

$$h\nu = A_{\text{вых}} + eU_s,$$

$$h\nu = h\nu_{\min} + eU_s.$$

Подсказка. Воспользуйтесь формулами (2), (3) и (5).

- ?** 9. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна $6 \cdot 10^{14}$ Гц. При какой частоте падающего на этот металл света задерживающее напряжение равно 3 В?

4. ФОТОНЫ

Явление фотоэффекта и убедительное его объяснение теорией Эйнштейна привело учёных к пониманию того, что

свет имеет двойственную природу: он обладает как свойствами волн, так и свойствами частиц.

Так в начале 20-го века «почётной ничьей» закончился долгий спор между сторонниками волновой и корпускулярной теорий света: правы были и те, и другие. Природа оказалась настолько изобретательной, что сумела совместить положения этих теорий, казавшихся учёным несовместимыми.

Свойства фотонов

Масса и скорость фотона. *Масса фотона равна нулю, и он всегда движется со скоростью света:* скажем, от момента излучения одним атомом до момента поглощения другим атомом.

Энергия фотона. Энергия фотона, соответствующего свету частотой ν , определяется формулой Планка:

$$E = h\nu.$$

Импульс фотона. Как показывают расчёты¹, модуль импульса фотона, соответствующего свету с частотой ν , выражается формулой

$$p = \frac{h\nu}{c}, \quad (6)$$

где c — скорость света.

¹ Эти расчёты выходят за рамки школьного курса.

- ?** 10. Объясните, почему выражение (6) для модуля импульса фотона можно записать также в виде

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

где λ — длина волны света.

Поскольку фотоны обладают импульсом, свет оказывает давление на поверхность, на которую он падает. Напомним, что давление света впервые измерил российский физик П. Н. Лебедев (§ 15).

- ?** 11. На полностью поглощающую поверхность площадью 10 м^2 перпендикулярно поверхности падает излучение мощностью 3 кВт .
- а) Чему равна энергия, поглощённая поверхностью за 1 с ?
 - б) Чему равен импульс, переданный светом этой поверхности за 1 с ?
 - в) Чему равна сила давления излучения на поверхность?
 - г) Чему равно давление света на поверхность?

5. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

Фотоэффект используют для преобразования световой энергии в электрическую — например в солнечных батареях, питающих электроэнергией приборы на космических кораблях (рис. 28.7).

Солнечные батареи используют сегодня и как источник электрического тока в солнечных местностях: такую батарею размещают на крыше дома, а даваемая ею электроэнергия питает кондиционеры, охлаждающие помещение (рис. 28.8). Так солнечная энергия, когда она оказывается в избытке, сама же помогает ослабить нежелательные последствия этого избытка.

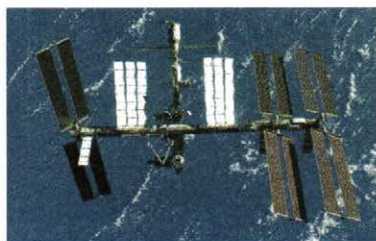


Рис. 28.7



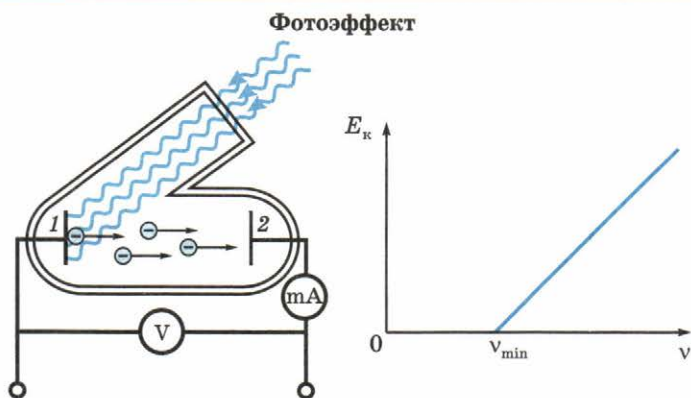
Рис. 28.8

Фотоэффект «превращает» свет в электрический ток, благодаря чему изображение можно преобразовывать в электрические сигналы и передавать на расстояние. Это используют в *телевидении*.

На явлении фотоэффекта основано действие *фотоэлементов* — приборов, с помощью которых можно управлять включением и выключением механизмов, уличного освещения и так далее. Например, фотоэлементы стоят в турникетах метро, а также предотвращают несчастные случаи на производстве (рука рабочего, попавшая в опасную зону, перекрывает луч света, падающий на фотоэлемент, вследствие чего останавливается станок или другой механизм).



ЧТО МЫ УЗНАЛИ



Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m\nu^2}{2}$$

Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

ФОТОНЫ

Энергия фотона $E = h\nu$

Импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c}$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

12. Энергия одного фотона в пучке монохроматического света (с определённой длиной волны) равна $4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Чему равна длина волны этого излучения в воде?
13. Длина волны света, соответствующей красной границе фотоэффекта для калия, равна $0,62$ мкм.
- а) Чему равна максимальная скорость фотоэлектронов, вырывааемых из калия светом с длиной волны $0,42$ мкм?
- б) Во сколько раз эта скорость больше первой космической скорости?
- в) Во сколько раз эта скорость меньше скорости света?
14. Работа выхода электрона из некоторого металла равна $4,76$ эВ. Чему равна длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта для этого металла?
15. В опыте по фотоэффекту с определённым металлом задерживающее напряжение равно 2 В для света с длиной волны $0,4$ мкм. Чему будет равно задерживающее напряжение для света с длиной волны $0,77$ мкм?
16. *Интенсивностью* излучения I называют отношение мощности P излучения к площади S поверхности, на которую падает это излучение перпендикулярно поверхности. Объясните, почему, если угол падения света равен нулю, давление p света на поверхность связано с интенсивностью излучения соотношениями:
- а) $p = \frac{I}{c}$, если поверхность полностью поглощает свет;
- б) $p = \frac{2I}{c}$, если поверхность зеркальная.
- Подсказка.* Воспользуйтесь формулами для энергии и импульса фотона, а также соотношением между силой и переданным импульсом.
17. На солнечную батарею площадью 50 м² падают солнечные лучи перпендикулярно поверхности батареи. Батарея поглощает половину падающего на неё света. Мощность солнечного излучения, падающего на 1 м², равна $1,4$ кВт. Чему равна сила давления солнечного света на батарею?

§ 29. СТРОЕНИЕ АТОМА

1. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

Модель атома Томсона

Слово «атом» в переводе с греческого означает «неделимый». И долгое время учёные действительно считали атом мельчайшей частицей вещества.

Однако когда английский физик Дж. Томсон в конце 19-го века открыл электрон, у многих учёных появились серьёзные сомнения в неделимости атома. Дело в том, что масса электрона оказалась примерно в 2 тысячи раз меньше массы самого лёгкого из атомов, а это означало, что электрон каким-то образом входит в состав атома.

Первую модель атома предложил сам Томсон. Согласно его предположению, атом представляет собой положительно заряженный шар диаметром около 10^{-10} м, внутри которого, подобно изюминкам в кексе, находятся отрицательно заряженные электроны (рис. 29.1).

Идея опыта Резерфорда

Английский физик Э. Резерфорд догадался, как можно проверить на опыте справедливость предложенной Томсоном модели атома. Для этого он решил бомбардировать атомы быстрыми заряженными частицами и наблюдать, как отклоняются эти частицы в результате их столкновений с атомами.

К тому времени быстрые заряженные частицы уже имелись в распоряжении учёных: это были так называемые α -частицы¹, заряд которых положителен и в 2 раза больше модуля заряда электрона, а масса примерно в 4 раза больше массы атома водорода, то есть почти в 8 тысяч раз больше массы электрона. α -частицы вылетают со скоростью около 20 000 км/с при самопроизвольных распадах некоторых атомных ядер.

Если бы модель Томсона соответствовала действительности, очень массивные (по сравнению с электронами) и очень быстрые α -частицы должны были бы пролетать сквозь «атомы-кексы» с «изюминками-электронами», почти не замечая препятствия.

¹ В дальнейшем выяснилось, что α -частицы — это ядра атомов гелия.



Рис. 29.1

Схема опыта Резерфорда

На рисунке 29.2 изображена схема опыта, поставленного Резерфордом в 1911 году.

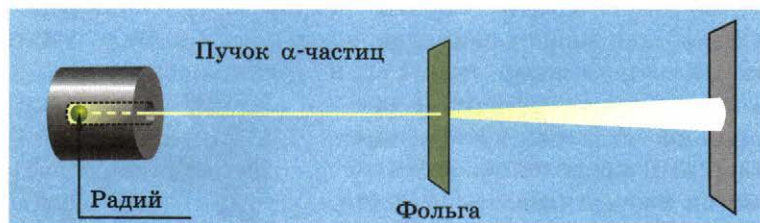


Рис. 29.2

Небольшой образец радиоактивного вещества (радия) помещался в свинцовый блок, из которого α -частицы могли выходить только очень узким пучком (все другие α -частицы поглощались свинцом).

На пути пучка α -частиц помещали тонкую фольгу, а за ней — экран. На экране в месте попадания α -частицы появлялась светящаяся точка. Наблюдая экран в микроскоп, можно было определить, как отклоняются α -частицы при взаимодействии с атомами металла в фольге.

Открытие атомного ядра

Первые полученные Резерфордом и его сотрудниками результаты, казалось, подтверждали справедливость предложенной Томсоном модели атома: α -частицы проходили сквозь фольгу, практически не отклоняясь от своего первоначального направления.

Но, будучи настоящим исследователем, Резерфорд решил проверить на опыте даже то, что казалось «невероятным». И он предложил своим молодым сотрудникам выяснить: могут ли α -частицы рассеиваться на *большие* углы?

Передадим слово самому Резерфорду¹:

«Однажды Гейгер пришёл ко мне и сказал: «Не думаете ли Вы, что молодому Марсдену пора поручить небольшое исследование?». Я тоже считал, что пора, и сказал: «Почему бы не поручить ему выяснить, могут ли α -частицы рассеиваться на большие углы?» По секрету могу сказать, что сам я не верил, что это возможно.

¹ Цитаты Резерфорда приводятся в сокращении. Гейгер и Марсден — ученики Резерфорда. Выделения в цитатах сделаны авторами учебника.

Но через несколько дней ко мне пришёл крайне взволнованный Гейгер и сказал: “Нам удалось наблюдать α -частицы, отлетевшие от фольги *назад*...” Это было самым невероятным событием в моей жизни. Оно было столь же невероятным, как если бы 15-дюймовым снарядом выстрелили в лист бумаги, и снаряд, отскочив назад, попал бы в стрелявшего.

Именно тогда у меня и возникла идея об очень малом ядре атома, где сосредоточена практически вся масса атома и весь положительный заряд».

Действительно, чтобы быстрая и массивная α -частица в результате столкновения полетела *назад*, она должна была столкнуться с чем-то *массивным* и *очень малым* (рис. 29.3).

Так было открыто существование *атомного ядра*. Это открытие оказало такое влияние на историю 20-го века, что его назвали «веком атома».



Эрнест Резерфорд
1871–1937

? 1. Где расположили экран сотрудники Резерфорда для наблюдения α -частиц, отлетевших от фольги *назад*?

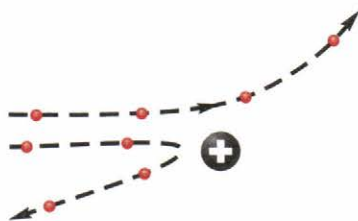


Рис. 29.3

2. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Размер атомного ядра

Предположив, что налетающая на ядро α -частица взаимодействует с ядром в соответствии с законом Кулона, Резерфорд смог определить размер атомного ядра.

И оказалось, что атомное ядро в десятки тысяч раз меньше атома: размеры ядер — около 10^{-14} – 10^{-15} м, в то время как размер атома — примерно 10^{-10} м.

Представьте себе горошинку посреди футбольного поля, и вы получите некоторое представление об относительных размерах ядра и атома. А ведь в этой «горошинке» сосредоточена почти вся масса атома!

Сходство строения атома со строением солнечной системы

Основываясь на своих опытах и расчётах, Резерфорд предложил *планетарную модель атома*, в которой атом как бы напоминает Солнечную систему в миниатюре: вокруг малого и массивного положительно заряженного ядра движутся по орбитам лёгкие электроны — подобно тому, как вокруг Солнца движутся планеты (рис. 29.4).

Так как атом в целом электрически нейтрален, положительный заряд ядра равен модулю суммарного заряда всех движущихся вокруг ядра электронов.

Сходство атома с Солнечной системой усиливалось тем, что закон Кулона, «управляющий» движением электронов, совпадает по форме с законом всемирного тяготения, «управляющим» движением планет: и в том и в другом случае сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Недостатки планетарной модели атома

Однако несмотря на свою привлекательность и наглядность, *планетарная модель атома противоречила законам классической физики* (так называют механику Ньютона и электродинамику Максвелла). Рассмотрим это подробнее.

Невозможность объяснить стабильность атомов. Согласно классической электродинамике ускоренно движущийся заряд должен излучать электромагнитные волны. А в планетарной модели атома электроны движутся вокруг ядра с огромным центростремительным ускорением, обусловленным силой притяжения к ядру. И поэтому электрон практически мгновенно должен был бы потерять всю свою энергию вследствие излучения и упасть на ядро.

А ведь многие атомы существуют *миллиарды лет*.

Итак, расхождение классической электродинамики с опытом кажется здесь столь же катастрофическим, как и в случае *ультрафиолетовой катастрофы*. Интересно, что и в этом случае «преодолеть катастрофу» удалось благодаря предположению, являющемуся развитием гипотезы Планка.

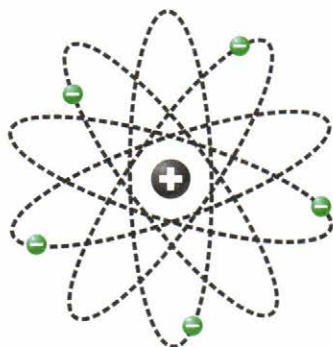


Рис. 29.4

Невозможность объяснить сходство атомов одного и того же химического элемента. Если бы электроны двигались вокруг ядра подобно планетам вокруг Солнца, то каждый атом был бы *единственным в своём роде*, так как согласно классической механике каждый электрон мог бы двигаться по *любой* из бесконечного множества орбит. И поэтому должно было бы наблюдаться бесконечное разнообразие атомов одного и того же химического элемента.

Однако опыт показывает, что все атомы одного и того же химического элемента обычно похожи друг на друга значительно больше, чем братья-близнецы.

3. ТЕОРИЯ АТОМА БОРА

Желая «спасти» планетарную модель атома, датский физик Нильс Бор в 1913 году дополнил её положениями, которые назвали *постулатами Бора*.

Постулаты Бора

1. Электроны в атомах движутся только по определённым стационарным орбитам (рис. 29.5, а). Каждой орбите соответствует определённая энергия электрона E_n , где n — номер орбиты.

2. Электроны излучают и поглощают фотоны только при переходе с одной стационарной орбиты на другую (рис. 29.5, б, в). При этом электрон излучает или поглощает фотон с энергией, равной разности энергий электрона на стационарных орбитах:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \quad (7)$$

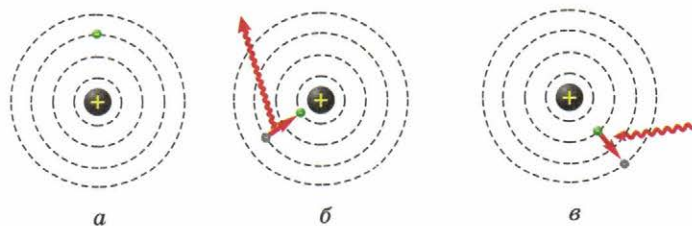


Рис. 29.5



Нильс Бор
1885–1962

- ?** 2. Объясните, почему из постулата Бора следует, что атом может *излучать* свет только с *определёнными* значениями частоты, которые выражаются формулой

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}.$$

Когда электроны в атоме находятся на стационарных орбитах с наименьшей возможной энергией, говорят, что атом находится в *основном состоянии*.

Все другие состояния атома называют *возбуждёнными*.

Следствия постулатов Бора

Объяснение стабильности атомов. Когда электроны в атоме находятся на орбитах с наименьшей возможной энергией (то есть когда атом находится в основном состоянии), электроны, согласно постулатам Бора, не могут излучать энергию. Следовательно, в основном состоянии атом может находиться сколь угодно долго.

Объяснение сходства атомов. Сходство атомов одного и того же химического элемента объясняется в теории Бора тем, что во всех атомах данного элемента стационарные орбиты электронов *одни и те же*.

Трудности теории Бора

Количественного согласия с экспериментом Бору удалось достичь только при описании простейшего из атомов — атома водорода.

Однако уже для следующего по сложности атома — атома гелия — добиться количественного согласия с опытом не удавалось, не говоря уже о более сложных атомах.

Дальнейшее развитие физики показало, что трудности теории Бора были связаны с её внутренней противоречивостью, так как в ней объединялись законы классической физики и *противоречащие* им постулаты Бора.

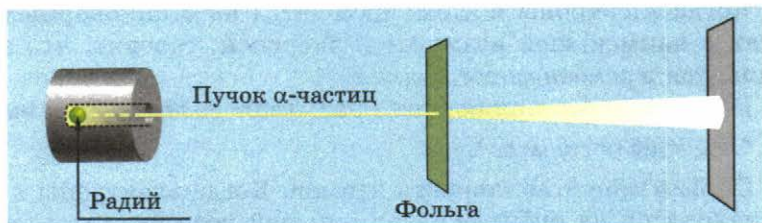
Несмотря на все трудности, теория Бора сыграла огромную роль в понимании явлений микромира, «приоткрыв завесу» над загадкой атома. Эта загадка оказалась одной из самых трудных за всю историю человечества: после появления теории Бора понадобилось больше десяти лет колоссальных усилий учёных нескольких стран, чтобы построить последовательную теорию явлений микромира — *квантовую механику*.

Об основных её положениях мы расскажем далее.



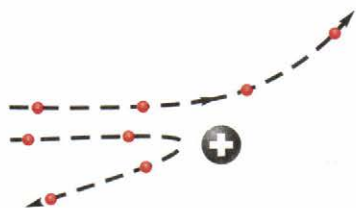
Строение атома

Опыт Резерфорда

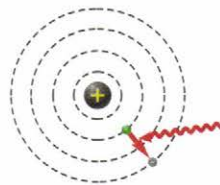
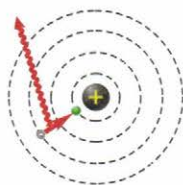
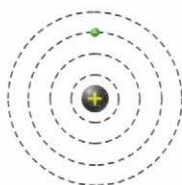


Открытие атомного ядра

Планетарная модель атома



Теория атома Бора



$$h\nu_{kn} = E_k - E_n$$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

3. При переходе электрона в атоме с одного стационарного уровня на другой был поглощён фотон с частотой $6 \cdot 10^{14}$ Гц. Как изменилась энергия атома?

§ 30. АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ

1. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

Спектры излучения

Как вы уже знаете, с помощью призмы или дифракционной решётки можно разложить белый свет в спектр со всеми цветами радуги.

Используя специальные приборы (спектроскоп и спектрограф, основным элементом которых является призма, а также дифракционную решётку), учёные исследовали спектры излучения различных тел.

Опыты показали, что свет с *непрерывным* спектром, подобным спектру Солнца, излучают *сильно нагретые твёрдые тела и жидкости*.

Спектр же сильно нагретого атомарного газа является *линейчатым*, то есть представляет собой совокупность ярких цветных линий на тёмном фоне.

Например, на рисунке 30.1 приведён спектр излучения атомарного водорода.



Рис. 30.1

А если внести в пламя газовой горелки кусочек поваренной соли, мы увидим в спектре излучения две очень близко расположенные яркие жёлтые линии (рис. 30.2). Эти линии представляют собой часть спектра излучения паров натрия, содержащегося в поваренной соли.



Рис. 30.2

В атомарных газах атомы изолированы друг от друга и излучают свет «поодиночке», поэтому линейчатая структура спектров атомарных газов свидетельствует о том, что *изолированные атомы испускают свет только с определёнными длинами волн*.

Спектры поглощения

Мы не случайно упомянули выше о ярких линиях излучения паров *натрия*. Как вы сейчас увидите, они сыграли особую роль в разгадке одной из загадок природы.

В начале 19-го века английский учёный У. Волластон обнаружил в непрерывном солнечном спектре тонкие *тёмные* линии (рис. 30.3).



Рис. 30.3

Происхождение этих тёмных линий оставалось загадкой в течение нескольких десятилетий: было непонятно, что может *задерживать* излучение именно с *определёнными* длинами волн?

В середине 19-го века немецкий учёный Г. Кирхгоф заметил, что положение двух близко расположенных *тёмных* линий в солнечном спектре точно совпадает с положением *ярких* жёлтых линий в спектре паров натрия. И Кирхгоф предположил, что близкие тёмные линии — результат *поглощения* солнечного света парами натрия, находящимися во внешней атмосфере Солнца.

Чтобы проверить это, учёный исследовал спектр белого света, прошедшего сквозь холодные пары натрия.

И в непрерывном спектре действительно появились *тёмные* линии, положение которых точно совпало с линиями излучения паров натрия!

? 1. Сравните спектры излучения и поглощения водорода, приведённые на рисунке 30.4. Какой вывод вы можете сделать?



Рис. 30.4

Вы, наверное, заметили, для спектров водорода линии поглощения точно соответствуют линиям испускания. Кирхгоф предположил, что сходная картина должна наблюдаться и для других веществ. И поставленные им опыты подтвердили, что

у атомов всех элементов линии поглощения точно соответствуют их линиям испускания.

Спектральный анализ

Спектр излучения (или поглощения) атома подобен «отпечаткам пальцев»: каждый химический элемент характеризуется своим *уникальным* спектром. Поэтому, исследуя спектры, можно с высокой точностью определять химический состав тел.

С помощью спектрального анализа удалось открыть также *новые химические элементы*. Некоторые из них были даже названы в соответствии с цветами ярких линий их спектра — так, рубидий характеризуется яркой рубиновой линией в спектре.

С помощью спектрального анализа определяют химический состав недоступных тел — например, Солнца и звёзд. Так, при изучении спектра солнечной атмосферы был открыт *гелий* (получивший название от греческого слова «гелиос» — солнце).

Лучи света от далёких галактик поведали нам «на языке атомных спектров» о расширении Вселенной. Более подробно мы расскажем об этом в последней главе учебника.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ

Объяснение линейчатых спектров в теории Бора

Как вы уже знаете из материала предыдущего параграфа, согласно постулатам Бора излучение и поглощение света атомом происходит только при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую.

При этом частота излучённого или поглощённого света может принимать только определённый ряд значений:

$$\nu_{kn} = \frac{|E_k - E_n|}{h},$$

где E_k и E_n — уровни энергии, соответствующие стационарным состояниям.

Так теория атома Бора объясняет *линейчатый* характер спектров излучения и поглощения атомов, а также то, что атомы каждого элемента излучают и поглощают свет с одними и теми же частотами, характерными только для этого элемента.

Энергетические уровни

Значения энергии электрона в атоме называют энергетическими уровнями. При этом энергию электрона задают обычно в электрон-вольтах (сокращённо эВ). В предыдущем параграфе вы уже познакомились с этой единицей энергии. Напомним, что $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Схематическое изображение энергетических уровней

При схематическом изображении энергетических уровней шкалу энергии обычно располагают вертикально, а сами уровни обозначают справа от этой шкалы горизонтальными отрезками. На рисунке 30.5 схематически изображены три энергетических уровня.

Если считать энергию *свободного* (удалённого от ядра на большое расстояние) покоящегося электрона равной нулю, то энергетические уровни *связанных* электронов (движущихся около ядра) должны соответствовать *отрицательным* значениям энергии. Объясним почему.

Чтобы оторвать электрон от ядра, надо совершить *положительную* работу, потому что электрон *притягивается* к ядру. Следовательно, для удаления электрона от ядра надо *увеличить* его энергию. После этого увеличения энергии электрон станет *свободным*, и, если он будет покоиться, его энергия будет равна *нулю*. Значит, энергия электрона «до отрывания», то есть энергия *связанного* электрона, меньше нуля.

На рисунке 30.6 в качестве примера изображён нулевой уровень энергии, соответствующий свободному электрону, а также уровень, соответствующий минимально возможной энергии электрона в атоме водорода ($-13,6 \text{ эВ}$).

Чтобы «оторвать» электрон от ядра атома водорода, находящегося в основном состоянии, то есть превратить этот атом в положительно заряженный ион, необходимо сообщить электрону энергию, равную $13,6 \text{ эВ}$. Поэтому её называют *энергией ионизации* атома водорода.

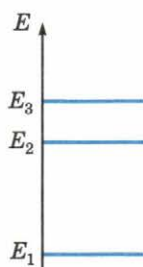


Рис. 30.5

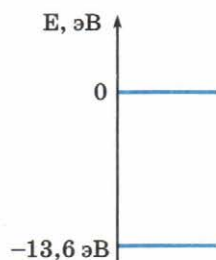


Рис. 30.6



Принцип Паули и таблица Менделеева

Когда учёные, изучив спектры излучения и поглощения атомов, нашли энергетические уровни электронов в атомах, выяснилось, что, даже когда атом находится в основном состоянии, далеко не все его электроны находятся на самом нижнем из возможных уровней. Оказалось, что электроны «заселяют» последовательно уровни, соответствующие всё большей и большей энергии.

И возник вопрос: почему же все электроны атома, излучив фотоны, не «падают» на *один и тот же* самый нижний уровень?

Ответ нашёл швейцарский физик В. Паули. Он предположил, что электроны подчиняются принципу запрета, который назвали впоследствии *принципом Паули*. Согласно принципу Паули на каждом уровне в атоме может находиться не более *двух* электронов.

Принцип Паули позволил понять природу периодической системы химических элементов (таблицы Менделеева).

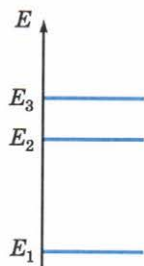


ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Спектры излучения
и поглощения



Энергетические
уровни атома



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

2. При переходе атома с уровня 2 на уровень 1 излучается фотон с длиной волны λ_{21} , а при переходе с уровня 3 на уровень 2 излучается фотон с длиной волны λ_{32} . Чему равна длина волны фотона λ_{13} , поглощаемого атомом при переходе с уровня 1 на уровень 3?

§ 31. ЛАЗЕРЫ. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

1. СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Спонтанное излучение света

Как вы уже знаете, поглотив фотон, атом переходит в возбуждённое состояние. Однако пребывает он в таком состоянии очень недолго: обычно уже через несколько *десятимиллионных* долей секунды атом самопроизвольно излучает один или несколько фотонов, переходя в основное состояние.

Такое излучение называют *спонтанным излучением*. Именно его мы и рассматривали в предыдущем параграфе.

Метастабильные состояния

Различные возбуждённые состояния атома отличаются один от другого не только энергией, но и *временем жизни*. Среди этих состояний есть такие, в которых атом пребывает в *десятки тысяч раз дольше*, чем в других. Состояния атома с особенно большим временем жизни называют *метастабильными*.

Именно эти состояния активно используют при работе лазера. Дело в том, что метастабильное состояние может сыграть роль ловушки: оказавшись в этом состоянии, атом «надолго застревает» в нём, так как время жизни этого состояния в десятки тысяч раз превосходит время жизни обычных возбуждённых состояний.

Благодаря этому в метастабильном состоянии с *одной и той же энергией* может оказаться очень много атомов.

Если «заставить» теперь эти атомы *одновременно* излучить фотоны, излучение будет чрезвычайно интенсивным и к тому же будет иметь определённую частоту.

Вынужденное излучение света

Но как «заставить» атом излучить фотон?

Это можно сделать, используя предсказанное в 1916 году А. Эйнштейном явление вынужденного излучения света.

Вы уже знаете, что атом может излучать свет только с определёнными частотами. Эйнштейн предсказал, что если на атом падает свет, частота которого *совпадает* с частотой света, который этот атом может излучить, вероятность излучения значительно увеличивается.

Излучение атомов под действием падающего света называют *вынужденным излучением*.

Замечательная особенность вынужденного излучения состоит в том, что излучённый атомом фотон имеет *точно такую же частоту и направление движения*, что и падающий на атом фотон.

Вынужденное излучение схематически изображено на рисунке 31.1.

Мы видим, что вследствие вынужденного излучения падающее на атом излучение как бы «удваивается»: к атому «приходит» один фотон, а «уходят» два точно таких же.

Если в данной среде много атомов находится в возбуждённом состоянии *с одной и той же энергией*, излучённые фотоны будут, в свою очередь, вынуждать другие атомы излучать точно такие же фотоны. И в результате интенсивность излучения может *лавинообразно нарастать*.

На этом, как мы сейчас увидим, и основан принцип действия лазеров.

Усиление падающей световой волны, обусловленное вынужденным излучением, впервые наблюдал на опыте советский физик В. А. Фабрикант в 1939 году.

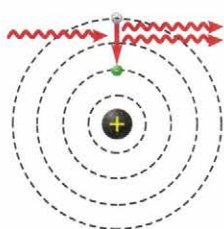


Рис. 31.1

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА

Квантовые генераторы

«Запустить» лавину вынужденного излучения можно и без внешнего излучения: фотон, спонтанно излученный одним из атомов самой среды, вынудит другой атом излучить *такой же* фотон, затем два этих фотона вынудят ещё два атома излучить ещё два *таких же* фотона и так далее.

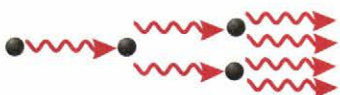


Рис. 31.2

При этом может возникнуть лавинообразный процесс (рис. 31.2). На этом основано действие *квантовых генераторов*.

Если излучение происходит в оптическом диапазоне, квантовые генераторы называют *лазерами*.

Вынужденное излучение для генерирования мощных электромагнитных волн впервые использовали в 1954 году советские физики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, а также американский физик Ч. Таунс.

Трёхуровневый лазер

При создании лазера часто используют систему трёх энергетических уровней атома, среди которых средний уровень является метастабильным, а нижний соответствует основному состоянию атома (рис. 31.3).

Под действием интенсивного внешнего излучения атомы переходят из основного состояния (уровень 1) в возбуждённое состояние (уровень 3, левая вертикальная стрелка). Время жизни в состоянии 3 очень мало, и поэтому вскоре многие атомы перейдут на метастабильный уровень 2 (этот переход показан наклонной стрелкой). Теперь в среде может начаться лавинообразный процесс генерации излучения (волнистые стрелки) при переходах с уровня 2 на основной уровень 1.

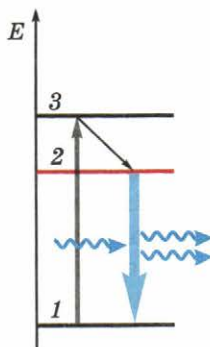


Рис. 31.3

Рубиновый лазер

Для того чтобы вынужденное излучение действительно породило лавину, необходимо, чтобы как можно больше атомов, находящихся в метастабильном состоянии, «почувствовали» падающее на них излучение. А для этого нужно *продлить время* пребывания излучения внутри вещества.

Рассмотрим, как это делается, на примере рубинового лазера. Кристалл рубина состоит из атомов алюминия и кислорода с небольшой примесью атомов хрома — именно атомы хрома и придают рубину его благородный цвет. Эти же атомы обладают и рассмотренной выше системой трёх энергетических уровней, средний из которых является метастабильным.

Из рубинового кристалла вытачивают стержень (со строго параллельными торцами!) и навивают на него трубку газоразрядной лампы, которую называют *лампой накачки* (рис. 31.4).



Рис. 31.4

Под действием света лампы накачки атомы хрома переходят с основного уровня 1 на уровень 3 (см. рис. 31.3), а затем — практически сразу — на метастабильный уровень 2. Переходы на этот уровень об-

условлены в основном передачей энергии кристаллической решетке.

В результате этих переходов накапливается большое число атомов на метастабильном уровне 2, то есть возникает, как говорят, *перенаселённость* метастабильного уровня 2.

Среда, в которой самым населённым является один из возбуждённых уровней атомов, называется *активной*. Такая среда обладает запасом энергии, который делает возможным лавинообразный процесс вынужденного излучения.

Но создать активную среду ещё недостаточно: если «вынужденно излучённые» фотоны *сразу же* вылетят из неё, лавина не возникнет. Для её возникновения надо каким-то образом «задержать» излучённые фотоны в среде. Но как это сделать? Ведь фотоны не остановишь: они всегда движутся со скоростью света.

Учёные догадались, что задержать фотоны всё-таки можно — для этого надо продлить их *путь* с помощью *отражения*.

С этой целью параллельные торцы кристалла покрывают тонким слоем серебра, делая их зеркальными. Отражаясь от торцов, фотоны, летящие вдоль оси кристалла, проходят через кристалл *многократно* — туда и обратно. При этом вследствие вынужденного излучения их число лавинообразно увеличивается, в результате чего в кристалле быстро нарастает излучение, *направленное вдоль оси кристалла* (рис 31.5, а).

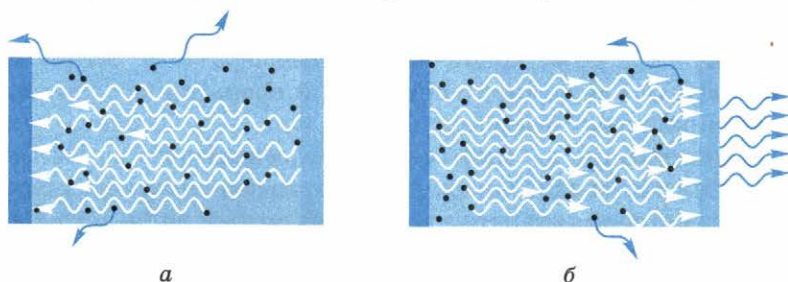


Рис. 31.5

Чтобы выпускать часть этого излучения наружу, один из торцов делают частично прозрачным. Выходящее из этого торца излучение и представляет собой луч лазера (рис 31.5, б).

Таким образом, все вылетающие из лазера фотоны имеют *одинаковую частоту и одно и то же направление*.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ

Многим из вас знаком узкий, как игла, луч лазерного фонарика (указки, брелка), далеко пробивающий ночную тьму и густой туман.

Учёные и инженеры сконструировали лазерный «фонарик», луч которого достаёт до Луны! Именно так и было наиболее точно измерено расстояние от Земли до Луны. Посланный с Земли луч лазера отразился от установленного астронавтами на поверхности Луны отражателя, а отражённый луч был зарегистрирован на Земле. По времени «путешествия» лазерного луча с Земли на Луну и обратно удалось очень точно определить пройденное им расстояние, так как скорость света измерена с большой точностью.

По своей интенсивности и направленности луч лазера не знает равных. С помощью лазерного луча сваривают металлические конструкции, он может быть использован как опаснейшее оружие в «звёздных войнах»¹.

Но лазерный луч замечателен не только своей мощностью. Он проявляет чудеса и в чрезвычайно миниатюрной работе: так, с помощью лазерного луча делают тончайшие хирургические операции — например, приваривают отслоившуюся сетчатку к главному дну.

Ещё более узкий лазерный луч записывает и считывает информацию с компакт-дисков в лазерных проигрывателях и компьютерах. Мы уже привыкли к лазерным проигрывателям и даже не подозреваем, что, когда мы слушаем музыку или смотрим фильм, крошечный луч лазера «стареется» всю, считывая с огромной скоростью информацию с узенькой дорожки на компакт-диске.

Использование лазеров совершило революцию в электронных средствах связи. Оказалось, что лазер можно использовать как мощный генератор высокочастотных волн, в том числе с частотой, равной частоте видимого света. И эта частота может использоваться в качестве несущей частоты при передаче радио- или телевизионных сигналов. Информационная ёмкость такого способа передачи информации многократно превосходит все предыдущие: так, расчёты показывают, что в одном лазерном луче может уместиться до 80 миллионов телевизион-

¹ Оружие подобного рода было описано в начале 20-го века русским писателем А. Н. Толстым в фантастическом романе «Гиперболоид инженера Гарина».

ных каналов или до 50 миллиардов одновременных телефонных разговоров!

С помощью лазеров удалось создать *трёхмерные* изображения, которые называются *голографическими*. Рассматривая голограмму под разными углами, вы можете видеть изображённый на ней предмет с *разных сторон*: например, на голограмме можно «заглядывать» за предметы, расположенные на переднем плане.

4. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц

Двойственную природу света, сочетающего свойства частиц и волн, называют *корпускулярно-волновым дуализмом*¹.

В 1923 году французский физик Л. де Бройль предположил, что сочетание волновых и корпускулярных свойств присуще не только свету, а вообще *всем* видам материи.

Согласно *гипотезе де Бройля*

длина λ волны, соответствующей частице, связана с импульсом p частицы соотношением

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где h — **постоянная Планка**.

Идеи де Бройля развил австрийский физик Э. Шрёдингер, написав знаменитое «уравнение Шрёдингера», которое описывает движение частицы-волны.

Опытное подтверждение волновых свойств частиц

В 1927 году американские физики К. Дэвиссон и Л. Джермер, а также английский физик Дж. Томсон² подтвердили на опыте волновые свойства электронов, наблюдали *дифракцию* электронов при прохождении сквозь кристалл и при отражении от кристалла. При этом длина «электронных волн» оказалась именно такой, какую предсказал де Бройль.

Гипотеза де Бройля получила впоследствии опытное подтверждение для *всех* частиц (в том числе для протонов и нейтронов — частиц, из которых состоят атомные ядра).

Так было доказано, что сочетание волновых и корпускулярных свойств действительно является *общим* свойством материи.

¹ От латинского «дуалис» — двойственный.

² Сын Дж. Дж. Томсона, открывшего электрон.

2. Вероятностный характер атомных процессов

Природа корпускулярно-волнового дуализма оказалась одной из самых волнующих загадок в истории физики. Как в одном и том же объекте могут сочетаться, казалось бы, несовместимые свойства *неделимых частиц* и *распределённых в пространстве волн*?

Решение этой проблемы предложил в 1925 году немецкий физик М. Борн, предположив, что законы природы в атомных масштабах носят *вероятностный* характер.

Идею Борна развили физики нескольких стран, построив последовательную теорию атомных процессов, которая получила название *квантовой механики*.

Чтобы понять основные идеи квантовой механики, необходимо познакомиться с понятием *вероятности*.

Слова «более вероятно» и «менее вероятно» часто используются в разговорном языке, и смысл этих слов понятен каждому.

Учёные ввели *количественную* меру вероятности. Вероятность какого-либо события равна отношению числа случаев, в которых это событие происходит, к общему числу случаев.

Например, событие, которое наступает *каждый* раз, имеет вероятность 1. А событие, которое происходит в *половине* всех возможных случаев, имеет вероятность 0,5 (скажем, выпадение монеты орлом). Событие же, которое не происходит *никогда*, имеет вероятность 0.

С понятием вероятности мы встречались при изучении движения молекул газов. Например, определить скорость каждой молекулы газа в какой-либо момент времени невозможно. Однако пользуясь представлением о вероятности, можно вычислить среднюю кинетическую энергию молекул.

Тщательный анализ опытов и теоретические исследования показали, что *атомные процессы имеют в своей основе вероятностную природу*. Поэтому физический смысл имеет только вероятность обнаружить электрон в данный момент времени в определённой точке пространства или *вероятность* того, что в данный момент времени скорость электрона равна определённому значению.

Как же вероятностный характер атомных явлений объясняет сочетание волновых и корпускулярных свойств в одном объекте? Что представляют собой частицы-волны?

Выяснилось, что «волны де Бройля» — это как бы «волны вероятности», определяющие *вероятность* обнаружить частицу в данной точке пространства: чем больше амплитуда волны, тем больше эта вероятность.

Согласно квантовой механике движение частицы представляет собой распространение «волны вероятности». Поэтому и проявляются *волновые* свойства частиц, то есть явления интерференции и дифракции.

Однако в любом опыте по *обнаружению* частицы она с определённой вероятностью оказывается *целиком* в одном месте пространства, то есть проявляет свойство *корпускулы*.

На рисунке 31.6 схематически изображены некоторые «электронные волны» в атоме водорода: более тёмная окраска соответствует областям, в которых вероятность нахождения электрона больше. Рассматривая эти рисунки, учтите, что «электронная волна» определяет *вероятность* нахождения *целого* электрона в той или иной точке.



Рис. 31.6

5. СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКОЙ

Соотношение неопределённостей Гейзенберга

Согласно классической механике координаты тела и его скорость могут быть измерены *одновременно*, причём *с любой точностью*.

Но для микрочастиц с очень малой массой или энергией это неверно. Опыты и расчёты свидетельствуют, что измерить импульс частицы и её координаты одновременно невозможно.

Взаимные неопределённости Δx и Δp в значении координаты частицы x и её импульса p определяются *постоянной Планка*. Как показывают расчёты,

произведение неопределённостей импульса частицы и её координаты не меньше постоянной Планка:

$$\Delta p \Delta x \geq h. \quad (2)$$

Это соотношение впервые было сформулировано немецким физиком В. Гейзенбергом.

Почему соотношение неопределённостей проявляет себя только в микромире?

Это объясняется тем, что постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с чрезвычайно мала по сравнению с макроскопическими величинами.

Применим, например, соотношение неопределённостей к телу массой 1 кг. Мы увидим, что если координата тела определена с точностью до размеров атома (10^{-10} м), то неопределённость в значении его скорости будет составлять около 10^{-23} м/с. Столь малую неопределённость в значении скорости обнаружить невозможно: она лежит далеко за пределами точности всех измерительных приборов.

Рассмотрим теперь соотношение неопределённостей для электрона. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг $\approx 10^{-30}$ кг, поэтому для электрона произведение неопределённостей скорости и координаты $\Delta v \Delta x \geq h/m_e \approx 10^{-3}$ м²/с.

Когда электрон локализован в пределах атома, для него неопределённость в координате $\Delta x \approx 10^{-10}$ м. Тогда из соотношения $\Delta v \Delta x \approx 10^{-3}$ м²/с следует, что неопределённость скорости электрона в атоме $\Delta v \approx 10^7$ м/с. Расчёты показывают, что эта величина сравнима со скоростью электрона, находящегося на одной из стационарных орбит в «атоме Бора».

Как мы видим, соотношение неопределённостей в атомном масштабе играет огромную роль: по существу, именно это соотношение и определяет сам *атомный масштаб*.

Принцип соответствия Бора

Проанализировав соотношение между квантовой и классической механикой, Н. Бор сформулировал *принцип соответствия*, который стал одним из общих принципов научного познания.

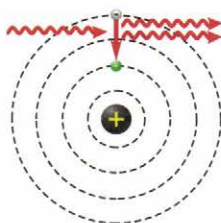
Согласно этому принципу новая физическая теория, описывающая более широкий круг явлений, не отвергает прежнюю теорию, а включает её в качестве *предельного случая*.

Например, классическая механика является предельным случаем квантовой механики: для тел с достаточно большой массой законы квантовой механики соответствуют законам классической механики.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

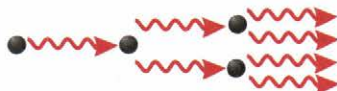
Индукцированное излучение



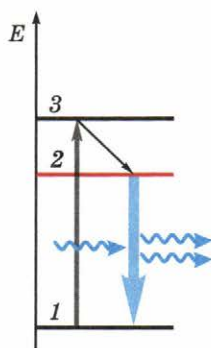
Устройство лазера



Принцип действия лазера



Трёхуровневый лазер



Квантовая механика

Гипотеза де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Соотношение неопределённостей
Гейзенберга

$$\Delta p \Delta x \geq h.$$

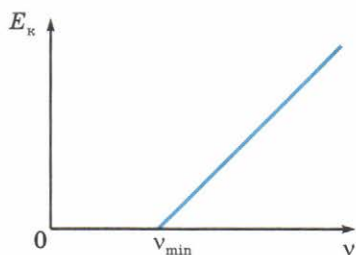


ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Лазер излучает свет с длиной волны 0,63 мкм. Сколько фотонов излучает лазер каждую секунду, если мощность его излучения равна 40 мВт?
2. Пучок света диаметром 2 мм, выходящий из лазера, падает перпендикулярно на полностью поглощающую поверхность. Мощность излучения лазера 120 мВт. Чему равно давление светового пучка?



Фотоэффект



Уравнение Эйнштейна
для фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$

Красная граница
фотоэффекта

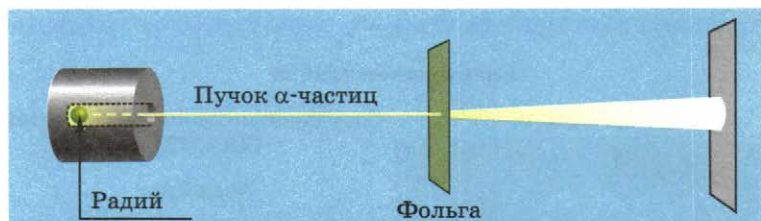
$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

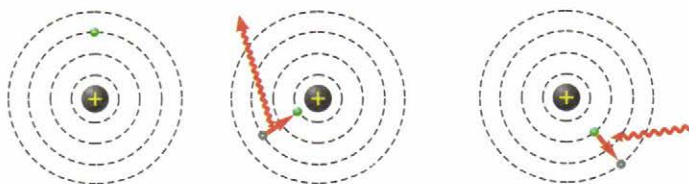
Энергия фотона $E = h\nu$

Импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c}$

Опыт Резерфорда

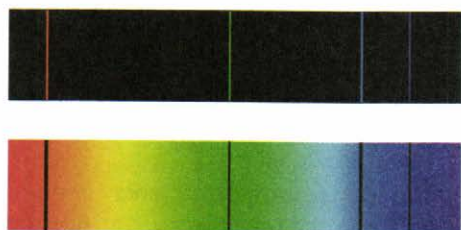


Теория атома Бора

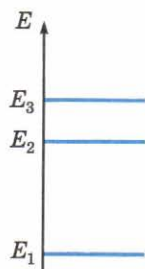


$$h\nu_{kn} = E_k - E_n$$

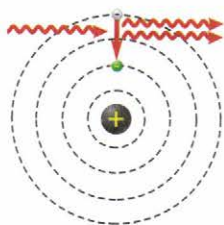
Спектры излучения
и поглощения



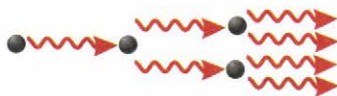
Энергетические
уровни атома



Индукцированное излучение



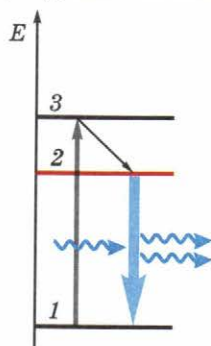
Принцип действия лазера



Устройство лазера



Трёхуровневый лазер



Квантовая механика

Гипотеза де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Соотношение неопределённостей
Гейзенберга

$$\Delta p \Delta x \geq h.$$

§ 32. АТОМНОЕ ЯДРО

1. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Открытие протона

После открытия атомного ядра возник вопрос: не является ли оно *составным*? Может быть, атомное ядро тоже состоит из каких-то частиц?

К изучению структуры ядра приступил уже известный вам Резерфорд. Он применил знакомый вам метод: бомбардировку α -частицами.

И этот метод снова принёс открытие: в 1919 году Резерфорд обнаружил, что при бомбардировке атомов азота вылетают частицы, как две капли воды похожие на ядра атомов водорода — имеющие такие заряд и массу. Вскоре выяснилось, что это и есть ядра водорода. Резерфорд назвал их *протонами*¹.

Выяснилось, что протон имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), но масса протона оказалась примерно в 1800 раз больше массы электрона ($1,67 \cdot 10^{-27}$ кг).

Могут ли все ядра состоять только из протонов?

От этого заманчиво простого предположения пришлось отказаться практически сразу. И вот почему.

Если бы все ядра состояли только из протонов, масса ядра была бы пропорциональна его заряду, так как и масса, и заряд ядра были бы пропорциональны числу протонов. Однако на самом деле такой пропорциональности нет.

Так, масса ядра гелия (α -частицы) в *4 раза* больше массы ядра атома водорода, а заряд ядра гелия всего лишь в *2 раза* больше заряда ядра водорода.

Кроме того, выяснилось, что существуют ядра с одинаковым зарядом, но разными массами. Такие ядра назвали *изотопами*². Существование изотопов также противоречило пред-

¹ От греческого слова «протос» — первый.

² От греческих слов «изос» — одинаковый и «топос» — место: элементы, имеющие ядра с одинаковым электрическим зарядом, занимают одно и то же место в периодической системе элементов Менделеева.

положению о том, что ядра состоят только из протонов: ведь в таком случае ядра с разной массой обязательно должны были бы иметь и разный заряд.

Открытие нейтрона

В массах ядер обнаружилась любопытная закономерность: массы всех ядер, в том числе изотопов, с высокой точностью были кратны массе протона.

Это навело Резерфорда на мысль, что атомное ядро состоит из частиц двух типов — протонов и нейтральных частиц с массой, примерно равной массе протона.

Но как «поймать» эти нейтральные частицы? Ведь их очень трудно *зарегистрировать* — из-за того, что нейтральные частицы не испытывают электрических взаимодействий, они легко пронизывают вещество, или, как говорят, обладают *большой проникающей способностью*.

Поэтому открытия предсказанных Резерфордом нейтральных частиц пришлось ждать целых 12 лет. Но их всё-таки обнаружили, причём именно по «главной улике» — большой проникающей способности.

При облучении α -частицами атомов бериллия было зарегистрировано излучение, пронизывающее 20-сантиметровую свинцовую плиту, которая задерживала все другие виды излучений. Проходя затем через парафин, это излучение выбивало протоны большой энергии, и уже по свойствам вылетевших протонов были установлены свойства неуловимых нейтральных частиц.

Ученик Резерфорда Джеймс Чедвик доказал, что эти частицы являются предсказанными Резерфордом нейтральными «двойниками» протона. Вследствие их нейтральности их называли *нейтронами*.

В отличие от протона и электрона нейтрон не является стабильной частицей, то есть не может существовать в свободном состоянии сколь угодно долго. Среднее время жизни нейтрона — около 15 минут, после чего он распадается на протон, электрон и ещё одну нейтральную частицу, которая называется *антинейтрино*. Эта частица обладает намного большей проникающей способностью, чем нейтрон. *Нейтрино* и *антинейтрино* (не очень высокой энергии) обладают настолько большой проникающей способностью, что легко пронизывают земной шар (рис. 32.1). Но и эти частицы физики всё-таки смогли обнаружить.

Хотя «неуловимость» нейтрона задержала его открытие, она оказалась самым ценным его свойством с точки зрения практического применения.

Дело в том, что, как мы увидим ниже, именно благодаря высокой проникающей способности нейтроны оказались наиболее подходящим средством для «разжигания» ядерных реакций в реакторах.



Рис. 32.1

Протонно-нейтронная модель ядра

Сразу же после открытия нейтрона советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра*.

Согласно этой модели

ядра атомов состоят из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, которые получили общее название — нуклоны.

На рисунке 32.2 схематически представлена структура наиболее лёгких ядер. Первые три ядра — изотопы водорода (собственно водород, дейтерий и тритий). Четвёртое и пятое ядра — изотопы гелия. Шестое — ядро лития.

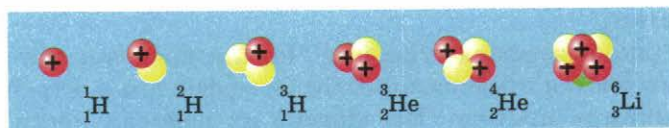


Рис. 32.2

Количество Z протонов в ядре называют *зарядовым числом*.

Поскольку каждый протон имеет заряд e (равный по модулю заряду электрона), заряд ядра равен Ze .

Зарядовое число равно номеру химического элемента в периодической системе элементов Менделеева. Зарядовым числом определяются химические свойства элемента.

Число нейтронов в ядре обозначают N .

Величина $A = Z + N$, равная общему числу нуклонов в данном ядре, называется *массовым числом*. Массовое число опре-

деляет относительную атомную массу химического элемента: она равна произведению массового числа на атомную единицу массы¹.

Ядро атома обозначают так же, как и соответствующий химический элемент, ставя перед ним вверху — массовое число, а внизу — зарядовое число: если химический элемент обозначить X, то соответствующее ядро обозначается A_ZX .

? 1. Как обозначают ядро углерода с массовым числом 12 и зарядовым числом 6?

? 2. Как обозначают ядро гелия (α -частица)?

На приведённом выше рисунке 32.2 рядом со схематическими изображениями ядер указаны их обозначения. Протон и нейтрон обозначают соответственно как 1_1p и 1_0n .

2. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Удержать в очень малом ядре одноимённо заряженные и потому отталкивающиеся протоны могут только очень большие силы притяжения между нуклонами. Эти силы назвали *ядерными*.

Свойства ядерных сил изучают с помощью столкновений частиц высоких энергий, поэтому физику атомного ядра и физику элементарных частиц называют также *физикой высоких энергий*.

Основные свойства ядерных сил

Во-первых, ядерные силы *очень велики*: на расстояниях, сравнимых с размерами нуклонов, они примерно в 100 раз больше электрических сил. Только благодаря этому ядерные силы и удерживают вместе одноимённо заряженные протоны.

Во-вторых, ядерные силы являются *короткодействующими*, то есть имеют очень малый радиус действия — порядка 10^{-14} – 10^{-15} м (размеры ядра).

Этим ядерные силы кардинально отличаются от сил электрического взаимодействия, которые заметно проявляются на существенно больших расстояниях.

Как мы увидим ниже, размеры ядер определяются именно радиусом действия ядерных сил.

¹ Напомним, что атомная единица массы равна 1/12 массы атома углерода ${}^{12}_6C$.

И наконец, силы, действующие между двумя нуклонами, не зависят от их электрического заряда: два протона взаимодействуют друг с другом так же, как протон с нейтроном или два нейтрона.

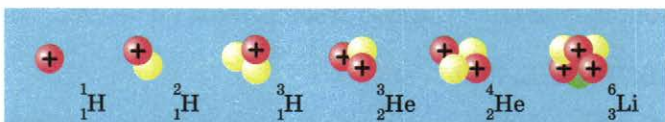
Это свойство ядерных сил называется *зарядовой независимостью*. Оно позволяет рассматривать протон и нейтрон как два состояния одной и той же частицы — *нуклона*.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Атомное ядро

Атомное ядро состоит из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов



Обозначение атомного ядра A_ZX

$$A = Z + N$$

A — массовое число

N — число нейтронов

Z — зарядовое число



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

3. Два ядра имеют одинаковое массовое число. Могут ли заряды этих ядер быть различными? Обоснуйте ваш ответ.
4. Найдите с помощью таблицы Менделеева несколько элементов, для ядер которых массовое число в 2 раза больше зарядового числа. Каково соотношение между числом протонов и числом нейтронов в таких ядрах?
5. Два ядра имеют различные заряды. Могут ли эти ядра быть изотопами одного и того же химического элемента?

§ 33. РАДИОАКТИВНОСТЬ

1. ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

В 1896 году французский физик А. Беккерель обнаружил, что соли урана самопроизвольно испускают лучи, которые засвечивают фотопластинку.

В ближайшие несколько лет французские физики супруги М. Склодовская-Кюри (приехавшая из Польши) и П. Кюри установили, что подобным свойством обладают атомы и некоторых других элементов. По предложению супругов Кюри самопроизвольное излучение ядер атомов назвали *радиоактивностью*¹.



Мария Склодовская-Кюри
1867–1934



Пьер Кюри
1859–1906

Самым же замечательным открытием супругов Кюри было открытие нового химического элемента, который назвали *радием*. Радий содержится в урановой руде в чрезвычайно малых количествах, и чтобы добыть всего *одну десятую грамма радия*, супруги Кюри проделали титаническую работу.

Засучив рукава и не сомневаясь в успехе, будущие лауреаты Нобелевской премии день и ночь размешивали в огромных чанах урановую смолу и ставили опыт за опытом.

Результат превзошел все ожидания: излучение радия в миллионы раз превосходило излучение всех ранее изученных элементов: крошечная крупинка радия массой 0,1 г выделяла в течение часа энергию, равную 58 Дж.

¹ От латинского слова *radio* — излучать.

? 1. На какую высоту можно было бы забросить футбольный мяч массой 450 г, совершив работу, равную 58 Дж?

Такую огромную (для её размера) энергию крупинка радия выделяла час за часом, оставаясь, казалось бы, совершенно неизменной.

Впору было усомниться в справедливости основного закона физики — закона сохранения энергии!

Дальнейшие исследования показали, что при выделении энергии изменения всё-таки происходят: атомы радия превращаются в атомы инертного газа радона. Но это происходит довольно медленно: за 1600 лет распадается половина ядер радия.

? 2. На какую высоту можно было бы поднять слона массой 4 т, совершив работу, численно равную энергии, выделяющейся в результате распада половины ядер радия, содержащихся в крупинке массой 0,1 г?

Является ли радиоактивность редким явлением?

Дальнейшие исследования показали, что радиоактивность — скорее правило, чем исключение: нестабильны, то есть *радиоактивны*, около 90% ядер известных изотопов. Так, нестабильны все ядра с зарядовым числом $Z > 82$, то есть стабильным ядром с наибольшим числом протонов является ядро свинца ($Z = 82$).

И всё же в природе существуют элементы, ядра которых имеют $Z > 82$ — например, инертный газ радон ($Z = 86$) или уран ($Z = 92$). Да и радий удалось обнаружить, хотя его зарядовое число равно 88. Как это объяснить?

Дело в том, что время жизни некоторых нестабильных ядер настолько велико, что они просто не успели распасться со времени своего образования: так, время жизни изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ исчисляется миллиардами лет¹.

Другие же нестабильные ядра, к числу которых относятся ядра радия и радона, сохраняются в природе только потому, что они постоянно возникают при радиоактивных распадах более тяжёлых ядер — в частности, урана.

В реакторах и на ускорителях физики получают сегодня нестабильные ядра с зарядовым числом $Z > 100$.

¹ Когда и при каких условиях образовались химические элементы, мы расскажем в последней главе учебника.

Нестабильными являются не только ядра с большим Z . Среди ядер с небольшим зарядовым числом также есть нестабильные. Например, нестабильны изотопы углерода $^{14}_6\text{C}$ и $^{11}_6\text{C}$. Среднее время жизни первого из них составляет тысячи лет, а второго — десятки минут.

2. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Какие частицы вылетают из ядра при радиоактивном распаде?

Чтобы найти ответ на этот вопрос, Резерфорд поместил пучок вылетающих из ядра частиц в сильное магнитное поле. Схема этого опыта представлена на рисунке 33.1.

Из узкого канала, на дне которого находится частица радия, выходит направленный пучок излучения и попадает в область сильного магнитного поля.

Как вы знаете, в магнитном поле на движущиеся заряженные частицы действует сила Лоренца. Положительно заряженные частицы она отклоняет в одну сторону, а отрицательно заряженные — в противоположную. Поэтому знак заряда частиц можно определить по тому, в какую сторону они отклоняются.

А отношение заряда частицы к её массе можно найти, измерив радиус дуги, по которой движется частица в магнитном поле.

В опыте, поставленном Резерфордом, пучок излучения расщеплялся на три пучка, которые Резерфорд назвал α -, β - и γ -лучами. Дальнейшие исследования показали, что

α -лучи — это поток ядер гелия ^4_2He ;

β -лучи — поток быстрых электронов;

γ -лучи — поток фотонов большой энергии.

Электроны обозначают $^0_{-1}e$, а фотоны большой энергии называют γ -квантами.

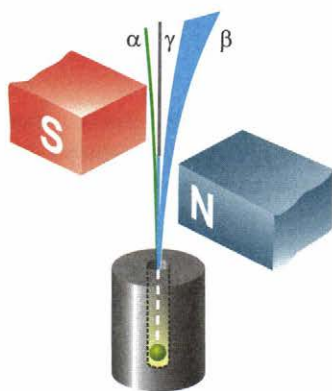


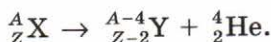
Рис. 33.1

Правило смещения

Найдём, как изменяются массовое и зарядовое числа ядра при α -распаде (испускании α -частиц) и β -распаде (испускании электронов).

? 3. Объясните, почему при α -распаде ядра его массовое число уменьшается на 4, а зарядовое — уменьшается на 2.
Подсказка. Учтите, что α -частица — ядро гелия.

? 4. Объясните, почему уравнение α -распада в общем виде можно записать так:



Таким образом, при α -распаде ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится на две клетки ближе к началу таблицы Менделеева.

? 5. Запишите уравнение α -распада радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, при котором ядро радия превращается в ядро радона ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (рис. 33.2).

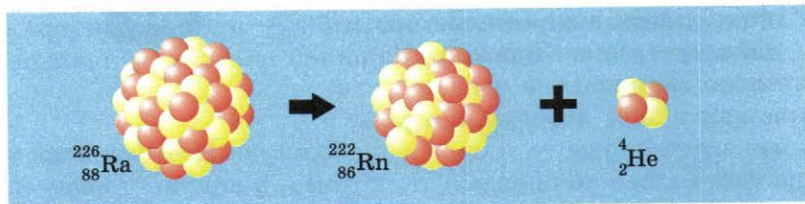
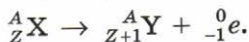


Рис. 33.2

β -распад ядра обусловлен тем, что один из нейтронов распадается на протон, электрон и антинейтрино.

? 6. Объясните, почему при β -распаде ядра его массовое число не изменяется, а зарядовое увеличивается на 1.

? 7. Объясните, почему уравнение β -распада в общем виде можно записать так (без учёта антинейтрино):



Мы видим, что при β -распаде ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится на одну клетку дальше от начала таблицы Менделеева.

8. Запишите уравнение β -распада радиоактивного изотопа свинца ${}_{82}^{214}\text{Pb}$, при котором ядро свинца превращается в ядро висмута ${}_{83}^{214}\text{Bi}$.

Заметим, наконец, что при γ -излучении из ядра вылетает фотон, не имеющий электрического заряда.

9. Объясните, почему в результате γ -излучения массовое и зарядовое числа ядра не изменяются.

10. Остаётся ли ядро после испускания γ -излучения ядром того же самого химического элемента? Становится ли оно изотопом этого же элемента, но с другим массовым числом?

Закон радиоактивного распада

В результате радиоактивного распада число радиоактивных ядер данного изотопа постепенно уменьшается со временем.

Опыт показывает, что

для каждого вида радиоактивных изотопов существует определённый период полураспада — промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа атомов.

Будем обозначать период полураспада T .

Например, период полураспада изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ равен 4,5 миллиарда лет, а изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$ — «всего» 700 миллионов лет.

Период полураспада радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ по геологическим меркам очень мал: «всего лишь» 1600 лет. Радий существует сегодня на Земле только благодаря тому, что он постоянно возобновляется при радиоактивном распаде урана.

Самый долгоживущий изотоп радона имеет период полураспада чуть меньше 4 суток, но этот инертный газ постоянно присутствует в земной атмосфере, так как он образуется при распаде урана и радия в недрах Земли и просачивается сквозь почву в атмосферу.

Вредный для здоровья радон скапливается в плохо проветриваемых помещениях — помните об этом.

Найдём, по какому закону уменьшается со временем число атомов N данного изотопа вследствие радиоактивного распада.

Обозначим число атомов в начальный момент (при $t = 0$) как N_0 , то есть $N(0) = N_0$.

Через время $t = T$, равное периоду полураспада, число атомов будет вдвое меньше начального, поэтому $N(T) = \frac{N_0}{2}$. По истечении каждого следующего промежутка времени T число атомов уменьшается вдвое, поэтому $N(2T) = \frac{N_0}{2^2}$, $N(3T) = \frac{N_0}{2^3}$ и так далее.

? 11. Объясните, почему через промежуток времени $t = nT$ останется $N(nT) = N_0 \cdot 2^{-n}$ атомов.

Это соотношение можно обобщить и на нецелые значения n , воспользовавшись тем, что $n = \frac{t}{T}$. Отсюда следует

закон радиоактивного распада:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

На рисунке 33.3 приведён пример графика закона радиоактивного распада для случая, когда период полураспада равен 1 ч. Через 1 ч остаётся 1/2 часть первоначального числа ядер, через 2 ч — 1/4 часть и т. д.

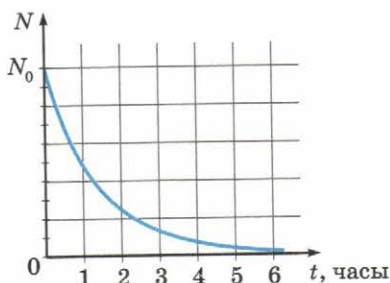


Рис. 33.3

? 12. Какая часть первоначального числа атомов останется:

- а) через 10 ч после начала наблюдения?
- б) через сутки после начала наблюдения?

Вероятностный характер закона радиоактивного распада

Согласно закону радиоактивного распада число атомов, распавшихся в следующую секунду, зависит только от числа атомов в настоящий момент, а не от их «возраста». По образному выражению одного физика, «атомы не стареют», то есть все атомы, существующие в данный момент, имеют одинако-

вые шансы распастся в течение ближайшей секунды — как те, которые образовались много лет назад, так и те, которые образовались всего лишь минуту назад.

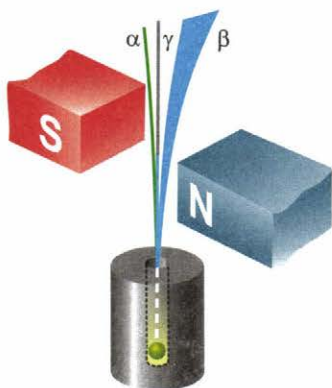
А это означает, что распад атомного ядра происходит всегда *случайно*. Как вы уже знаете, именно такой — случайный, или *вероятностный*, — характер процессов предсказывается *квантовой механикой*. И хотя невозможно предсказать, когда произойдет распад данного *конкретного* атома, можно с большой точностью предсказать, каково будет *среднее* число атомов, распавшихся за данный промежуток времени, для *большого* числа атомов.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Радиоактивность

Виды радиоактивных излучений

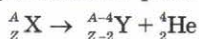


α-лучи — ядра гелия ${}^4_2\text{He}$

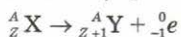
β-лучи — электроны ${}^0_{-1}e$

γ-лучи — фотоны (γ-кванты)

Уравнение α-распада

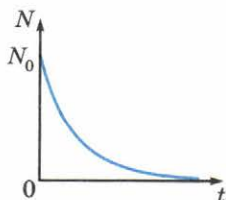


Уравнение β-распада



Закон радиоактивного распада

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$





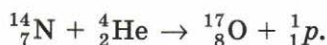
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

13. Ядро какого элемента образуется в результате α -распада полония-212?
14. При β -распаде ядра какого элемента образовался висмут-210?
15. После двух последовательных α -распадов ядра некоторого элемента образовалось ядро ${}_{84}^{216}\text{Po}$. Какое это было ядро?
16. Какое ядро образуется из ядра изотопа урана ${}_{92}^{233}\text{U}$ после шести α -распадов и трёх β -распадов?
17. В результате нескольких радиоактивных распадов ядро атома ${}_{90}^{232}\text{Th}$ превратилось в ядро ${}_{83}^{212}\text{Bi}$. Сколько и каких видов распадов произошло в этом процессе?
18. Могут ли различные изотопы одного и того же элемента иметь различные периоды полураспада? Приведите пример из учебника, подтверждающий ваш ответ.
19. Период полураспада некоторого изотопа равен 1 с. Какая часть первоначальных ядер останется через 5 с?
20. Чему равен период полураспада изотопа, если за сутки распадается:
 - а) 0,9 начального числа ядер?
 - б) 0,75 начального числа ядер?
 - в) 0,001 начального числа ядер?
21. Период полураспада радиоактивного йода-131 составляет 8 суток. За какой промежуток времени число ядер этого изотопа йода уменьшится в 1000 раз?

§ 34. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДЕР

1. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Как вы уже знаете, в конце 19-го века была открыта радиоактивность — явление *самопроизвольного* распада атомных ядер. А в 1919 году Резерфорд впервые осуществил *искусственное* превращение атомных ядер: при бомбардировке азота α -частицами ядро азота превращалось в ядро изотопа кислорода с испусканием протона:



Изменения атомных ядер при взаимодействии их друг с другом или другими частицами называют *ядерными реакциями*.

? 1. При бомбардировке ядра лития быстрыми протонами возникают две α -частицы. Запишите уравнение этой ядерной реакции.

Ядерные реакции при столкновениях ядер

Напомним, что ядерные силы характеризуются очень малым радиусом действия.

Поэтому для того, чтобы в результате столкновения двух ядер могла произойти ядерная реакция, необходимо сблизить ядра на *очень малое расстояние*, потому что только на малом расстоянии между ядрами нуклоны этих ядер будут взаимодействовать друг с другом посредством *ядерных сил*.

Однако между положительно заряженными ядрами существуют большие электростатические силы *отталкивания*. Поэтому сблизиться на достаточно малое расстояние могут только ядра, сближающиеся с *большой скоростью*. Это весьма существенное обстоятельство не позволяет пока человечеству в полной мере использовать ядерную энергию. Далее мы расскажем об этом подробнее.

Из-за электростатического отталкивания ядер первые ядерные реакции удалось осуществить только тогда, когда в распоряжении учёных оказались образующиеся при радиоактивных распадах α -частицы с большой кинетической энергией.

Ядерные реакции на нейтронах

Вскоре после долгожданного открытия нейтрона итальянский физик Э. Ферми догадался, что именно трудноуловимые

нейтроны могут стать наиболее подходящими для реализации искусственных превращений атомных ядер.

Так как нейтрон не имеет электрического заряда, положительно заряженное ядро не отталкивает его, благодаря чему он может проникнуть в ядро и вызвать ядерную реакцию.

Как было установлено впоследствии (в том числе самим Ферми), наиболее эффективными для осуществления ядерных реакций являются *медленные нейтроны*.

Выделение и поглощение энергии при ядерных реакциях

При ядерных реакциях происходит выделение или поглощение энергии — суммарная кинетическая энергия ядер и частиц после реакции отличается от их кинетической энергии до реакции.

Так, в первом из приведённых выше примеров (бомбардировка азота α -частицами) суммарная кинетическая энергия протона и ядра кислорода *меньше* кинетической энергии α -частицы, налетающей на покоящийся атом азота, то есть происходит *поглощение* энергии.

Во втором же примере, предложенном в задании 1 (бомбардировка лития протонами), суммарная кинетическая энергия образовавшихся ядер гелия (α -частиц) *больше* кинетической энергии налетающего протона, то есть в такой реакции происходит *выделение* энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что при ядерных реакциях *энергия превращается из одного вида в другой*: при поглощении энергии кинетическая энергия начальных частиц частично превращается во внутреннюю энергию ядра, а при выделении энергии — начальная внутренняя энергия ядра частично превращается в кинетическую энергию образующихся частиц.

Из курса химии вы уже знаете, что химические реакции также могут идти с поглощением и выделением энергии. Однако выделение энергии при ядерных реакциях в *миллионы раз больше*: так, при делении ядер одного *грамма* урана выделяется столько же энергии, сколько при сгорании трёх *тонн* угля.

2. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Выделение или поглощение энергии в ядерных реакциях обусловлено «перестройкой» взаимодействующих нуклонов в ядрах — при этом изменяется энергия их взаимодействия. Расскажем об этом подробнее.

Как вы уже знаете, между нуклонами в ядре действуют огромные ядерные силы притяжения. Поэтому для того, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны, необходимо *совершить работу*, то есть *сообщить ядру некоторую энергию*.

Энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра.

Согласно закону сохранения энергии такая же энергия *выделяется* при образовании ядра из отдельных нуклонов.

Значение энергии связи ядра трудно рассчитать теоретически, однако тут приходит на помощь уже известное вам соотношение между массой m и энергией покоя E_0 , открытое А. Эйнштейном:

$$E_0 = mc^2.$$

Из этого соотношения следует, что, когда энергия покоя тела изменяется на ΔE , его масса изменяется на

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Для явлений, которые физики изучали до начала 20-го века, открытое Эйнштейном соотношение между массой и энергией не поддавалось опытной проверке: например, масса одного литра воды при нагревании от 0°C до 100°C увеличивается примерно на $5 \cdot 10^{-12}$ кг.

Однако Эйнштейн предвидел, что в случаях, когда энерговыделение особенно велико (как пример он привёл именно распад радия!), уменьшение суммарной массы продуктов реакции по сравнению с начальной суммарной массой частиц и ядер может быть заметным.

Открытое Эйнштейном соотношение между массой и энергией стало основным способом измерения энергии связи атомных ядер.

Энергия связи и дефект масс

Из-за энергии связи масса ядра $M_{\text{я}}$ *меньше* суммы масс составляющих его нуклонов. Разность $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$ называют *дефектом масс*. Из соотношения $E = mc^2$ следует, что энергия связи ядра связана с дефектом масс соотношением

$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2. \quad (1)$$

Массы ядер и нуклонов удобно выражать в атомных единицах массы (а.е.м.). Напомним, что атомная единица массы равна $1/12$ массы атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$, или $1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг. Вычислим в качестве примера энергию связи именно этого ядра¹.

Массы протона и нейтрона в атомных единицах массы равны соответственно $m_p = 1,00728$ а.е.м. и $m_n = 1,00866$ а.е.м. Подставляя эти значения масс в приведённую выше формулу для дефекта масс и учитывая, что для изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$ $M_{\text{я}} = 12$, получаем $\Delta M = 0,096$ а.е.м.

? 2. Используя формулу (1), найдите, какая энергия выделилась бы при образовании *двух граммов* углерода из отдельных нуклонов. Сколько угля надо сжечь, чтобы выделилась такая же энергия? Удельную теплоту сгорания угля примите равной 30 МДж/кг.

Впрочем, частица «бы» в предыдущем задании является излишней, так как все ядра углерода действительно образовались в звёздах из отдельных нуклонов — и при этом *действительно* выделилось то огромное количество энергии, которое вы оценили выше. Об этом мы расскажем в последней главе учебника.

Сравните крошечный кусочек угля массой 2 г и вагон угля — и вы получите представление о том, какая ничтожная часть содержащейся в угле энергии выделяется вследствие его сжигания.

3. РЕАКЦИИ СИНТЕЗА И ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Удельная энергия связи

Для расчёта «энергетики» ядерных реакций необходимо знать энергию связи, приходящуюся на *один* нуклон. Она называется *удельной энергией связи*.

Из закона сохранения энергии следует, что энергия выделяется в ядерных реакциях тогда, когда внутренняя энергия ядра уменьшается.

Это значит, что при таких реакциях удельная энергия связи в ядрах — продуктах реакции — должна быть *больше*, чем

¹ Для упрощения расчёта мы будем пренебрегать массой электронов атома: её учёт приводит к несущественной поправке.

в исходных ядрах (при этом в образовавшихся ядрах нуклоны как бы сближаются по сравнению с исходными ядрами и начинают сильнее взаимодействовать между собой).

Рассмотрим теперь полученный из многочисленных опытов график зависимости удельной энергии связи от массового числа ядра (рис. 34.1).

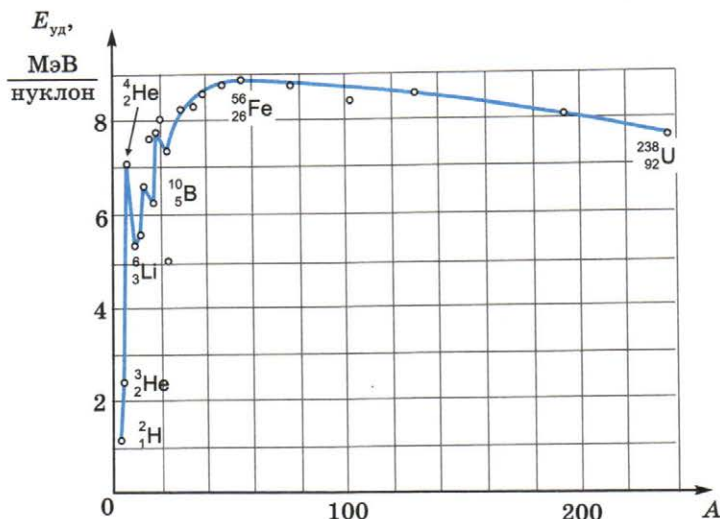


Рис. 34.1

Реакции синтеза

Прежде всего обратим внимание на пик, соответствующий ядру гелия ${}^4_2\text{He}$. Он означает, что это ядро (α -частица) характеризуется намного большей удельной энергией связи, чем ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$.

И действительно, в реакции



выделяется очень большая энергия.

Именно с этой реакцией, как мы увидим далее, и связывают учёные главные надежды на преодоление человечеством энергетического кризиса в будущем.

Образование одного ядра из двух или нескольких менее массивных ядер называют *реакцией синтеза*.

Для осуществления реакции синтеза необходимо сблизить ядра на очень малое расстояние, чтобы между ними начали действовать ядерные силы. Чтобы преодолеть электрическое отталкивание, эти ядра должны двигаться с большой скоростью друг относительно друга, то есть обладать *большой кинетической энергией*. Значит, чтобы такая реакция осуществлялась в некоторой среде, *температура этой среды должна быть очень высокой*: расчёты показывают, что реакция синтеза может идти только при температурах в десятки миллионов градусов и выше.

По этой причине реакции синтеза называют часто *термоядерными* реакциями. Именно такие реакции и происходят при указанных температурах в недрах звёзд (в том числе и нашего Солнца), являясь основным источником их энергии.

На Земле термоядерную реакцию впервые удалось осуществить в водородной бомбе, которая была испытана в 1953 г. в СССР. К счастью, водородную бомбу никогда не применяли в военных действиях. Сегодня учёные многих стран, в том числе и России, активно занимаются «приручением» термоядерной реакции: она могла бы стать практически неисчерпаемым источником энергии.

Реакции деления

Из графика зависимости удельной энергии связи от массового числа ядра видно, что наибольшей энергией связи характеризуются ядра с массовыми числами от 50 до 60, то есть ядро железа и близких к нему по массовому числу ядер.

Следовательно, для ядер, масса которых больше массы ядра железа, при *уменьшении* массового числа удельная энергия связи *увеличивается*. Поэтому при расщеплении *тяжёлых* ядер с большим массовым числом (это ядра элементов, находящихся ближе к концу таблицы Менделеева) на средние по массовому числу ядра происходит *выделение энергии*.

Расщепление ядра на менее массивные ядра с выделением энергии называют *реакцией деления*. Она лежит в основе действия атомной бомбы и ядерного реактора.

Двумя атомными бомбами, сброшенными с самолётов США, в конце второй мировой войны были полностью разрушены японские города Хиросима и Нагасаки.

О работе ядерного реактора мы расскажем в следующем параграфе.

Как были открыты реакции деления?

В 1938 году немецкие учёные О. Ган и Ф. Штрассман установили, что среди элементов, возникающих при облучении урана нейтронами, присутствует радиоактивный барий. А в следующем году английский физик О. Фриш и австрийский физик Л. Мейтнер теоретически доказали, что при этом происходит *реакция деления ядер урана*.

Дальнейшие исследования подтвердили эти выводы. Одна из реакций деления ядер такова:



Энерговыведение этой реакции около 200 МэВ.

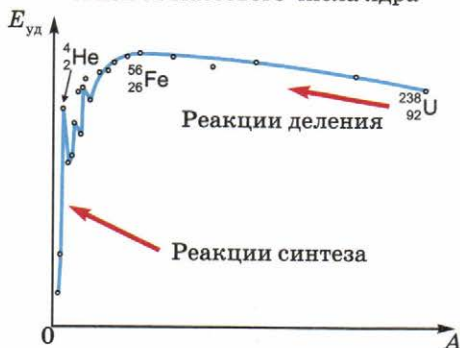
? 3. Какая энергия выделяется при делении ядер, содержащихся в 1 г урана-235? Какую массу угля надо сжечь, чтобы выделилась такая же энергия?

В 1940 году советские физики К. А. Петржак и Г. Н. Флеров обнаружили, что ядра урана делятся не только при их облучении нейтронами, но и самопроизвольно.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Ядерные реакции и энергия связи ядер

Зависимость удельной энергии связи от массового числа ядра



Энергия может выделяться в реакциях синтеза и в реакциях деления

Соотношение между дефектом массы ядра и энергией связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2$$

§ 35. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

1. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Цепные реакции деления

При облучении ядер урана нейтронами в каждой реакции деления ядра могут испускаться новые нейтроны. Попадая в другие ядра урана, эти нейтроны могут вызвать новые реакции деления. Если при этом среднее число нейтронов *не уменьшается*, то реакция деления станет «самоподдерживающейся»: число делящихся ядер может увеличиваться со временем или оставаться постоянным. Такую ядерную реакцию называют *цепной ядерной реакцией*. Схема цепной ядерной реакции изображена на рисунке 35.1.

Впервые на опыте такую реакцию осуществил Э. Ферми в США в 1942 году.

Атомный взрыв. Если при осуществлении цепной реакции число делящихся ядер урана лавинообразно возрастает, происходит *взрыв*, при котором практически мгновенно выделяется огромная энергия.

На этом основан принцип действия атомной бомбы.

Управляемая цепная ядерная реакция деления. Если в цепной реакции число делящихся ядер остаётся *постоянным*, то реакция протекает не в виде взрыва, а *стационарно*.

Такая цепная реакция называется *управляемой*: она может быть использована, например, для получения электроэнергии.

Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называют *ядерным реактором*.

Первый ядерный реактор был запущен в 1942 году в США

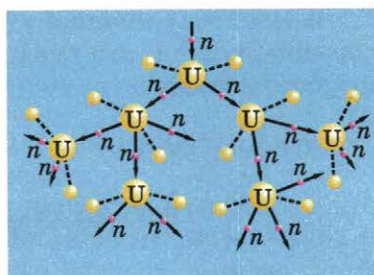


Рис. 35.1



Энрико Ферми
1901–1954

под руководством Ферми, а первый в Европе — в 1946 году в СССР, где работы велись под руководством И. В. Курчатова.

Первая в мире атомная электростанция с ядерным реактором была построена в 1954 году в СССР.

Условия осуществления управляемой цепной ядерной реакции

Замедлители нейтронов. Один из наиболее эффективных способов осуществления цепной ядерной реакции — деление ядер урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ при облучении их *медленными* нейтронами. Энергия таких нейтронов меньше, чем энергия нейтронов, образующихся при делении ядер, поэтому возникает необходимость в *замедлителях* нейтронов.

Хорошим замедлителем нейтронов является так называемая *тяжёлая вода*, то есть вода, в молекулах которой атомы водорода заменены атомами дейтерия. Она намного предпочтительнее обычной воды, потому что обычная вода не только замедляет нейтроны, но и поглощает их.

В качестве замедлителя нейтронов используют также чистый графит — он тоже замедляет нейтроны, не поглощая их.

Замедляющие свойства дейтерия и графита обусловлены тем, что ядра этих веществ сравнительно лёгкие: благодаря этому при столкновениях с нейтронами они эффективно «отбирают» у нейтронов значительную часть их кинетической энергии.

Поглотители нейтронов. Чтобы ядерная цепная реакция протекала *стационарно*, необходимо обеспечивать строгое постоянство во времени числа медленных нейтронов: если число нейтронов начнёт увеличиваться, это грозит взрывом, а если начнёт уменьшаться, реакция прекратится.

Для обеспечения постоянства числа нейтронов используют *поглотители* нейтронов. В качестве поглотителей обычно применяют кадмий и бор: нейтроны хорошо поглощаются ядрами этих веществ (при этом образуются их изотопы).

Из кадмия или бора изготавливают регулирующие стержни, которые вводят в рабочее пространство ядерного реактора.



Игорь Курчатов
1903–1960

Критическая масса

Наличием замедлителей и поглотителей нейтронов условия осуществления управляемой цепной ядерной реакции не ограничиваются. Необходимо ещё, чтобы основная часть нейтронов, образовавшихся при делении ядер, оставалась в уране, вызывая новые реакции деления.

А это значит, что нейтроны должны пройти в веществе достаточно *большой путь*, то есть размеры образца (а следовательно, и его масса) должны быть достаточно велики.

Наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция, называют критической массой.

Для шарообразного образца природного урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ критическая масса равна примерно 50 кг. Однако её можно намного уменьшить, используя замедлители нейтронов (для повышения вероятности того, что они вызовут ядерные реакции) и окружив образец бериллиевой оболочкой — она отражает вылетающие нейтроны в зону реакции, увеличивая их путь в образце.

Принцип действия атомной электростанции

На рисунке 35.2 схематически изображено устройство атомной электростанции с ядерным реактором на медленных нейтронах. В активной зоне реактора 1 находятся ядерное топливо и замедлитель. Активная зона окружена отражателем 2 и толстой защитной оболочкой из железобетона 3.

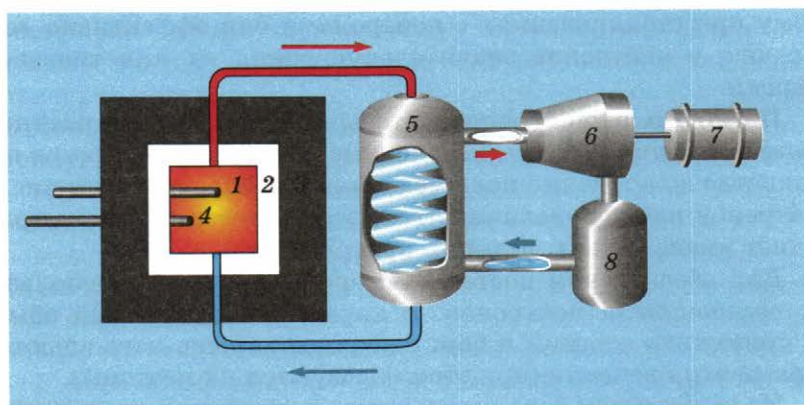


Рис. 35.2

Реактором управляют с помощью регулирующих стержней 4, изготовленных из вещества, поглощающего нейтроны. При запуске реактора эти стержни медленно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнётся цепная ядерная реакция, а затем с помощью этих же стержней поддерживается постоянство числа нейтронов, вызывающих деление ядер.

Тепло из горячей активной зоны реактора отводится теплоносителем 5 (например, водой). Теплоноситель передаёт тепло в парогенератор 6, превращая воду в пар под высоким давлением. Пар вращает турбину 7, соединённую с генератором электроэнергии. Отработанный пар конденсируется в конденсаторе 8, откуда вода снова поступает в парогенератор.

2. ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Атомные электростанции

В некоторых странах значительная доля всей электроэнергии уже сегодня производится на атомных электростанциях.

Атомные электростанции имеют ряд преимуществ и недостатков по сравнению с тепловыми электростанциями.

Главное преимущество атомных электростанций состоит в том, что для их работы необходимо очень малое по объёму и массе количество топлива по сравнению с тепловыми электростанциями. Это значительно снижает расходы на его транспортировку.

Кроме того, запасы ядерного топлива довольно велики: по различным оценкам, их может хватить на несколько столетий.

И наконец, нормально функционирующие атомные электростанции загрязняют окружающую среду значительно меньше, чем тепловые. Так, выброс радиоактивных веществ в атмосферу при этом даже меньше, чем для тепловой электростанции, работающей на угле, так как сжигаемый в огромных количествах уголь всегда содержит примеси радиоактивных веществ, часть которых выбрасывается в атмосферу.

Главным же недостатком атомных электростанций является опасность аварий с выбросом больших количеств радиоактивных веществ в окружающую среду. В последние десятилетия 20-го века и в начале 21-го века такие аварии произошли на нескольких атомных электростанциях в разных странах. Это заставило усовершенствовать систему обеспечения безопасности атомных электростанций, но и сегодня многие специалисты считают такие электростанции небезопасными.

Вторым существенным недостатком атомных электростанций является возможность использования атомных реакторов для производства материалов, из которых можно изготовить ядерное оружие. Контроль за нераспространением ядерного оружия осуществляет Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ).

Наконец, необходимо учитывать опасность заражения окружающей среды радиоактивными отходами, образующимися при работе атомных электростанций. Их помещают в толстостенные контейнеры из нержавеющей стали, окружённые бетонной защитой, а затем погружают в глубокие шахты.

Перспективы управляемого термоядерного синтеза

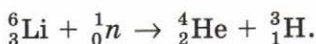
Радикальным способом решения энергетического кризиса учёные считают управляемый термоядерный синтез.

Поэтому сегодня в развитых странах, в том числе и в России, ведутся интенсивные исследования по управляемому термоядерному синтезу.

Одной из наиболее перспективных считают упомянутую выше реакцию синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития:



На Земле существуют практически неисчерпаемые запасы дейтерия (в воде морей и океанов), а тритий можно получать из жидкого лития (запасы лития также достаточно велики) при облучении его нейтронами благодаря реакции



Главная проблема управляемого термоядерного синтеза состоит, как мы уже говорили, в том, что синтез ядер может происходить только при очень высокой температуре — в десятки миллионов градусов. Такую температуру можно создать в плазме с помощью мощных электрических разрядов.

Но как удержать плазму в течение времени, достаточного для протекания реакции? Ведь при столь высокой температуре любые материалы превращаются в пар.

Принципиальное решение проблемы удержания высокотемпературной плазмы нашли советские физики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм. Они предложили заключить плазму в магнитную ловушку в форме тора (такую форму имеет бублик). Установка для осуществления управляемого термоядерного синтеза с та-

кой магнитной ловушкой называется «Токамак»¹. В этой установке «стенками» для горячей плазмы служит магнитное поле, которому не страшна даже очень высокая температура.

В экспериментах на «Токамаках» уже сегодня идёт реакция синтеза, однако учёным не удаётся пока добиться «положительного» энергетического выхода: затраты энергии на нагревание плазмы превышают энергию, выделяющуюся при синтезе.

Тем не менее учёные уверены, что создание промышленного термоядерного реактора — дело ближайших десятилетий.

3. ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Радиоактивное излучение (содержащее потоки гамма-квантов, электронов, протонов, нейтронов и α -частиц) вызывает ионизацию атомов, поэтому его часто называют *ионизирующим* излучением. Когда нейтральный атом превращается в ион, его химическая активность резко изменяется. В живых организмах, представляющих собой чрезвычайно упорядоченные структуры, это серьёзно нарушает жизнедеятельность клеток. Поэтому при достаточно интенсивном и продолжительном воздействии радиоактивного излучения на живой организм возникает *лучевая болезнь*.

Наиболее опасны нейтронное, рентгеновское и гамма-излучения, так как они обладают большой проникающей способностью: задержать их может только массивная свинцовая или бетонная преграда. Поток α -частиц задерживается одеждой человека, однако попадание альфа-активного вещества в организм является чрезвычайно опасным.

Воздействие радиоактивного излучения на организм характеризуют *поглощённой дозой излучения* D , которая равна отношению поглощённой телом энергии E этого излучения к массе тела m , то есть $D = \frac{E}{m}$.

Единицей измерения поглощённой дозы излучения в системе СИ является *грей* (Гр): 1 Гр = 1 Дж/кг.

Естественный радиационный фон, обусловленный радиоактивностью окружающей среды и космическими лучами, составляет около 2 мГр в год на человека. Этот фон не представляет для нас опасности. Примерно половину общего вклада в

¹ От первых букв слов «тороидальная камера с магнитными катушками».

естественный радиационный фон даёт радиоактивный инертный газ радон, а также продукты его распада, попадающие в организм при дыхании. Напомним, что в закрытых непроветриваемых помещениях концентрация радона увеличивается.

Для специалистов, работающих с радиоактивным излучением, установлена предельно допустимая доза 50 мГр/год. Кратковременная же доза излучения, равная нескольким греям, может стать смертельной.

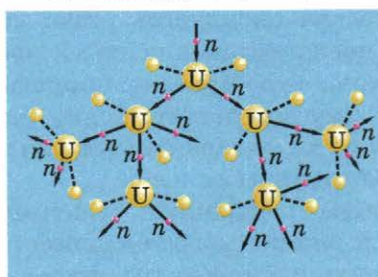
На практике используется также внесистемная единица дозы излучения — рентген (Р). Один рентген равен примерно 0,01 Гр.



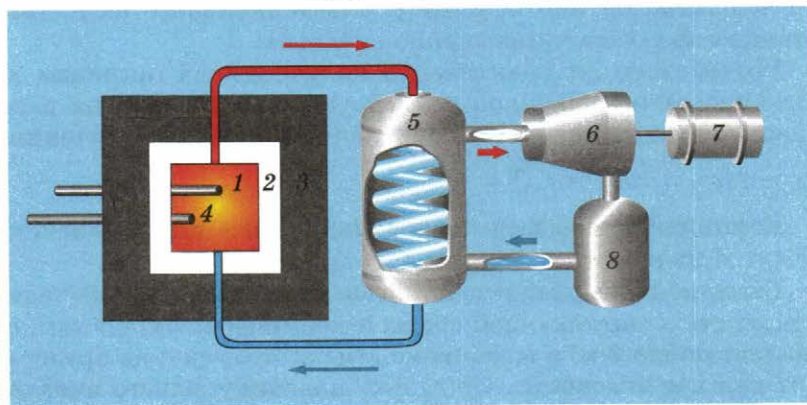
ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Ядерная энергетика

Цепная ядерная реакция



Ядерный реактор



§ 36. МИР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. ОТКРЫТИЕ НОВЫХ ЧАСТИЦ

До тридцатых годов 20-го века строение материи представлялось учёным удивительно простым: казалось, что «полный набор» частиц, из которых состоит всё вещество, составляют всего три частицы: *протон*, *нейтрон* и *электрон*. Поэтому их называли «элементарными».

К числу элементарных частиц относили также *фотон* — переносчик электромагнитных взаимодействий.

Частицы и античастицы

Представление о «простом» устройстве мира разрушилось, когда в 1932 году открыли *античастицу* электрона — частицу, которая имеет такую же массу, что и электрон, но отличается от него знаком электрического заряда. Эту частицу назвали *позитроном*.

В дальнейшем выяснилось, что, кроме электрического заряда, элементарные частицы могут иметь и другие заряды, также сохраняющиеся при взаимодействиях. Например, нуклоны обладают *барионным* зарядом. Были открыты античастицы протона и нейтрона (их назвали *антипротон* и *антинейтрон*). Обе эти частицы обладают отрицательным барионным зарядом, а антипротон имеет отрицательный электрический заряд.

Согласно современным представлениям, у каждой частицы есть *античастица*. Частица и античастица имеют одинаковую массу, но противоположные знаки всех зарядов.

Античастица может совпадать с самими частицами. Примером такой частицы является фотон.

Взаимопревращения элементарных частиц

Долгое время физики считали само собой разумеющимся, что сложные микрообъекты состоят из более простых — подобно тому, как механизм состоит из деталей.

Чтобы выяснить, из чего состоят те или иные микрообъекты, физики, начиная с Резерфорда, «прощупывали» микрообъекты, бомбардируя их быстрыми частицами. Для этого создавали мощные *ускорители*, в которых заряженные частицы разгонялись до скоростей, чрезвычайно близких к скорости света!

Однако во второй половине 20-го века выяснилось, что при столкновениях частиц высокой энергии они не «раскалываются» на более простые частицы, а вместо этого рождаются новые

частицы, в том числе ещё неизвестные. Массы рождённых частиц могут даже превышать массы сталкивающихся частиц.

Кроме того, оказалось, что частицы могут *превращаться друг в друга*.

Например, частица и античастица при столкновении *аннигилируют*, то есть исчезают, превращаясь в другие частицы (часто этими частицами являются фотоны). При этом, однако, выполняются все законы сохранения, в том числе законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда. Например, при столкновении электрона и позитрона они могут превратиться в два γ -кванта.

Во второй половине 20-го века при исследовании космических лучей и в экспериментах на ускорителях новые частицы стали открывать *десятками*, и сегодня их число составляет уже несколько сотен.

Некоторые из вновь открытых частиц чрезвычайно короткоживущие: они «живут» чуть больше времени, необходимого свету, чтобы пролететь сквозь атомное ядро.

Открываемые частицы по-прежнему называли элементарными. Но, как метко заметил ещё Ферми, становилось всё более очевидным, что понятие «элементарная» относится скорее к уровню наших знаний, чем к истинной природе частицы.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Адроны и лептоны

Частицы, которые могут взаимодействовать посредством ядерных сил, называли *адронами*¹. Например, к числу адронов принадлежат частицы, из которых состоят атомные ядра — протоны и нейтроны. Известных сегодня адронов сотни: именно они и составляют основную часть вновь открытых частиц.

Частицы, которые не взаимодействуют посредством ядерных сил, называли *лептонами*². К их числу относятся, например, электрон и нейтрино.

К настоящему времени установлено существование *шести* лептонов, причём один из них (так называемый таон) оказался не таким уж «лёгким»: его масса почти вдвое превышает массу протона. Зато три из шести лептонов (три вида нейтрино) полностью оправдывают свое название: их масса, по современ-

¹ В переводе с греческого — большой, сильный.

² В переводе с греческого — лёгкий.

ным представлениям, очень мала (у некоторых типов нейтрино она, как считается, может быть даже равной нулю).

Кварки

В 60-х годах 20-го века американским физикам М. Гелл-Манну и Дж. Цвейгу удалось произвести систематизацию всех адронов, исходя из предположения, что они состоят из частиц, названных *кварками*.

Все адроны делятся на два типа — *барионы*¹ и *мезоны*².

Барионы (к их числу принадлежат и нуклоны) состоят из трёх кварков, а мезоны (к их числу принадлежат, например, пи-мезоны, обмен которыми между нуклонами вносит существенный вклад в ядерные силы) — из кварка и антикварка.

Многие эксперименты по столкновениям частиц высоких энергий можно объяснить, исходя из предположения, что внутри нуклона находятся *три кварка*.

Однако «освободить» кварки не удалось даже при бомбардировке нуклонов частицами очень высокой энергии. И вообще выяснилось, что кварки обладают весьма необычными свойствами.

Во-первых, они обладают *дробным электрическим зарядом*, равным $+2e/3$ и $-e/3$, где e — модуль заряда электрона. Например, протон состоит из двух кварков с зарядом $+2e/3$ и одного кварка с зарядом $-e/3$, поэтому заряд протона равен e . А нейтрон состоит из одного кварка с зарядом $+2e/3$ и двух кварков с зарядом $-e/3$, поэтому заряд нейтрона равен нулю.

Во-вторых, при увеличении расстояния между кварками сила их притяжения *увеличивается*, а при попытке разорвать связи между кварками рождаются кварки и антикварки, которые тут же объединяются в новые адроны.

В некотором смысле это напоминает невозможность получить магнит с одним полюсом: попытка разломать двухполюсной магнит хотя и удаётся, но при этом получаются два магнита — и каждый снова с двумя полюсами.

Взаимодействие кварков обусловлено наличием у них особого заряда, условно названного *цветом*. Эта физическая величина не имеет отношения к настоящему цвету и была введена только для более наглядного описания взаимодействия между кварками.

¹ От греческого «барис» — тяжёлый.

² От греческого «мезо» — средний.

Сегодня установлено существование шести кварков — то есть по современным представлениям кварков столько же, сколько лептонов. Но это интригующее равенство ещё не получило убедительного объяснения.

Каждый из шести кварков существует в трёх «цветовых» вариантах — «красный», «синий» и «зелёный». Массы некоторых кварков намного превышают массы нуклонов.

3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Фундаментальные частицы

По современным представлениям фундаментальными частицами (то есть частицами, не состоящими из других частиц) являются *лептоны* и *кварки*.

Как вы, наверное, заметили, понятием «фундаментальная частица» физики заменили понятие «элементарная частица» в надежде на то, что теперь, наконец, они добрались до «самых первоначал» материи. К «истинно элементарным» частицам относят также 13 частиц — переносчиков различных видов взаимодействий (о них мы расскажем ниже).

Итого, по современным представлениям в основе мироздания — несколько десятков частиц. Это немногим меньше, чем число элементов в периодической таблице Менделеева, поэтому многие физики считают, что они ещё «в пути», то есть поиск глубинных первоначал материи не завершён.

Фундаментальные взаимодействия

По современным представлениям, все взаимодействия в природе являются проявлениями *четырёх* видов фундаментальных взаимодействий между фундаментальными частицами — лептонами и кварками. Каждый вид фундаментальных взаимодействий обусловлен обмен определёнными частицами.

Сильное взаимодействие. Самое сильное из всех видов взаимодействий так и называется — *сильное*. Это — взаимодействие между кварками. Оно осуществляется благодаря обмену частицами, названными *глюонами*¹. Сильным взаимодействием обусловлены ядерные силы.

Существует восемь видов глюонов. Взаимодействие между адронами (ядерные силы) рассматривается сегодня как взаи-

¹ От английского glue — клей.

модействие сложных составных объектов, состоящих из кварков.

Электромагнитное взаимодействие. Следующее по «силе» взаимодействие — *электромагнитное взаимодействие* между электрически заряженными частицами. Оно осуществляется благодаря обмену *фотонами*. Существует *один* вид фотонов.

Слабое взаимодействие. Следующим (по мере убывания «силы») является *слабое* взаимодействие. Слабым взаимодействием обусловлен, например, уже знакомый вам распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино. Слабое взаимодействие осуществляется благодаря обмену тремя очень массивными частицами, которые назвали *промежуточными векторными бозонами*. Эти частицы были открыты в восьмидесятые годы 20-го века. Масса каждой из них почти в сто раз больше массы нуклона.

Выяснилось, что слабое и электромагнитное взаимодействия — проявления единого *электрослабого* взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие. Наиболее слабым из известных взаимодействий является *гравитационное* взаимодействие. В нём участвуют *все* без исключения частицы.

Согласно современным представлениям гравитационное взаимодействие осуществляется благодаря обмену частицами, названными *гравитонами*. Гравитон — единственная из «истинно элементарных» частиц, ещё не открытая на опыте (этому мешает слабость гравитационных взаимодействий — они примерно в 10^{40} раз слабее электромагнитных).

Однако, как ни слаба гравитация, именно она «правит миром»: ей подчиняются планеты, звёзды и даже галактики. Более того: гравитация «зажигает» звёзды. Дело в том, что в отличие от всех других видов взаимодействий гравитационное взаимодействие является *всегда притяжением*, и поэтому все частицы испытывают гравитационное притяжение друг к другу.

Звёзды зажигаются потому, что при гравитационном сжатии огромных масс температура в их недрах поднимается до десятков миллионов градусов (и даже выше), — и тогда становятся возможными термоядерные реакции.

Сколько существует частиц — переносчиков взаимодействия? Общее число частиц — переносчиков взаимодействия равно 13 (восемь глюонов, фотон, три векторных бозона и гравитон). Природа, как видно, не посчитала это число несчастливым. А может, пока ещё открыты не все виды взаимодействий?

«Великое объединение». Многие физики надеются на то, что, подобно тому как удалось объединить электромагнитное и слабое взаимодействие в единое электрослабое взаимодействие, со временем удастся построить теорию, объединяющую все известные виды взаимодействий.

И название для такой теории уже есть: *великое объединение*.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Классификация элементарных частиц

Адроны — взаимодействуют посредством ядерных сил

Лептоны — не взаимодействуют посредством ядерных сил

Адроны — барионы и мезоны

Барионы состоят из трёх кварков,

мезоны — из кварка и антикварка

Фундаментальные взаимодействия

Сильное

Электромагнитное

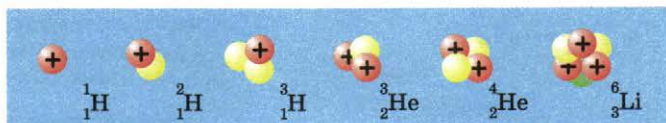
Слабое

Гравитационное

Электромагнитное и слабое взаимодействия — проявления единого электрослабого взаимодействия

Атомное ядро

Атомное ядро состоит из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов



Обозначение атомного ядра ${}^A_Z X$

$$A = Z + N$$

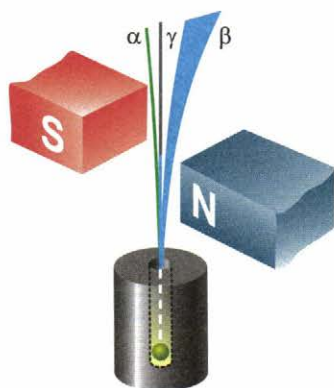
A — массовое число

N — число нейтронов

Z — зарядовое число

Радиоактивность

Виды радиоактивных излучений

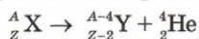


α -лучи — ядра гелия ${}^4_2\text{He}$

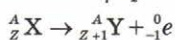
β -лучи — электроны ${}^0_{-1}e$

γ -лучи — фотоны (γ -кванты)

Уравнение α -распада

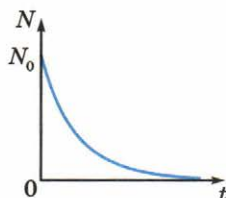


Уравнение β -распада

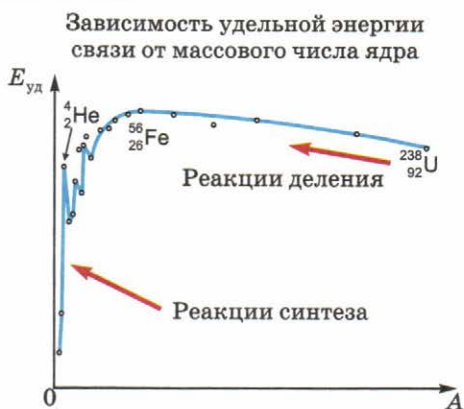


Закон радиоактивного распада

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$



Ядерные реакции и энергия связи ядер



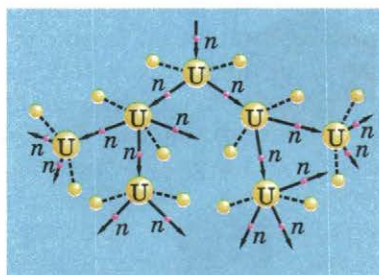
Энергия может выделяться в реакциях синтеза и в реакциях деления

Соотношение между дефектом массы ядра и энергией связи ядра

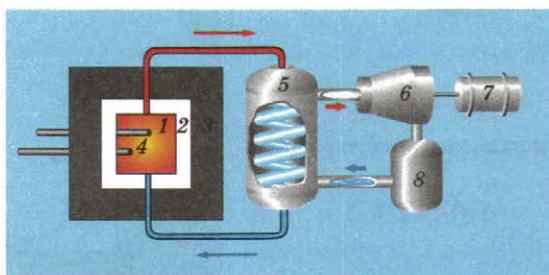
$$E_{св} = \Delta M \cdot c^2$$

Ядерная энергетика

Цепная ядерная реакция



Ядерный реактор



§ 37. РАЗМЕРЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

1. ЗЕМЛЯ И ЛУНА

Земля

Какой представляли Землю в древности. В древности Землю считали плоской и, по нынешним меркам, совсем небольшой. В те времена Земля и «небесная твердь» над ней составляли всю Вселенную (так и сегодня называют *всё*, что только существует).

Вокруг Земли вращалась «небесная твердь» с прикрепленными к ней звёздами-жемчужинками, а между этой твердью и Землёй двигались Солнце и Луна (рис. 37.1).

Правда, если присмотреться внимательнее, в ночном небе можно было увидеть несколько странных ярких звёзд, которые ночь от ночи чуть смещались относительно всех остальных звёзд. Их называли *планетами*, что в переводе с греческого означает «блуждающие».

Кто определил форму Земли? О том, что Земля — огромный шар, догадались древние греки.

Живя у моря, они часто замечали, что корабль уходит за линию горизонта, как за огромный холм. Суда скрывались из виду *одинаково*, в каком бы направлении они ни плыли, и, будучи математиками, греки догадались, что Земля имеет форму шара, — ведь только поверхность шара закругляется во все стороны *одинаково*.

Сегодня, когда можно рассматривать снимки Земли из космоса (рис. 37.2), шарообразность её формы кажется очевидной.



Рис. 37.1

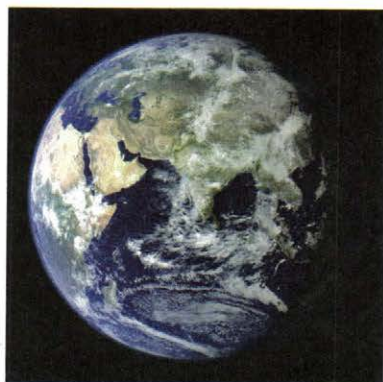


Рис. 37.2

Как измерили Землю. Древнегреческий учёный Эратосфен, путешествуя по Египту, заметил, что в Египте его тень в полдень короче, чем в Греции. И он догадался, как, используя это, можно найти радиус земного шара. Произведя необходимые измерения и вычисления, Эратосфен нашёл, что радиус Земли равен 6400 км (при переводе в современные единицы длины). Это лишь ненамного отличается от результатов современных измерений.

Последующие измерения уточнили не только размер Земли, но и её *форму*: оказалось, что она немного сплюснута у полюсов, что обусловлено суточным вращением Земли вокруг собственной оси.

Расстояние от центра Земли до точки на экваторе примерно на 20 км больше, чем от центра до точки на полюсе.

Луна

Расстояние до Луны. Первую попытку измерить расстояние до Луны предпринял в 3-м веке до нашей эры тоже греческий учёный — астроном Аристарх Самосский¹.

Для этого он воспользовался наблюдениями за лунными затмениями.

Аристарх догадался, что лунные затмения происходят из-за того, что освещённая Солнцем Земля отбрасывает тень на Луну (рис. 37.3).

Правда, земная тень не помещается на Луне полностью, потому что Земля намного больше Луны, но Аристарх понял, что размер всей земной тени можно рассчитать по видимой её части.

Зная уже размер Земли и размер отбрасываемой ею на поверхность Луны тени, Аристарх сумел рассчитать, на каком расстоянии от Земли находится земная тень. А это расстояние — и есть расстояние от Земли до Луны!



Рис. 37.3

¹ Аристарх первым высказал предположение, что Земля вращается вокруг Солнца (то есть он был предшественником Коперника).

Результат Аристарха Самосского уточнил впоследствии греческий астроном Гиппарх.

Последующие измерения и тут внесли малую поправку¹. Среднее расстояние² от Земли до Луны равно 384 400 км (примерно в 30 раз больше диаметра Земли).

Размер Луны. Когда стало известно расстояние от Земли до Луны, можно было по её видимому размеру определить и радиус. Размер Луны поразил древних: её радиус оказался равным 1 740 км, то есть больше четверти радиуса Земли! Что удерживает в небе такую громаду? Не рухнет ли она на Землю?

Только через 2 тысячи лет ответы на эти волнующие вопросы нашёл И. Ньютон, открыв закон всемирного тяготения, управляющий движением Луны и планет.

? 1. Объясните, почему Луна не падает на Землю.

2. ОРБИТЫ ПЛАНЕТ

Расстояния от Земли до Солнца и планет удалось определить в 17-м веке, когда стала общепризнанной предложенная в 16-м веке польским астрономом Н. Коперником *гелиоцентрическая система мира*. Как вы знаете, согласно этой системе мира все планеты, включая Землю, движутся вокруг Солнца.

Законы Кеплера

В начале 17-го века немецкий астроном И. Кеплер, используя данные многолетних астрономических наблюдений датского астронома Т. Браге (сделанных до изобретения телескопа!), установил три закономерности в движении планет.

Эти закономерности назвали «законами Кеплера»³.

¹ Наиболее точно расстояние до Луны было измерено с помощью лазерного луча: посланный с Земли луч отразился от поставленного на Луне отражателя, и по промежутку времени, в течение которого лазерный луч шёл к Луне и обратно, определили расстояние до Луны.

² Расстояние от Земли до Луны не остаётся постоянным: оно изменяется от 362 000 км до 405 000 км.

³ Напомним (мы рассказывали об этом в курсе физики 10-го класса), что законы Кеплера оказались для Ньютона «ключом» к открытию закона всемирного тяготения.



Иоганн Кеплер
1571–1630

Используя их, Кеплер смог определить *относительные* размеры орбит планет (например, *во сколько раз* диаметр орбиты Юпитера больше диаметра орбиты Земли).

Однако *масштаб* этой схемы (в том числе и расстояние от Земли до Солнца) оставался неизвестным.

Для его определения надо было измерить расстояние до какой-нибудь *одной* планеты.

Параллакс

Если смотреть на какой-либо близко расположенный предмет поочередно то левым глазом, то правым, то предмет виден немного по-разному — он как бы чуть-чуть поворачивается. Это обусловлено углом между лучами, идущими от предмета в левый и правый глаз (рис. 37.4, а). Этот угол называют *параллаксом*¹. По величине этого угла мозг автоматически оценивает расстояние до предмета.

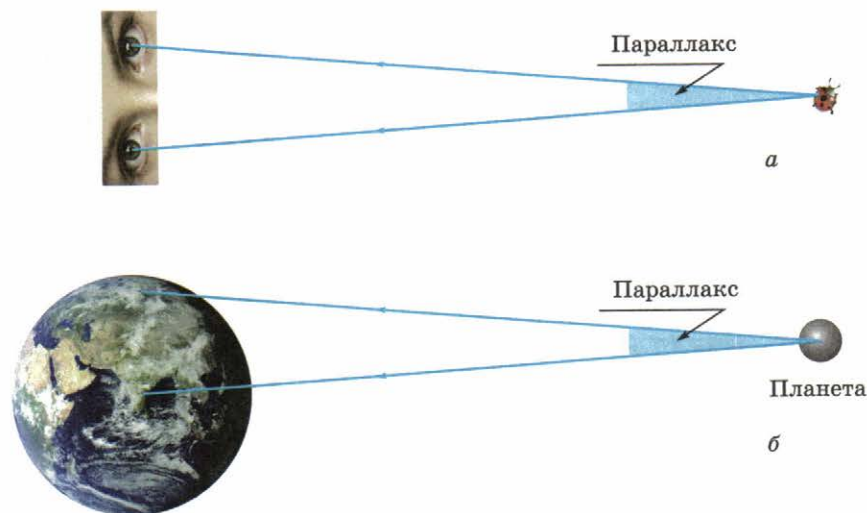


Рис. 37.4

Астрономы догадались, что подобный способ можно использовать для измерения расстояния от Земли до другой планеты. Роль двух глаз могут играть два телескопа, направленные на одну планету *из разных точек земного шара* (рис. 37.4, б). В эти телескопы планета видна *в один и тот же*

¹ От греческого «параллаксис» — отклонение.

момент времени на фоне различных участков звёздного неба. Во второй половине 17-го века таким способом измерили расстояние до Марса, что позволило определить и масштаб Солнечной системы.

Расстояние до Солнца и размеры планетных орбит

Измерения показали, что *среднее расстояние от Земли до Солнца равно 149 600 000 км.* Эту величину¹ называют *астрономической единицей (1 а. е.).*

Сегодня считают, что в Солнечной системе восемь больших планет: *Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун* (планеты перечислены в порядке удаления от Солнца).

В таблице ниже приведены расстояния от Солнца до планет, а на рисунке 37.5 — схема орбит планет Солнечной системы (с соблюдением масштаба).

Планета	Среднее расстояние от Солнца до планеты	
	в астрономических единицах (а. е.)	в миллионах километров
Меркурий	0,39	57,9
Венера	0,72	108,2
Земля	1,00	149,6
Марс	1,52	227,9
Юпитер	5,20	778,3
Сатурн	9,54	1426,9
Уран	19,19	2871,0
Нептун	30,06	4497,1



Рис. 37.5

А далеко-далеко за орбитами больших планет находится рой *комет*. Некоторые кометы движутся по чрезвычайно вытянутым орбитам, порой приближаясь к Солнцу.

¹ В приближённых расчётах 1 а. е. обычно принимают равной 150 000 000 км.

Световой год

Для измерения больших расстояний астрономы часто используют время, которое необходимо свету, чтобы преодолеть эти расстояния. Напомним, что свет движется быстрее «всего на свете» — скорость света в вакууме около 300 000 км/с.

? 2. Сколько времени свет идёт от Солнца:

- а) до Земли?
- б) до Юпитера?
- в) до Нептуна?

Для измерения расстояний до звёзд часто используют *световой год* — расстояние, которое свет проходит за один год.

? 3. Выразите один световой год в километрах.

Световой год — огромное расстояние, с трудом поддающееся воображению. Но, оказывается, даже на таком расстоянии Солнечная система еще не заканчивается: упомянутый выше рой комет как раз и находится примерно на расстоянии одного светового года от Солнца.

Световыми годами, как мы увидим ниже, часто измеряют расстояние между звёздами. Например, расстояние до ближайшей к нам (после Солнца) звезды составляет 4,22 световых года. Эту звезду назвали Проксима, что в переводе с греческого означает «Ближайшая».

? 4. Во сколько раз расстояние от Земли до Проксимы больше, чем от Земли до Солнца?

Как ни велик световой год, но это только начало знакомства с «настоящими» космическими расстояниями: впереди нас с вами ждут расстояния в миллионы и даже миллиарды световых лет! По сравнению с такими расстояниями вся Солнечная система вместе с самыми удалёнными кометами может показаться лишь затерянной в пространстве точкой. Однако наша Солнечная система уникальна тем, что именно в ней появился человек, который смог измерить масштабы Вселенной!

Парсек. В качестве единицы измерения расстояний астрономы используют также парсек¹. Один парсек равен расстоянию до объекта, параллакс которого равен одной *угловой секунде* (1/3600 часть градуса), а размер равен диаметру земной орбиты. Один парсек равен 3,26 световых лет.

¹ От слов «параллакс» и «секунда».

3. РАЗМЕРЫ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Зная расстояние от Земли до Солнца, можно по видимому размеру Солнца определить и его истинный размер.

Измерения показали, что радиус Солнца — около 700 000 км, то есть в 109 раз больше радиуса Земли.

Подобным же образом можно определить и размеры планет, так как в телескопы они видны как диски.

В таблице ниже приведены радиусы планет, а на рисунке 37.6 схематически приведены размеры планет с соблюдением масштаба (Юпитер и Сатурн полностью не уместились на схеме).

Планета	Радиус планеты	
	в радиусах Земли	в км
Меркурий	0,38	2 440
Венера	0,95	6 050
Земля	1,00	6 370
Марс	0,53	3 390
Юпитер	11,21	71 490
Сатурн	9,45	60 270
Уран	4,01	25 560
Нептун	3,88	24 760



Рис. 37. 6

Уже при первом взгляде бросается в глаза, что четыре планеты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — намного больше всех остальных. Поэтому их называют *планетами-гигантами*. По сравнению с ними планеты так называемой *земной группы* — Земля, Венера, Марс и Меркурий кажутся просто «малышами».

Проведём сравнение

Чтобы представить относительные размеры планет и их орбит, выберем масштаб, при котором диаметр орбиты Нептуна примерно равен длине футбольного поля (около 100 метров). Для этого Солнечную систему надо было бы уменьшить в *100 миллиардов* раз, то есть выбрать масштаб: в одном сантиметре *миллион километров*.

Тогда в центре нашего «футбольного поля» светило бы «Солнце» размером с вишенку, «гигант Юпитер» был бы размером с булабочную головку, а «Землю», движущуюся на расстоянии полутора метров от «Солнца», рассмотреть было бы почти невозможно — она была бы размером с пылинку.

А сколько любви и ненависти уместается на этой «пылинке»! И только на ней...



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

5. Во сколько раз радиус Луны меньше радиуса Земли?
6. Какие планеты находятся ближе к Солнцу, чем Земля?
7. Какие планеты находятся дальше от Солнца, чем Земля?
8. Какие планеты — самые большие? Какое у них общее название?
9. Объясните, в чём состоит идея метода, с помощью которого были измерены расстояния до Солнца и планет. Как называется этот метод?
10. Измерьте, на каком расстоянии от глаза нужно держать спичечную головку, чтобы при рассматривании одним глазом она закрывала полную Луну. Оцените, исходя из этого, размер Луны (для оценки примите расстояние от Земли до Луны равным 400 000 км).
11. Объясните, что такое световой год.
12. Найдите в справочной литературе или в Интернете материал о Солнечной системе с учётом современных космических исследований и подготовьте презентацию по этому материалу на 5—7 минут.

§ 38. СОЛНЦЕ

1. ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Температура Солнца

Температуру поверхности Солнца учёные определили ещё в 19-м веке по спектру солнечного излучения — фактически по *цвету* солнечного света.

Дело в том, что цвет излучаемого нагретым телом света зависит от *температуры* тела. При повышении температуры цвет изменяется от красного к голубому: так, при температуре около 3000—4000 градусов¹ тело светит красным светом, при температуре около 6000 градусов — белым, а при ещё более высокой температуре излучаемый свет становится голубоватым.

Наше Солнце светит белым светом, то есть его поверхность раскалена «добела» — примерно до 6000 градусов. По земным меркам это довольно высокая температура: при такой температуре все известные вещества обращаются в пар.

В 20-м веке с помощью наблюдений и теоретических расчётов ученые смогли определить температуру в центральной области Солнца. И оказалось, что она в *тысячи раз* больше, чем температура его поверхности: в центре Солнца температура около 15 *миллионов* градусов.

По сравнению с таким «пеклом» раскалённая добела поверхность Солнца может показаться даже прохладной!

Ранние гипотезы об источнике энергии Солнца. С давних пор учёных интересовал вопрос: за счёт какой энергии Солнце так щедро и так долго расточает тепло? Ответ на этот вопрос они пытались найти, используя имевшиеся у них к тому времени знания.

До 20-го века единственным известным способом получения высокой температуры было сжигание топлива, то есть химические реакции. Поэтому, естественно, учёные предположили, что Солнце «горит» в буквальном смысле слова, то есть источником его энергии являются химические реакции.

Расчёты показали, однако, что при нынешнем расходе энергии Солнце «сгорело» бы дотла в течение всего несколь-

¹ Для таких высоких температур не имеет значения, определяем ли мы температуру по шкале Цельсия или по абсолютной шкале. Поэтому мы будем задавать её просто в «градусах», так как они говорят воображению больше, чем «кельвины».

ких тысяч лет. А геологические исследования неопровержимо указывали на то, что Земля существует *миллиарды* лет. Но ведь не может же Земля быть старше Солнца!

Значит, химическое горение не может быть источником солнечной энергии.

И в середине 19-го века появилась новая и очень красивая идея: немецкий учёный Герман Гельмгольц предположил, что источником солнечной энергии является... гравитация. Согласно Гельмгольцу, Солнце излучает энергию благодаря тому, что внешние слои Солнца продолжают «падать» к его центру, в результате чего их потенциальная энергия уменьшается, переходя во внутреннюю¹.

И действительно, расчёты показали, что «запасы» энергии тяготения в тысячи раз больше, чем возможные «запасы» энергии химических реакций. Продолжая сжиматься вследствие тяготения, Солнце могло бы оставаться таким же жарким и ярким, как сегодня, *миллионы* лет.

Но даже это огромное время было в тысячи раз меньше времени существования Земли, на котором «настаивала» геология: она говорила о *миллиардах* лет! Так что красивая идея Гельмгольца не смогла объяснить происхождения солнечной энергии. Нужна была новая идея.

Не будем, однако, прощаться с идеей Гельмгольца: история науки показывает, что красивые идеи не умирают.

Хотя идея Гельмгольца не объясняет, почему «горит» Солнце, она смогла объяснить, почему оно *зажглось*: сжимаясь под действием сил гравитации, огромное облако межзвёздного газа разогрелось настолько сильно, что температура в его центральной области повысилась до миллионов градусов. И тогда там «вспыхнули» термоядерные реакции. Так же рождались и другие звёзды.

Термоядерный синтез

В конце 30-х годов 20-го века американский физик Х. Бете догадался, что *источником энергии Солнца и других звёзд являются реакции термоядерного синтеза*: его расчёты показали, что за счёт этой энергии Солнце может светить миллиарды лет!

Итак, в недрах Солнца происходит постоянный «термоядерный взрыв». Там при температуре, исчисляемой миллио-

¹ Нагревание за счёт гравитационного сжатия и сегодня является главным источником энергии для Юпитера.

нами градусов, идёт термоядерный синтез ядер гелия из ядер водорода: в результате трёх последовательных реакций четыре ядра водорода превращаются в одно ядро гелия.

Такое огромное энерговыделение, как у Солнца, не может, конечно, происходить без ощутимых потерь. Напомним, что согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$ при выделении энергии ΔE масса тела уменьшается на $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$, где c — скорость света. Поэтому *излучение энергии Солнцем сопровождается уменьшением его массы.*

Расчёты показывают, что вследствие превращения водорода в гелий масса Солнца *ежесекундно* уменьшается более чем на *4 миллиона тонн!*

Естественно, возникает вопрос: надолго ли хватит массы Солнца при таком интенсивном «похудении»? Не ожидает ли нас скорый «конец света»?

К счастью, нет: водорода в Солнце столько, что оно может (и будет!) светить с нынешней яркостью ещё 5—6 миллиардов лет, то есть примерно столько же, сколько оно уже светит¹. Можно сказать, что наше Солнце находится как раз «в расцвете лет»!

Интересно, что если бы масса Солнца была *больше*, жизнь его была бы *короче*, — оказывается, чем больше масса звезды, тем *быстрее* эта звезда «сгорает». И жизнь массивной звезды может оказаться слишком краткой для длительного процесса зарождения жизни на какой-либо движущейся вокруг этой звезды планете.

А если бы масса Солнца была *меньше*? Тогда оно светило бы *дольше*, но — менее ярко. И на Земле могло бы просто не хватить тепла и света для возникновения жизни.

Так что нам очень повезло с нашим Солнцем: его масса как раз такова, как «надо»! А если бы не повезло? Мы бы об этом никогда не узнали: нас просто не было бы.

Почему Солнце не разлетается?

Глядя с Земли на ласковое Солнце, трудно представить, что в его недрах постоянно происходит термоядерный «взрыв»

¹ Некоторые люди (особенно молодые, у которых ещё вся жизнь впереди) испытывают потрясение, узнав, что Солнце не вечно. Не переживайте: человеческая жизнь и даже вся история человечества — всего лишь мгновение по сравнению с несколькими миллиардами лет, в течение которых Солнце ещё будет светить, и светить по-прежнему!

чудовищной силы, — взрыв, который длится уже миллиарды лет и будет продолжаться ещё столько же. Почему же вследствие этого гигантского взрыва Солнце не разлетается мгновенно в огнедышащие клочья?

От такого разлёта Солнце удерживает *сила тяготения*. Она создаёт то огромное давление в недрах Солнца, при котором возможны термоядерные реакции (расчёты показывают, что для протекания таких реакций одной высокой температуры недостаточно — нужно ещё и очень большое давление).

Таким образом, состояние «стабильного взрыва», в котором миллиарды лет пребывает Солнце и подавляющее большинство звёзд, обеспечивается *балансом* между термоядерными реакциями в центре звезды и тяготением: термоядерные реакции стремятся разорвать звезду, а тяготение — ещё больше сжать. И «спокойная жизнь» звезды продолжается до тех пор, пока такой баланс возможен. О том, что происходит, когда этот баланс нарушается, мы расскажем далее.

2. СТРОЕНИЕ СОЛНЦА

Выход энергии из недр на поверхность Солнца

Изучая различные виды излучения Солнца, учёные смогли «заглянуть» внутрь нашего светила и составить довольно точное представление о его строении (рис. 38.1).

Термоядерные реакции происходят только в *ядре* Солнца 1, радиус которого составляет около одной трети радиуса Солнца.

Условия, при которых находится вещество в ядре Солнца, трудно представить: например, его плотность примерно в 20 раз больше плотности железа, хотя оно находится в *газообразном* состоянии!

Но это, конечно, не обычный газ: атомы (не говоря уже о молекулах) при такой температуре существовать не могут. Это газ из ядер водорода и гелия, а также электронов. Такое состо-

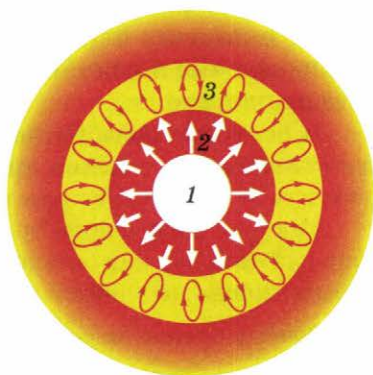


Рис. 38.1

яние вещества (сильно ионизированный газ) называют *плазмой*. Поскольку ядра в сотни тысяч раз меньше атомов, даже при такой огромной плотности ядрам и электронам достаточно «просторно» в ядре Солнца, то есть их действительно можно рассматривать как газ.

Из ядра Солнца вырываются рождённые в термоядерных реакциях γ -кванты огромной энергии. И если бы они достигли Земли, то сразу погубили бы всё живое.

К счастью, эти γ -кванты поглощаются следующими, менее горячими слоями Солнца, которые переизлучают энергию уже в виде γ -квантов меньшей энергии, — и так далее. При этом средняя энергия γ -квантов становится всё меньше, но самих γ -квантов становится всё больше, так как их суммарная энергия, согласно закону сохранения энергии, остаётся неизменной. Так, «по эстафете», каждая порция энергии прокладывает себе путь сквозь ещё одну треть радиуса Солнца, которую называют *лучистой зоной 2* (рис. 38.1).

Во внешней области Солнца, толщиной тоже примерно в треть его радиуса, перенос энергии наружу осуществляется уже не излучением, а веществом, поэтому эту область 3 называют *зоной конвекции*¹. Нагретые массы газа поднимаются к поверхности Солнца и, охлаждаясь там вследствие излучения, опускаются снова вниз, то есть существует постоянная циркуляция вещества.

Итак, «путешествие» каждой порции энергии из недр Солнца к его поверхности — очень сложный процесс. И очень долгий: чтобы «выбраться» из недр Солнца на его поверхность, каждой порции энергии требуется около миллиона лет.

Поверхность Солнца

Энергия, прорвавшаяся из недр Солнца к его поверхности, заставляет её вскипать огромными пузырями, называемыми *гранулами* (рис. 38.2). Их размеры не уступают размерам среднего европейского государства.

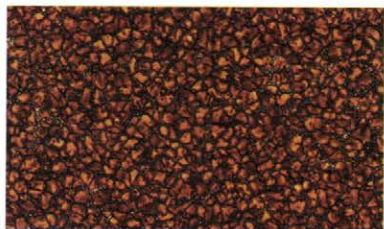


Рис. 38.2

¹ Напомним, что конвекцией называется теплопередача посредством переноса вещества.

Из Солнца то и дело вырываются *протуберанцы* (рис. 38.3) — колоссальные огненные вихри. Высота некоторых протуберанцев в десятки раз больше радиуса Земли.

? 1. Оцените размер протуберанца, изображённого на рисунке 38.3, и сравните его с радиусом Земли. Примите, что Солнце примерно в 100 раз больше Земли.

Но оказывается, даже протуберанцами Солнце не «заканчивается».

Во время полных солнечных затмений можно наблюдать *солнечную корону* — серебристое сияние, окружающее Солнце и простирающееся на несколько его радиусов (рис. 38.4).

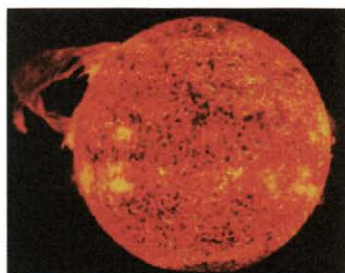


Рис. 38.3



Рис. 38.4

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Объясните, почему Солнце не разлетается, хотя в его недрах непрерывно происходят ядерные реакции с колоссальным выделением энергии.
2. Расскажите о ранних гипотезах о происхождении энергии Солнца и объясните, почему от них пришлось отказаться.
3. Как изменяется масса Солнца при излучении? Чем обусловлено это изменение?
4. В какой области Солнца происходят термоядерные реакции? Как называется эта область?
5. Как передаётся энергия из внутренних областей Солнца к его поверхности?

1. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Общие свойства планет земной группы

Планетами земной группы называют четыре ближайšie к Солнцу планеты: Меркурий, Венера, Землю и Марс.

Эти планеты, как вы уже знаете, имеют сравнительно небольшие размеры. У каждой из них есть каменная оболочка, называемая *литосферой*¹. Средняя плотность планет земной группы в несколько раз больше плотности воды.

Общим свойством планет земной группы является также то, что они бедны спутниками: большой спутник, Луна, есть только у Земли. Два спутника Марса представляют собой каменные глыбы неправильной формы размером в несколько километров, а у Меркурия и Венеры спутников нет.

Рассмотрим теперь планеты земной группы подробнее.

Меркурий

Самую близкую к Солнцу и поэтому самую «быструю» планету назвали Меркурием по имени древнеримского бога, который считался вестником богов, покровителем путешественников и торговли. Быстрого Меркурия изображали часто с крыльшками на шлеме или на сандалиях.

Меркурий (рис. 39.1) движется вокруг Солнца с рекордной среди планет скоростью — почти 50 км/с и один оборот вокруг Солнца совершает всего за 88 земных суток. Однако такой короткий год сочетается у Меркурия с чрезвычайно длинными сутками: во-первых, Меркурий очень медленно вращается вокруг своей оси, делая один оборот почти за 59 земных суток; во-вторых, так как суточное и годовое вращения планеты происходят в одном направлении, каждая точка поверхности Меркурия поворачивается к Солнцу лишь один раз за два меркуриан-



Рис. 39.1

¹ От греческого «литос» — камень.

ских года, то есть день и ночь делятся на Меркурии по целому году (меркурианскому).

В «меркурианский полдень» поверхность этой ближайшей к Солнцу планеты нагревается выше 400 °С. При такой температуре скорости молекул газов сравнимы со второй космической скоростью¹ для Меркурия (примерно 4 км/с). И поэтому *у Меркурия нет атмосферы*: он просто не может её удержать.

Невыносимая дневная жара на Меркурии сменяется лютым ночным холодом: до -170 °С. Объясняется это двумя причинами: во-первых, отсутствием атмосферы, во-вторых, большой длительностью меркурианских дня и ночи.

Поверхность Меркурия изрыта кратерами от ударов космических тел (см. рис. 39.1). Один удар был так силен, что его след виден на диаметрально противоположной удару стороне планеты. Однако не стоит особенно жалеть Меркурий, рассматривая эти страшные следы ударов. Это неизбежные «трудности роста» при формировании планет: поглощая попадавшие в них при столкновениях космические тела, планеты росли, набирая массу и становясь так называемыми «большими планетами».

Венера

Самая красивая и яркая планета — голубоватая Венера, названная за свою красоту именем древнеримской богини любви. Венера ближе к Солнцу, чем Земля, поэтому мы можем любоваться ею только перед восходом Солнца или сразу после захода (её называют по этой причине утренней или вечерней звездой).

В отличие от Меркурия *Венера обладает атмосферой*: наличие атмосферы на Венере обнаружили с помощью телескопов несколько учёных, в том числе и российский учёный М. В. Ломоносов.

Атмосфера Венеры чрезвычайно плотная: например, давление у поверхности этой планеты в 90 раз превышает давление у поверхности Земли. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа, а её поверхность постоянно закрыта густыми облаками, состоящими из капелек серной кислоты, поэтому изучить поверхность планеты удалось только с помощью запущенных к Венере космических аппаратов.

¹ Напомним, что второй космической скоростью называется скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно навсегда покинуло окрестности планеты.

На рисунке 39.2, *а* вы видите Венеру такой, какой её можно наблюдать в телескоп, а на рисунке 39.2, *б* изображена поверхность Венеры, какой она виделась бы, если бы не была закрыта густыми облаками (по фотографиям, сделанным с помощью космических аппаратов, приблизившихся к Венере).

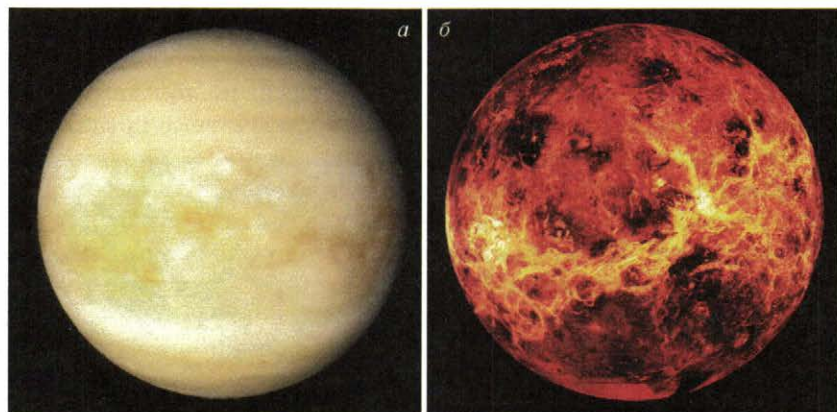


Рис. 39.2

Из-за «парникового эффекта», обусловленного плотной атмосферой, Венера является ещё более горячей планетой, чем Меркурий, причём на ней практически отсутствуют суточные и годовые колебания температуры — вблизи её поверхности температура всегда около 450 °С.

Венера также подвергалась бомбардировке космическими телами, однако благодаря атмосфере следы ударов на поверхности этой планеты не так заметны.

Земля и Луна

Земля. На облик нашей планеты (рис. 39.3) большое влияние оказала жизнь: в атмосфере Земли (её можно увидеть на фото) много кислорода, который появился благодаря жизнедеятельности растений.

Жизнь сама защищает себя: в верхних частях земной атмосферы из кислорода сформиро-



Рис. 39.3

вался озоновый слой, который защищает поверхность планеты от вредного для жизни ультрафиолетового излучения.

Уникальна наша планета и тем, что большая часть её поверхности покрыта водой. Учёные считают, что наличие воды было одним из решающих условий возникновения жизни на Земле.

Земля подвергалась такой же жестокой бомбардировке космическими телами, как и другие планеты, но ударные кратеры сгладились геологическими процессами, дождями и ветрами. Однако некоторые следы кратеров всё-таки остались.

На рисунке 39.4 вы видите гигантский Аризонский метеоритный кратер в США диаметром 1200 м. Предполагается, что он возник примерно 50 тысяч лет назад от падения на Землю железного метеорита массой в сотни тысяч тонн.

Земле приходилось выдерживать и более серьёзные удары — так, учёные предполагают, что почти мгновенное вымирание динозавров около 65 миллионов лет назад произошло из-за падения на Землю космического тела размером в несколько километров (то есть массой в десятки миллионов тонн). Это сопровождалось выбросом в атмосферу огромных масс вещества и вызвало длительное похолодание.

Луна. Луна — ближайшее к Земле небесное тело (рис. 39.5). Одни учёные считают, что Луна образовалась вместе с Землёй, другие полагают, что она возникла вследствие столкновения с Землёй какого-то большого космического тела в период формирования Земли. На вторую возможность указывает компьютерный эксперимент: учёные смоделировали с помощью компьютера, как могло происходить образование Луны при таком столкновении.



Рис. 39.4

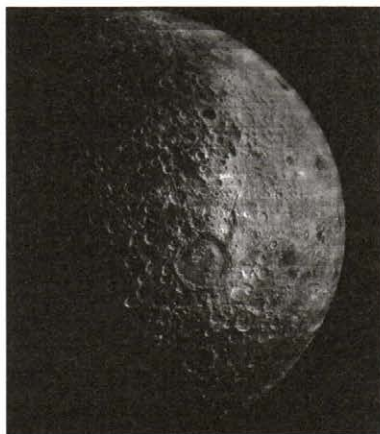


Рис. 39.5

Луна движется вокруг Земли, вращаясь при этом вокруг своей оси, причём эти два вращения «согласованы» так точно, что *Луна всегда обращена к Земле одной стороной*. Это согласование — не случайное совпадение, а результат действия так называемых приливных сил в течение миллиардов лет.

Приливные силы обусловлены различием в силах притяжения к Земле «ближней» и «дальней» частей Луны. Такие силы действуют и на Землю со стороны Луны и Солнца. Ими вызваны океанские приливы — отсюда и название этих сил.

Поверхность Луны так же, как и поверхность Меркурия, изрыта огромными ударными кратерами (см. рис. 39.5).

Приливные силы тормозят вращение планеты вокруг своей оси, поэтому из-за действия приливных сил Луна навсегда повернулась к Земле одной своей стороной.

Вследствие действия приливных сил земные сутки постепенно удлиняются: по некоторым оценкам, за 3 миллиарда лет, прошедших со времени возникновения жизни на Земле, продолжительность земных суток удвоилась или даже утроилась.

Марс

Эта планета была названа именем древнеримского бога войны Марса за свой красноватый оттенок, обусловленный наличием в марсианской коре окислов железа.

На Марсе (рис. 39.6) есть атмосфера, хотя давление вблизи поверхности планеты примерно в 150 раз меньше давления у поверхности Земли. Как и у Венеры, атмосфера Марса состоит большей частью из углекислого газа.

Радиус Марса примерно вдвое меньше радиуса Земли, а масса меньше массы Земли примерно в 9 раз. Однако и этой небольшой планете есть чем «гордиться»: именно на Марсе находится самая высокая гора в Солнечной системе — вулкан Олимп высотой 27 км (втрое выше самой высокой «земной» горы). Примечательной особенностью Марса является огром-

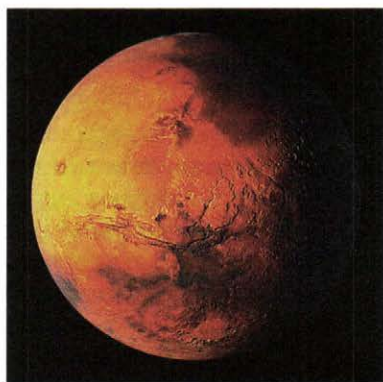


Рис. 39.6

ный каньон Маринер длиной почти 5000 км, шириной до 200 км и глубиной до 5 км (см. рис. 39.6). Он выглядит на поверхности Марса как гигантский шрам.

Вследствие разреженности атмосферы на Марсе сохранились многочисленные ударные кратеры.

Период обращения Марса вокруг своей оси почти совпадает с земными сутками, а ось вращения наклонена к плоскости орбиты примерно так же, как у Земли, поэтому на Марсе, как и на Земле, есть четыре «времени года».

Марс долгое время считали единственной (кроме Земли) планетой, где возможно существование жизни — хотя бы в простейших формах. Надежду на это давали так называемые «марсианские каналы» — видимые в телескоп линии, казавшиеся почти прямыми. Однако более поздние наблюдения, в том числе с пролетавших вблизи Марса космических аппаратов, не подтвердили наличия таких структур. Не обнаружили жизнь на Марсе — ни сейчас, ни в прошлом — также исследования с помощью автоматической лаборатории, доставленной на Марс космическим аппаратом.

2. ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

Общие свойства планет-гигантов

Напомним, что *планетами-гигантами* называют *Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун*.

Масса любой из этих планет во много раз превосходит общую массу *всех планет земной группы*. Однако средние плотности планет-гигантов невелики (плотность Сатурна даже меньше плотности воды). Объясняется это тем, что планеты-гиганты являются *огромными газовыми шарами*. И поэтому никому и никогда не удастся «ступить на поверхность» какой-либо планеты-гиганта. Тем не менее вследствие огромного сжатия, обусловленного гравитационными силами, у планет-гигантов есть твёрдые ядра.

У всех планет-гигантов имеются *спутники* (исчисляемые десятками), причём некоторые из них больше Луны. Интересно, что свойства спутников планет-гигантов во многом сходны со свойствами планет земной группы — в частности, многие из них имеют твёрдую оболочку.

Кроме того, все планеты-гиганты окружены *кольцами*, состоящими из огромного множества мелких космических тел.

Рассмотрим наиболее характерные особенности двух самых больших планет-гигантов — Юпитера и Сатурна.

Юпитер

Юпитер — не просто самая большая планета Солнечной системы: его масса почти в 3 раза больше *общей* массы *всех* остальных планет! Поэтому «царь планет» и был назван именем «главного» древнегреческого бога.

Несмотря на такую огромную массу, Юпитер вращается вокруг своей оси быстрее любой из планет земной группы, совершая полный оборот меньше чем за 10 часов. При этом вращается Юпитер не как твёрдое тело: период обращения экваториальных областей несколько меньше, чем приполярных.

На поверхности Юпитера видны идущие вдоль его «параллелей» полосы (рис. 39.7). Они обусловлены, скорее всего, большой скоростью вращения: вблизи экватора газообразная поверхность Юпитера движется со скоростью более 40 000 км/ч.

У Юпитера около трёх десятков спутников. Четыре самые большие спутника были открыты ещё Галилеем; наибольший из них даже больше Меркурия, который считается «большой планетой». С такой свитой спутников (сходных к тому же по своему строению с планетами земной группы) Юпитер напоминает Солнечную систему в миниатюре. Это сходство усиливается также тем, что *Юпитер — источник энергии*: как показали измерения, он излучает почти в 2 раза больше энергии, чем получает от Солнца.

Источник энергии Юпитера именно тот, какой предложил Гельмгольц для объяснения происхождения солнечной энергии, и где он оказался неправ. Его теория, которая не могла объяснить происхождение энергии Солнца, смогла объяснить происхождение энергии Юпитера: она обусловлена продолжающимся сжатием планеты под действием сил тяготения.



Рис. 39.7

Как вы уже знаете, именно такое сжатие «зажигает» звёзды. Так что Юпитер, в некотором смысле, является несостоявшейся (из-за слишком «малой» массы) звездой. Отметим также «звёздный» химический состав Юпитера: он, как и большинство звёзд (в том числе и Солнце), состоит почти целиком из водорода и гелия.

Сатурн

Самая яркая особенность Сатурна — роскошное кольцо, открытое ещё Галилеем (рис. 39.8). В верхней части снимка кольцо частично закрыто тенью Сатурна. В нижней части снимка видны спутники Сатурна (светлые точки).

Долгое время загадкой для астрономов было то, что примерно раз в 15 лет это кольцо исчезало.

Как оказалось, дело было в том, что каждые 15 лет кольцо Сатурна поворачивается к Земле ребром, и тогда разглядеть его очень трудно.

В течение нескольких веков кольцо Сатурна считали сплошным, но в 19-м веке известный вам Максвелл доказал, что оно должно состоять из отдельных частиц, так как сплошное кольцо было бы давным-давно разорвано мощными приливными силами, действующими со стороны огромного Сатурна.

В конце 19-го века предсказание Максвелла подтвердил российский учёный А. А. Белопольский, исследовав спектр отражённого кольцом света.

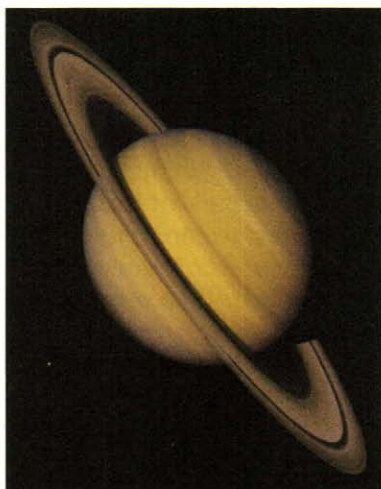


Рис. 39.8

3. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Астероиды

Между орбитами Марса и Юпитера обращаются миллионы мелких планет и небольших космических тел неправильной формы. Их называли *астероидами*¹.

¹ В переводе с греческого — звездоподобными.

Некоторые астероиды даже «обзавелись» астероидами-спутниками: на рисунке 39.9 вы видите астероид Иду длиной около 55 км со своим крошечным спутником (светлая точка в правой части снимка).



Рис. 39.9

Общая масса астероидов не превышает одной тысячной массы Земли, причём половина этой массы сосредоточена всего в трёх астероидах, диаметр наибольшего из которых около 1000 км.

Ещё сравнительно недавно считалось, что астероиды — это остатки планеты, находившейся некогда между Марсом и Юпитером и разрушенной в результате космической катастрофы.

Но сегодня учёные пришли к выводу, что астероиды — это зародыши несостоявшейся планеты. Объединиться в большую планету астероидам помешали приливные силы, действующие со стороны близкого и очень массивного Юпитера: они безжалостно разрывали сколько-нибудь крупное образование.

Кометы

Мы уже говорили о кометах, рассказывая о размерах Солнечной системы.

Самая примечательная особенность кометы — огромный хвост, длина которого составляет порой десятки миллионов километров (рис. 39.10).

Хвост кометы образуется при испарении льда и замёрзших газов, содержащихся в ядре кометы.

Вследствие давления солнечного света и *солнечного ветра* (потока испускаемых Солнцем частиц) хвост кометы направлен всегда от Солнца.



Рис. 39.10

4. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Современные представления об образовании Солнечной системы восходят к предположению немецкого учёного Иммануила Канта, что Солнце и планеты формировались *одновременно* из единого вращающегося облака. Большой вклад в развитие теории происхождения Солнечной системы внёс советский учёный О. Ю. Шмидт.

Как считают сегодня учёные, Солнечная система образовалась примерно 4,6 миллиардов лет назад из холодного газопылевого облака, состоящего в основном из водорода и гелия с небольшой примесью (не более 3 % массы) других веществ. Сжимаясь вследствие тяготения, это *протопланетное облако* превратилось в диск, в центре которого образовалось Солнце, а на периферии — планеты.

Продолжая сжиматься, центральная часть облака нагрелась настолько, что в ней начались ядерные реакции, то есть она превратилась в *звезду*.

«Вспыхнув», Солнце стало сильно нагревать ближайшие к нему части формирующейся планетной системы. В результате летучие водород и гелий из этой области почти полностью улетучились, переместившись на периферию Солнечной системы, где сформировались планеты-гиганты. Это объясняет сходство химического состава этих планет и Солнца. В сравнительной же близости от Солнца остались в основном тугоплавкие вещества, из которых и состоят планеты земной группы.

Химический состав Солнечной системы

Солнечная система почти полностью состоит из водорода и гелия — на долю всех остальных элементов приходится около 3 % массы. Если же говорить не о массе, а о числе атомов, то окажется, что из каждых 1000 атомов почти 920 — это атомы водорода, а 80 — атомы гелия; на долю же всех остальных атомов приходится не более *одного атома из тысячи*.

Стоит ли уделять внимание этому одному атому из тысячи?

Планеты из «редких» атомов. Стоит, потому что из этих столь редких в Солнечной системе атомов состоим *мы сами!* Да и наша Земля (как и остальные планеты земной группы) практически вся состоит из них.

Может показаться странным, что на создание всех этих планет хватило менее одной тысячной доли всех атомов Сол-

нечной системы. Но вспомните, как ничтожно малы массы планет земной группы по сравнению с массой планет-гигантов, состоящих в основном из водорода и гелия, не говоря уже о массе Солнца, которое состоит из водорода и гелия почти целиком.

Откуда взялись химические элементы тяжелее гелия? Теперь, когда мы понимаем, как жизненно (в буквальном смысле слова) важны для нас эти элементы, зададимся вопросом: где и как они возникли?

Как показывают расчёты, в Солнечной системе они никак не могли возникнуть, потому что для создания этих элементов из более простых (то есть водорода и гелия) нужны огромные температуры и давления — намного превосходящие даже те, которые существуют в недрах Солнца. Значит, эти элементы уже изначально присутствовали в том газопылевом облаке, из которого образовалась когда-то Солнечная система. Но как они попали в это облако?

Как мы скоро увидим, такие элементы попадают в газопылевые облака только при *взрывах звёзд*, то есть наша Земля и мы сами состоим из элементов, «испечённых» в адском пекле звёзд, взорвавшихся миллиарды лет назад.

Более подробно мы расскажем об этом в Главе 11. Звёзды, галактики, Вселенная.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Расскажите, что общего у планет земной группы.
2. Расскажите, что общего у планет-гигантов.
3. Объясните, почему ударные кратеры на Меркурии сохранились лучше, чем на других планетах.
4. Расскажите об основных свойствах Венеры. Почему температура на поверхности этой планеты так высока?
5. Объясните, почему Луна обращена к Земле всё время одной стороной.
6. Являются ли астероиды обломками разрушенной планеты?
7. Каков химический состав Солнечной системы?
8. Как в Солнечной системе появились химические элементы тяжелее гелия?



Радиус Земли около 6400 км, *радиус Луны* 1740 км.

Среднее расстояние от Земли до Луны 384400 км. Луна всегда обращена к Земле одной стороной.

Среднее расстояние от Земли до Солнца 149 600 000 км. Эта величина называется *астрономической единицей* (1 а. е.).

Большие планеты Солнечной системы в порядке их удаления от Солнца: *Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун*.

Кроме планет, в Солнечной системе есть *астероиды* и *кометы*. Орбиты большинства астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера.

Расстояние, которое свет пролетает за один год, называют *световым годом*. Световой год приближённо равен 10^{13} км.

Радиус Солнца примерно 700 000 км (в 109 раз больше радиуса Земли).

Температура поверхности Солнца около 6000 К. В центре Солнца — температура около 15 миллионов градусов.

Источником энергии Солнца являются реакции термоядерного синтеза. Вследствие выделения энергии масса Солнца ежегодно уменьшается более чем на 4 миллиона тонн.

Планеты земной группы: Меркурий, Венера, Земля и Марс. У них есть литосфера — твёрдая каменная оболочка. На всех этих планетах, кроме Меркурия, есть атмосфера (давление атмосферы на Венере примерно в 100 раз больше, чем на Земле, а на Марсе — в 150 раз меньше, чем на Земле).

Планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Они представляют собой огромные газовые шары с твёрдыми ядрами. У всех планет-гигантов есть спутники и кольца. Кольца не являются сплошными и состоят из отдельных малых космических тел.

Согласно современным представлениям *Солнце и планеты формировались одновременно* из единого вращающегося газопылевого облака. Солнечная система образовалась примерно 4,6 миллиардов лет тому назад.

Солнечная система почти полностью состоит из *водорода* и *гелия* — на долю всех остальных веществ приходится около 3 % массы.

§ 40. РАЗНООБРАЗИЕ ЗВЁЗД

1. РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД

Расстояния до ближайших звёзд

Звёзды настолько далеки от нас, что даже в хорошие телескопы они видны как светящиеся точки¹.

Расстояния до звёзд смог оценить еще Ньютон во второй половине 17-го века. Он предположил, что звёзды — это очень удалённые «солнца»², и задался вопросом: на какое расстояние надо удалить Солнце, чтобы оно казалось звездой средней яркости? Полученный ответ поразил самого ученого: оказалось, что даже ближайшие звёзды в *сотни тысяч раз* дальше от нас, чем Солнце!

В первой половине 19-го века астрономы сумели измерить расстояния до ближайших звёзд уже знакомым вам *методом параллакса*, то есть наблюдая одну и ту же звезду на фоне других звёзд из различных точек.

Звезду наблюдали с интервалом в полгода и измеряли угол между разделёнными полугодом «направлениями на звезду» (его называют «годовым параллаксом»). Схематически это показано на рисунке 40.1 (масштаб на рисунке для наглядности не соблюден: как вы уже знаете, расстояние до ближайшей к нам звезды примерно в 270 тысяч раз больше радиуса орбиты Земли).

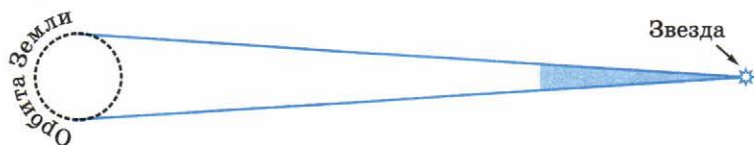


Рис. 40.1

Одно из первых измерений расстояний до звёзд произвёл российский астроном В. Я. Струве.

¹ В последние десятилетия появились телескопы, позволяющие рассмотреть некоторые звёзды-гиганты: эти звёзды выглядят как крошечные диски.

² Именно за такое «еретическое» предположение в 1600 году инквизиция отправила на костёр итальянского учёного Джордано Бруно.

Сегодня измерены расстояния до всех ближайших звёзд. При этом выяснилось, что ближайшая к нам звезда, как ни странно, не видна невооружённым глазом: разглядеть её можно только в хороший телескоп. Она находится в созвездии Кентавра (или, как его ещё называют, Центавра) и называется *Проксима Центавра*. Эта тусклая звезда — *красный карлик*, который загадочно «подмигивает»: всего за несколько минут блеск этой звезды может измениться вдвое.

Чуть дальше неё находится очень яркая звезда Альфа Центавра: эта третья по яркости звезда всего неба сходна с нашим Солнцем, но наблюдать её можно только в Южном полушарии. Зато жители Северного полушария могут любоваться самой яркой звездой всего неба — *Сириусом*¹. Сириус находится тоже довольно «близко»: эту звезду от нас отделяет «всего» 8,7 световых лет.

Светимость звезды

Как вы уже знаете, самая близкая к нам звезда не видна невооружённым глазом. И в то же время некоторые звёзды, находящиеся в сотни раз дальше неё, нам кажутся очень яркими. Как это объяснить?

Как вы уже, наверное, догадались, дело в том, что у разных звёзд различная *мощность излучения*. Мощность излучения звезды называют *светимостью*.

Видимая яркость звезды зависит от светимости звезды и от расстояния до неё. Поэтому если известно расстояние до звезды, то по видимой её яркости можно определить светимость.

За единицу светимости принимают светимость Солнца. У многих звёзд светимость значительно меньше, чем у Солнца, но есть звёзды, светимость которых намного выше, чем у Солнца. Так, светимость Сириуса равна примерно 20, то есть мощность излучения Сириуса в 20 раз больше мощности излучения Солнца.

Известны звёзды, превосходящие Солнце по светимости в сотни тысяч и даже миллионы раз. Такова, например, звезда Денеб — она находится на расстоянии около 3000 световых лет от нас, но является одной из самых ярких звёзд на нашем небе.

Однако нам, живущим вблизи «скромного» Солнца, не стоит завидовать предполагаемым жителям планетной системы Денеба: их *нет*, потому что срок жизни этого сверхги-

¹ В переводе с греческого — опаляющий.

ганта так краток, что возле него не может зародиться жизнь. И сравнительно скорый конец его, как мы узнаем из дальнейшего, будет ужасен.

Как были определены расстояния до далеких звёзд?

Ещё в конце 16-го века астрономы заметили, что яркость некоторых звёзд периодически изменяется (с периодом от нескольких часов до нескольких суток).

Одно из объяснений такого изменения яркости звезды состоит в том, что около неё обращается другая звезда, и каждая из звёзд время от времени «затмевает» для нас свет своей соседки. Такие пары взаимодействующих звёзд называют *двойными звёздами*.

Но есть звёзды, у которых периодически изменяется *светимость* (мощность излучения). Их назвали *цефеидами*, поскольку звёзды такого типа впервые были обнаружены в созвездии Цефея.

Американский астроном Г. Ливитт заметила, что чем больше светимость цефеиды, тем больше период изменения её блеска. Это позволяло по периоду изменения блеска цефеиды определять её светимость. А зная светимость и видимую яркость звезды, можно оценить расстояние до этой звезды.

Цефеиды назвали «маяками Вселенной», так как с помощью цефеид удалось определить расстояния до далёких звёзд.

2. СВЕТИМОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРА ЗВЁЗД

Диаграмма «температура — светимость»

В начале 20-го века датский астроном Э. Герцшпрунг и американский астроном Г. Рессел решили выяснить: *как связана светимость звезды с её температурой?*

Поскольку каждая звезда имеет определённую температуру и светимость, она может быть представлена точкой на координатной плоскости, по осям координаты которой отложены температура и светимость звезды (рис. 40.2).

Плоскость, на которой отмечено таким образом большое количество звёзд, мы будем называть *диаграммой «температура — светимость»*¹.

¹ Герцшпрунг и Рессел вместо температуры звёзд использовали их «спектральные классы» (соответствующая диаграмма называется диаграммой Герцшпрунга — Рессела). Использование температуры звёзд делает диаграмму более наглядной.

Герцшпрунг и Рассел заметили, что почти все звёзды сгруппировались в несколько областей, главные из которых обозначены на рисунке 40.2.

**Главная последовательность:
от красных карликов до голубых гигантов**

Из левого нижнего угла диаграммы «температура — светимость» в верхний правый угол тянется полоса, в которую попадает, по разным оценкам, от 90 до 99 % всех звёзд. Поэтому эту полосу называют *главной последовательностью*. Наше Солнце также принадлежит главной последовательности (его положение обозначено на диаграмме).

Что же объединяет звёзды, принадлежащие главной последовательности? Ведь в ней есть очень разные звёзды: в нижней её части находятся *красные карлики* — так называют красноватые, то есть сравнительно холодные, звёзды с малой светимостью, в середине — звёзды типа нашего Солнца, а в верхней части — *голубые гиганты* — горячие звёзды с огромной светимостью.

Однако у всех этих звёзд есть общее свойство: *чем выше температура звезды, тем больше её светимость*.

Такая простая взаимосвязь между температурой звезды и её светимостью может показаться на первый взгляд совершенно очевидной. Однако очевидности тут на самом деле нет, так как существуют звёзды с низкой температурой и большой светимостью и, наоборот, — звёзды с высокой температурой и малой светимостью. Именно они и заполняют две другие «населённые» области на диаграмме «температура — светимость». Это *красные гиганты* и *белые карлики*. Что же они собой представляют?

Красные гиганты

Звёзды, «населяющие» область вверху слева на диаграмме «температура — светимость», имеют сравнительно низкую

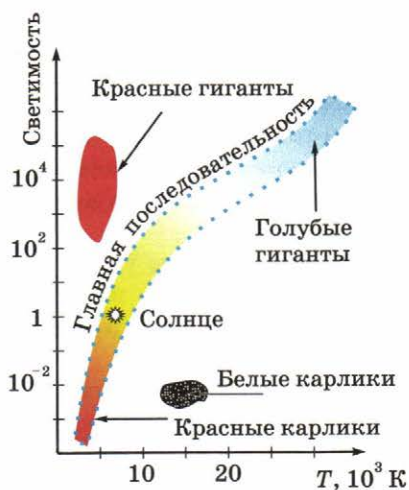


Рис. 40.2

температуру поверхности — существенно ниже температуры поверхности Солнца, однако светимость их может в десятки тысяч раз превосходить светимость Солнца. Ясно, что такую огромную светимость «холодная» звезда может иметь только благодаря колоссальным размерам. Поэтому такие звёзды называли *красными гигантами*.

Это действительно гиганты даже по звёздным масштабам: диаметр некоторых красных гигантов *в сотни раз превосходит диаметр Солнца*, то есть их диаметры сравнимы с диаметрами *орбит* Земли и Марса. Однако масса многих красных гигантов ненамного отличается от массы Солнца. Отсюда можно сделать вывод, что красные гиганты очень разрежены: их средняя плотность в тысячи раз меньше плотности окружающего нас воздуха.

Белые карлики

В нижней средней части диаграммы «температура—светимость» находятся горячие звёзды — температура их поверхности намного выше температуры Солнца. Однако светимость этих звёзд может быть в сотни раз меньше светимости Солнца. Такое сочетание высокой температуры с малой светимостью может означать только одно: эти звёзды *очень малы*. Поэтому их называют *белыми карликами*.

И это действительно карлики — конечно, по звёздным масштабам: многие белые карлики не больше *Земли*. Однако масса у белых карликов вполне «звёздная» — она сравнима с массой *Солнца*. Отсюда следует, что плотность белых карликов в миллионы раз превышает плотность воды: напёрсток вещества белого карлика имеет массу в несколько *тонн*. Но и это, как мы увидим, ещё далеко не предел для плотности вещества.

Чем объясняется разнообразие звёзд?

Как мы видим, анализ взаимосвязи между температурой звезды и её светимостью позволил выявить три основные группы звёзд: *звёзды главной последовательности, красные гиганты и белые карлики*.

Такая «группировка» звёзд на диаграмме «температура — светимость» наводит на мысль, что каждая группа звёзд характеризуется общностью физических явлений. Для звёзд же разных групп эти явления различны. Как мы увидим далее, это действительно так: например, звёзды каждой группы характеризуются своим «источником энергии».

Но самое интересное состоит в том, что *одной и той же* звезде суждено на своём веку побывать и звездой главной последовательности, и красным гигантом, и белым карликом!



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Объясните, как Ньютон оценил расстояния до звёзд.
2. Во сколько примерно раз расстояние от Солнца до ближайших звёзд больше, чем расстояние от Земли до Солнца?
3. Расскажите, как измерили расстояния до ближайших звёзд.
4. Что такое светимость звезды?
5. Если одна звезда ярче другой, означает ли это, что первая звезда ближе? Обоснуйте ваш ответ.
6. Как взаимосвязаны температура и светимость для звёзд, принадлежащих главной последовательности?
7. Каково расстояние (в световых годах) до ближайших звёзд?
8. Сравните видимую яркость звезды с её светимостью: что у них общего и чем они различаются? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
9. На каком расстоянии от Земли находится ближайшая звезда, светимость которой принимают за единицу?
10. В каких областях на диаграмме «температура — светимость» сосредоточены звёзды? Охарактеризуйте эти области.
11. Чем отличаются красные карлики от красных гигантов? Какие из них лежат на главной последовательности?
12. Что общего у красных карликов и голубых гигантов?
13. Чем обусловлена высокая светимость красных гигантов?
14. У каких типов звёзд размер может быть близок к размеру Земли, а масса — к массе Солнца?
15. Какие из следующих видов звёзд принадлежат главной последовательности: красные гиганты, красные карлики, голубые гиганты, белые карлики?

§ 41. СУДЬБЫ ЗВЁЗД

1. «ЗВЕЗДА-ГОСТЬЯ» И «ЗВЕЗДА ТИХО БРАГЕ»

Звёздное небо издавна было символом вечного постоянства: изменялась погода, сменялись времена года, одни государства исчезали, а другие появлялись, но звёзды — *одни и те же* звёзды! — неизменно оставались на прежних местах.

Однако в течение последних столетий выяснилось, что изменяются и звёзды, причем эти изменения бывают порой весьма драматичными.

Раз в несколько столетий на небе внезапно появляется новая, чрезвычайно яркая звезда.

В китайских и японских хрониках сохранились упоминания о «звезде-гостье», вспыхнувшей в созвездии Тельца в 1054 году.

Новую звезду можно было видеть даже днём: она была ярче Венеры. Звезда украшала небо около трёх недель, а затем постепенно угасала в течение года. Интересно, что в европейских хрониках упоминаний о ярчайшей «звезде-гостье» вообще нет! Видимо, средневековые европейские звездочёты готовы были скорее не поверить собственным глазам, чем усомниться в учении церкви о неизменности звёздного свода.

Следующая вспышка яркой звезды произошла только в 1572 году. Её сразу же заметил 26-летний датчанин Т. Браге. Она произвела на него такое впечатление, что он решил посвятить жизнь изучению звёзд. Браге стал великим астрономом, и результаты его наблюдений позволили другому великому астроному, Иоганну Кеплеру, открыть «законы Кеплера». А они, в свою очередь, помогли третьему великому ученому, Исааку Ньютону, открыть закон всемирного тяготения. Вот какую огромную роль сыграла в истории науки эта вспыхнувшая звезда, названная звездой Тихо Браге.

С тех пор астрономы неоднократно наблюдали вспышки звёзд, некоторые из которых можно было видеть невооружённым глазом.

Сегодня благодаря телескопам астрономы узнали, что вспышки звёзд происходят довольно часто. Они свидетельствуют о чудовищных взрывах звёзд, которыми, однако, их жизнь не всегда заканчивается.

Расскажем о судьбах звёзд подробнее.

2. ОТ ГАЗОВОГО ОБЛАКА ДО БЕЛОГО КАРЛИКА

Расскажем сначала о «спокойных» стадиях эволюции звезды.

На пути к главной последовательности

Рождение всех звёзд происходит примерно одинаково. Облако разреженного межзвёздного газа под действием гравитации сжимается и *нагревается*. Когда температура в центре облака достигает нескольких миллионов градусов, начинаются *термоядерные реакции синтеза* — превращение водорода в гелий.

Это и есть рождение звезды: она начинает *светить*.

Выделение энергии при термоядерных реакциях значительно повышает температуру в центральной части звезды, и давление там настолько возрастает, что сжатие под действием тяготения прекращается. Звезда переходит в *стационарное* состояние, то есть состояние, в котором она пребывает длительное время. При этом сила давления раскалённого газа, непрерывно подогреваемого термоядерными реакциями, в точности уравнивает силу тяготения.

Пребывание на главной последовательности

В стационарном состоянии звезда проводит «лучшую» часть своей жизни, измеряемую миллионами и даже миллиардами лет. При этом чем больше масса звезды, тем больше давление в её центре, и, следовательно, необходима бóльшая температура для уравнивания тяготения.

Поэтому находящиеся в стационарном состоянии звёзды бóльшей массы имеют одновременно и бóльшую температуру, и бóльшую светимость. Значит, для таких звёзд чем выше температура, тем выше светимость. А это как раз и есть главное свойство звёзд главной последовательности.

Итак, мы приходим к выводу, что *звёзды главной последовательности* — это звёзды, находящиеся в стационарном состоянии.

Теперь становится понятным, почему большинство известных звёзд принадлежат главной последовательности — просто потому, что в стационарном состоянии звёзды пребывают долго.

Как зависит время жизни звезды от её массы? Более массивные звёзды «сгорают» быстрее, чем менее массивные, по-

тому что, как мы видели, чем больше масса звезды, тем выше температура в её центральной области и поэтому тем больше там скорость термоядерных реакций.

Жизнь белых и голубых гигантов в *тысячи раз* короче, чем жизнь нашего Солнца. Уже сам факт, что мы можем наблюдать такие молодые звёзды *сегодня*, означает, что *процесс образования звёзд продолжается*.

«Сотворение мира» ещё далеко не завершено!

Зато красные карлики, находящиеся в самом низу главной последовательности, живут значительно дольше звёзд типа Солнца, так как они расходуют свою энергию куда экономнее. Вот уж поистине «тише едешь — дальше будешь»: продолжительность жизни красных карликов сопоставима со временем существования Вселенной.

Уход с главной последовательности

С главной последовательности — в красные гиганты. Когда в центральной области звезды весь имеющийся там водород превратится в гелий, образуется *гелиевое ядро*.

Но это ещё не конец ядерных реакций, потому что гелий представляет собой тоже ядерное топливо: при температурах выше 15 миллионов градусов начинаются термоядерные реакции, при которых гелий превращается в углерод. Такие температуры возникают, когда масса гелиевого ядра становится достаточно большой, так как с увеличением массы увеличиваются гравитационные силы, сжимающие ядро звезды. А при ещё более высоких температурах начинаются и другие термоядерные реакции.

«Включение» новых термоядерных реакций сопровождается новым выделением энергии и, следовательно, ещё большим повышением температуры. Возросшее при этом давление «побеждает» гравитацию, и звезда «вздувается». Наружные слои звезды отбрасываются на большое расстояние от ядра, а их температура резко падает. Звезда становится огромной и относительно холодной, то есть приобретает красный цвет — это и есть *красный гигант*. Примерно через 5—6 миллиардов лет стать красным гигантом суждено и нашему Солнцу.

Некоторые красные гиганты пульсируют, проходя стадию уже знакомых вам цефеид.

В состоянии красного гиганта звезда пребывает тоже сравнительно долго — этим и объясняется «населенность» области красных гигантов на диаграмме «температура — светимость».

Красный гигант превращается в белого карлика. Однако когда-то приходит конец всем возможным ядерным реакциям, так как они могут продолжаться только до тех пор, пока энергия *выделяется*. «Золой» термоядерных реакций является железо: так как энергия связи для ядер железа максимальна, при образовании из железа любых других элементов энергия уже не выделяется, а *поглощается*.

Внешние слои звезды, постепенно расширяясь, навсегда покидают ядро, и на месте звезды остаётся лишённое ядерных источников энергии, но раскалённое добела «железное ядро» диаметром порядка диаметра Земли. Это и есть *белый карлик*.

Эволюция звезды на диаграмме «температура—светимость». Если изобразить траекторию эволюции звезды — от газового облака до белого карлика — на диаграмме «температура — светимость», мы получим кривую, показанную на рисунке 41.1. Звезда, родившись, выходит на главную последовательность, долго пребывает на ней, затем становится красным гигантом и, наконец, белым карликом.

Дальнейшая судьба звезды определяется её массой.

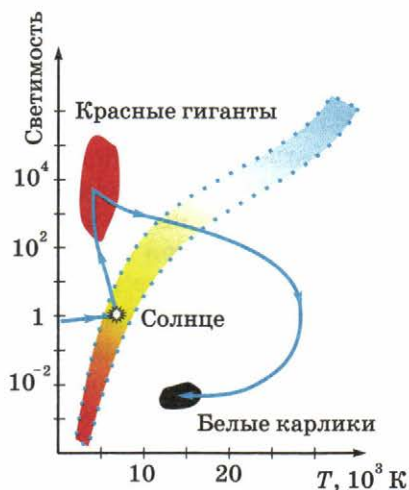


Рис. 41.1

3. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД РАЗНОЙ МАССЫ

Эволюция звезды с массой, примерно равной массе Солнца

Звёзды с массой, не сильно отличающейся от массы Солнца (а таких звёзд — большинство), заканчивают свою жизнь сравнительно «мирно» — без взрывов.

Образовавшиеся из них белые карлики постепенно остывают, становясь в конце концов невидимыми. Но это происходит чрезвычайно медленно, так как из-за очень малой поверхности белый карлик излучает энергию очень медленно. К тому же его остывание несколько притормаживается гравитацион-

ным сжатием, которое продолжает «подогревать» белый карлик. Длительность пребывания звезды в стадии белого карлика и объясняет «населённость» этой области на диаграмме «температура — светимость».

Картина неизбежного остывания белого карлика кажется довольно грустной, но, оказывается, это не всегда конец жизни звезды. Если вблизи белого карлика есть другая звезда, у него может начаться новая жизнь с гигантскими «фейерверками». Об этом мы расскажем ниже.

Эволюция звезды с массой, большей массы Солнца

Нейтронные звёзды. Если масса ядра звезды превышает массу Солнца более чем в 1,4 раза, колоссальная сила тяготения «вдавливает» электроны в протоны, в результате чего образуются нейтроны.

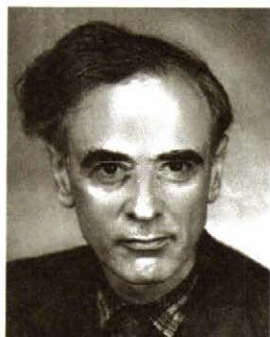
При этом возникнет *нейтронная звезда*, то есть звезда, состоящая в основном из нейтронов, — как бы гигантских размеров «атомное ядро». Масса такой звезды сопоставима с массой Солнца, а диаметр составляет всего *несколько километров!*

Плотность нейтронной звезды близка к плотности атомного ядра и во много раз превышает плотность белых карликов: масса напёрстка вещества нейтронной звезды равна массе нескольких гружёных товарных вагонов.

Модели образования нейтронных звёзд разработали советский физик Л. Д. Ландау и американский физик Р. Оппенгеймер.

Взрывы сверхновых. При образовании нейтронной звезды гравитационное сжатие её ядра происходит за доли секунды. В результате наружные слои, содержащие еще большой запас термоядерного топлива, стремительно падают к центру. При их ударе о ядро температура повышается в сотни и даже тысячи раз, и происходит термоядерный взрыв чудовищной силы.

За краткое время выделяется колоссальное количество энергии — светимость звезды возрастает в *миллиарды раз*. Это — так называемая вспышка *сверхновой*. При этом значительная часть звезды, а иногда и вся звезда, разлетается.



Лев Ландау
1908–1968

Именно взрывами сверхновых и были наблюдавшиеся с Земли три вспышки звёзд, хорошо видимые невооружённым глазом — в 1054-м, 1572-м и 1604 годах. Следы этих взрывов сохранились и сегодня. В тех местах небосвода, где произошли вспышки сверхновых, с помощью телескопа можно увидеть гигантские облака вещества, выброшенного при взрывах. Наиболее значительное такое облако — знаменитая Крабовидная туманность, представляющая собой след взрыва сверхновой 1054 года (рис. 41.2).



Рис. 41.2

Происхождение химических элементов

При взрыве сверхновой температура исчисляется *миллиардами градусов*. При столь огромной температуре протекают даже такие ядерные реакции, при которых происходит поглощение энергии, в результате чего «выпекаются» ядра более тяжёлых элементов периодической таблицы Менделеева. И после взрыва эти ядра тяжёлых элементов попадают в облако межзвёздного газа.

Но многие ученые считают, что гибель одних звёзд открывает возможность рождения новых! И они рождаются теперь из облака, *обогащённого тяжёлыми элементами*. Их называют звёздами «второго поколения». Если какой-либо из них «посчастливится» в свою очередь стать сверхновой, то при её взрыве «выпечется» очередная порция тяжёлых элементов, которые войдут в состав звёзд «третьего поколения», — и так в каждом следующем поколении звёзд доля тяжёлых элементов будет увеличиваться.

В рамках этой гипотезы наше Солнце является звездой второго, а может быть и третьего, поколения. Вот почему в Солнечной системе «хватало» тяжёлых элементов для образования планет земной группы, на одной из которых смогла зародиться жизнь. «Заплачено» за это, как мы видим, «жизнью» звёзд — взрываясь, они порождали химические элементы, из которых мы состоим.

Этот чрезвычайно долгий путь к возникновению жизни объясняет, почему она так редка во Вселенной: мы до сих пор

не нашли нигде ни «братьев по разуму», ни вообще каких-либо следов жизни — нигде, кроме нашей Земли. И такая уникальность жизни на Земле делает бесконечной нашу ответственность за её сохранение.

Чёрные дыры. Если масса звезды значительно превышает массу Солнца, гравитационное сжатие её ядра, возможно, продолжается и после образования нейтронной звезды. В таком случае сила тяготения становится настолько огромной, что ничто уже не может вырваться наружу — даже *свет*, то есть звезда превращается в *чёрную дыру*.

Теория тяготения, с помощью которой можно исследовать свойства чёрных дыр, появилась в начале 20-го века. Она называется *общей теорией относительности*. Создал её А. Эйнштейн, с которым мы многократно встречались в нашем курсе.

Большой вклад в развитие теории чёрных дыр внесли английский физик С. Хокинг и советский физик Я. Б. Зельдович. Согласно современным представлениям в нашей Галактике порядка ста миллионов чёрных дыр, являющихся остатками наиболее массивных звёзд. А в центре Галактики, видимо, есть чёрная дыра с массой в несколько миллионов масс Солнца. И хотя она непрерывно поглощает звёзды, «пищи» ей хватит ещё на миллиарды лет.

Эволюция двойных звёзд

Двойные звёзды. Многие звёзды образуют систему *двойных* звёзд, обращающихся вокруг общего центра масс.

Иногда видны обе звезды из пары, но часто о существовании второй звезды догадываются по косвенным признакам.

Например, в середине 19-го века немецкий астроном Ф. Бессель обнаружил, что Сириус совершает еле заметное волнообразное движение. Это можно было объяснить только вращением Сириуса и какой-то другой звезды вокруг общего центра масс. Но чтобы «заставить» массивный Сириус совершать такое движение, вторая звезда также должна быть массивной и поэтому достаточно яркой, однако никакой звезды вблизи Сириуса долгое время не удавалось увидеть даже в телескоп. Когда же её, наконец обнаружили, выяснилось, что это еле-еле заметная звёздочка. Как вы уже, наверное, догадались, спутник Сириуса оказался *белым карликом*.

Другим указанием на то, что звезда может быть двойной, является, как мы уже говорили, периодическое изменение её

яркости. Например, блеск яркой звезды Алголь каждые 69 часов на короткое время уменьшается более чем вдвое, а затем так же быстро возрастает до прежнего значения. Такое «подмигивание» звезды вызывало тревогу, которая отразилась даже в её арабском названии: «Алголь» означает «голова демона».

Загадку Алголя разгадал английский астроном Дж. Гудрайк¹: вокруг Алголя обращается более слабая звезда, которая периодически заслоняет часть Алголя от земного наблюдателя.

Новые. Если одна из звёзд, составляющих пару двойных, уже стала белым карликом, а вторая ещё находится в стационарном состоянии, белый карлик может начать «перетягивать» на себя звёздное вещество второй звезды — в основном водород, являющийся замечательным термоядерным горючим.

На слой водорода, осевшего на маленьком, но чрезвычайно массивном белом карлике, действует огромная сила тяготения. Она сжимает водород, который, нагревшись до температуры термоядерного «возгорания», вспыхивает весь сразу. Это — так называемый взрыв *новой*.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Расскажите, как происходит рождение звезды.
2. Где на диаграмме «температура — светимость» находятся звёзды, пребывающие в стационарном состоянии?
3. Как зависит время жизни звезды от её массы?
4. Опишите основные этапы эволюции звезды с массой, примерно равной массе Солнца.
5. Расскажите, как образуются красные гиганты и белые карлики.
6. Расскажите, как появляются нейтронные звёзды. Что они собой представляют?
7. По какой причине происходит взрыв сверхновой?
8. Как попадают в межзвёздную среду ядра тяжёлых элементов?

¹ Когда Джон Гудрайк сделал это открытие, ему было 18 лет.

§ 42. ГАЛАКТИКИ

1. НАША ГАЛАКТИКА — МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

В ясную безлунную ночь, особенно вдали от города, хорошо заметна мягкая светящаяся полоса, опоясывающая всё небо. Это — *Млечный Путь*¹ (рис. 42.1).

Древних астрономов удивляло, что эта светящаяся туманность никогда не меняет *ни своей формы, ни положения на небесном своде*, — ведь такое постоянство свойственно только звёздам.

Загадку Млечного Пути разгадал Галилео Галилей, направив на него построенный им телескоп: оказалось, что это — *колоссальное скопление звёзд*.

И тогда стало понятно, почему форма и положение этой «туманности» остаются неизменными.

На рисунке 42.2 показано, каким видится небольшой участок Млечного Пути, если рассматривать его в телескоп.

Расстояния между звёздами в этом скоплении звёзд в *миллионы* раз больше размеров самих звёзд!

Следующий шаг к разгадке Млечного Пути сделал английский астроном Уильям Гершель во второй половине 18-го века.

Изучив расположение звёзд на различных участках неба, он пришел к выводу, что Солнце принадлежит огромному звёздному скоплению, имеющему как бы форму диска.

Когда мы смотрим вдоль плоскости этого диска, то видим густо заполненное звёздами небо — это и есть Млечный Путь.

¹ Согласно одному из древнегреческих мифов эта светящаяся полоса — след пролитого молока.



Рис. 42.1



Рис. 42.2

А когда мы смотрим перпендикулярно плоскости диска, мы, естественно, видим меньше звёзд.

Дальнейшие астрономические исследования подтвердили предположение Гершеля: оказалось, что Солнце принадлежит огромной звёздной системе, имеющей форму колоссальной спирали. Эта звёздная система была названа *Галактикой*¹ с большой буквы. За ней сохранилось также название *Млечный путь*. Другие подобные звёздные системы называют тоже галактиками (но с маленькой буквы)

Размеры и структура нашей Галактики

В Галактике, по разным оценкам, находится от 200 миллиардов до одного триллиона (10^{12}) звёзд. Диаметр Галактики около 100 тысяч световых лет, причём Солнце находится на расстоянии примерно 30 тысяч световых лет от центра Галактики.

Даже наши далекие потомки вряд ли когда-либо смогут посмотреть на нашу Галактику со стороны. Но астрономы нашли другие галактики, похожие на нашу. Одна из них изображена на рисунке 42.3. Такие галактики называют *спиральными*. В нашей Галактике четыре спиральные ветви, а в её центре есть ядро, где звёзды расположены в тысячи раз гуще, чем в «нашей» части Галактики. Предполагают, что в центре ядра Галактики находится массивная черная дыра массой в несколько миллионов солнечных масс.



Рис. 42.3

Мы не видим с Земли центральной области Галактики, потому что она скрыта от нас гигантскими облаками межзвёздной пыли, представляющими непреодолимое препятствие для видимого света. Однако астрономам удалось всё-таки разглядеть ядро Галактики, уловив исходящее из него инфракрасное излучение, для которого межзвёздная пыль прозрачна.

Все звёзды Галактики вращаются вокруг её центра под действием сил всемирного тяготения. Так, Солнце совершает один оборот вокруг центра Галактики примерно за 200 милли-

¹ От греческого «галаксиас» — молочный.

онов лет, двигаясь со скоростью около 250 км/с (относительно центра Галактики).

Проведём сравнение. Чтобы представить себе, насколько неравномерно распределено вещество в Галактике, выберем масштаб, при котором «Солнце» было бы с булавочную головку — это масштаб, при котором 1 световой год соответствует 10 км. Расстояния между «звёздами» — булавочными головками в нашей области этой модели Галактики исчислялись бы тогда десятками и сотнями километров (например, ближайшая к нам «звезда» находилась бы на расстоянии сорока с лишним километров).

Вся же «Галактика» даже при таком огромном уменьшении осталась бы огромной: её диаметр был бы равен миллиону километров, то есть почти в три раза больше «настоящего» расстояния от Земли до Луны!

2. ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

Галактика Андромеды

На ночном небе северного полушария можно увидеть невооружённым глазом крошечное туманное пятнышко в созвездии Андромеды, которое называли туманностью Андромеды. При наблюдении в телескоп можно заметить очень интересную структуру этой туманности (рис. 42.4).



Рис. 42.4

Отдельные видимые на этой фотографии звезды — это звёзды *нашей* Галактики, находящиеся во много раз ближе к нам, чем галактика Андромеды.

В середине 18-го века немецкий учёный И. Кант предположил, что туманность Андромеды — это очень далёкая огромная звёздная система, подобная нашей.

Предположение Канта подтвердилось в начале 20-го века, когда американский астроном Эдвин Хаббл с помощью только что построенного очень мощного телескопа смог различить отдельные звёзды по краям туманности Андромеды.

Согласно современным представлениям туманность Андромеды — это такая же гигантская звёздная система, как и

наша Галактика, даже несколько больше. Её назвали *галактикой Андромеды*. От нашей Галактики до галактики Андромеды около 2 миллионов световых лет. Галактика Андромеды также является спиральной.

С открытия галактики Андромеды началась эра «галактической астрономии»: в 20-м веке астрономы открыли, что существуют *миллиарды* галактик.

Типы галактик

В 1923 году Хаббл заметил, что все галактики по форме можно разделить на три типа. Кроме уже знакомых нам спиральных галактик, существуют также *эллиптические* (рис. 42.5) и *неправильные* (рис. 42.6).

Спиральные галактики, к числу которых принадлежат наша Галактика и галактика Андромеды, составляют около 70 % всех галактик. Эллиптических галактик примерно 25 %, а неправильных — не более 5 %.

Как выяснилось впоследствии, галактики разных типов отличаются также по составу звёзд.

В спиральных галактиках много молодых звёзд, в том числе белых и голубых гигантов. Причём в ветвях этих галактик много межзвёздного газа, являющегося звёздным «строительным материалом», то есть в спиральных галактиках процесс образования звёзд продолжается. Идёт он и в неправильных галактиках.

А вот эллиптические галактики состоят в основном из старых красноватых звёзд, и в них практически нет межзвёздного газа, то есть в этих галактиках звёзды уже не рождаются.



Рис. 42.5

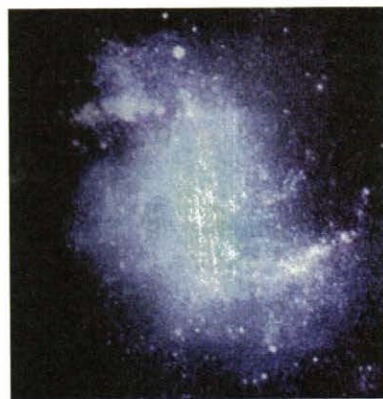


Рис. 42.6

Группы и скопления галактик

Галактики притягиваются друг к другу силами тяготения, объединяясь в *группы галактик*, а группы объединяются в *скопления галактик*. У нашей Галактики есть два спутника — небольшие галактики, названные Большим и Малым Магеллановыми Облаками (их обнаружил один из спутников Магеллана; они видны только в Южном полушарии). Есть спутники и у галактики Андромеды.

Наша Галактика и галактика Андромеды, в свою очередь, входят в так называемую Местную группу галактик, содержащую несколько десятков галактик. А Местная группа — всего лишь «маленькое уплотнение» недалеко от края «Местного сверхскопления» галактик диаметром около 100 миллионов световых лет.

Крупномасштабная структура Вселенной

Когда астрономы освоились с галактическими и межгалактическими масштабами, они решили выяснить, как распределены галактики во Вселенной. На рисунке 42.7 приведена составленная из тысяч отдельных фрагментов карта распределения галактик, видимых в современные телескопы.



Рис. 42.7

Как мы видим, распределение галактик имеет *ячеистую структуру*, сходную со структурой пористого тела.

Размеры гигантских ячеек этой структуры составляют сотни миллионов световых лет.

Квезары

Во второй половине 20-го века появились телескопы, с помощью которых астрономы смогли заглянуть на расстояния в

миллиарды световых лет. И там они обнаружили источники излучения, подобных которым в близкой к нам части Вселенной вообще нет!

Их назвали *квазарами* от английского *quasi-stellar*, что означает «звездopodobный», так как долгое время квазары принимали просто за очень далёкие звёзды. Когда же выяснилось, что расстояния до квазаров исчисляются *миллиардами* световых лет¹, стало ясно, что они не могут быть «просто звёздами», так как на таких расстояниях даже самые яркие звёзды не видны в лучшие телескопы. Если квазар виден на таком расстоянии, мощность его излучения в десятки и даже сотни раз превосходит мощность излучения *целой галактики*. И так, самые мощные источники энергии во Вселенной — это квазары.

Ещё более интригующее свойство квазаров состоит в том, что их «сверхгалактическая» мощность излучения исходит из чрезвычайно малой (по космическим меркам) области пространства — размеры квазаров порядка размеров Солнечной системы!



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Расскажите о том, что представляет собой Млечный Путь.
2. Каковы размеры и форма Галактики?
3. Расскажите о положении Солнца в Галактике.
4. Сколько примерно звёзд в Галактике?
5. Можно ли увидеть с Земли ядро Галактики?
6. Как движется Солнце относительно центра Галактики?
7. Расскажите о галактике Андромеды.
8. Какие типы галактик вам известны? К какому из них принадлежит наша Галактика?
9. Опишите скопления и сверхскопления галактик.
10. Какова крупномасштабная структура Вселенной?
11. Каковы основные свойства квазаров?

¹ В следующем параграфе мы расскажем, как удалось их измерить.

§ 43. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

1. РАЗБЕГАНИЕ ГАЛАКТИК

Красное смещение

Учёным удалось измерить скорости, с которыми звёзды и даже далёкие галактики приближаются к нам или удаляются от нас. Помогли учёным спектры излучения звёзд — а точнее, *отличия* в спектрах разных звёзд.

Как вы уже знаете, атомы каждого вещества характеризуются своим «индивидуальным» спектром, состоящим из отдельных линий (об этом мы расскажем далее). Оказывается, однако, что, если источник света удаляется от наблюдателя или приближается к нему, линии в спектре смещаются — к красному концу спектра, если источник света удаляется, и к фиолетовому концу спектра, если источник приближается.

Смещение линий спектра при движении источника света — проявление так называемого *эффекта Доплера*, который имеет место при распространении любых волн — как звуковых, так и световых¹. Приведём известный пример этого эффекта: когда мимо вас на большой скорости проезжает автомобиль, тон издаваемого им звука (мотора или гудка) выше, когда автомобиль приближается, и ниже, когда он удаляется.

Таким образом, по величине смещения линий в спектре звезды можно определить, с какой скоростью удаляется или приближается эта звезда.

Как выяснилось, некоторые звёзды приближаются к нам, а некоторые — удаляются.

Но когда в начале 20-го века таким же образом измерили скорости галактик, оказалось, что практически *все* галактики *удаляются* от нас: в их спектрах линии излучения смещены к *красному* концу. Исключение составили только ближайšie галактики (в том числе галактика Андромеды).

Закон Хаббла

Уже известный вам американский астроном Э. Хаббл решил выяснить: связана ли скорость удаления галактики с расстоянием до неё? И, проанализировав данные наблюдений, он обнаружил, что чем дальше находится галактика, тем быстрее

¹ Этот эффект был открыт в 19-м веке австрийским физиком Кристианом Доплером.

она удаляется, причём *скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до неё*.

Это соотношение между скоростью v удаления галактики и расстоянием r до неё получило название *закона Хаббла*. Его записывают обычно в виде

$$v = Hr.$$

Коэффициент пропорциональности H назвали *постоянной Хаббла*. Из её определения следует, что эта постоянная имеет размерность [1/время]. Из астрономических наблюдений следует, что

$$H \approx \frac{1}{13 \text{ миллиардов лет}}.$$

Что же означает этот стоящий в знаменателе огромный промежуток времени? Чтобы ответить на этот вопрос, запишем закон Хаббла в виде $r = vT$, где

$$T = \frac{1}{H} \approx 13 \text{ миллиардов лет.}$$

Формула $r = vT$ описывает *равномерное движение*, то есть движение с постоянной скоростью: удаляясь с постоянной скоростью v , галактика за время T удалилась от нас на расстояние r .

Расширение Вселенной

Итак, из закона Хаббла следует удивительный вывод: примерно 13 миллиардов лет назад все галактики начали разбегаться от нас! Но почему именно *от нас*? Значит ли это, что мы находимся в центре Вселенной?

Увы, честолюбивая надежда человека на центральное место во Вселенной в очередной раз не оправдалась! Чтобы понять, почему это так, представьте галактики точками, нарисованными на огромном резиновом листе, который равномерно растягивают во все стороны. При этом расстояния между *любыми точками* на поверхности резинового листа каждую минуту увеличиваются *в одно и то же число раз*.

А отсюда следует, что наблюдателю, живущему в *любой* галактике *расширяющейся Вселенной*, будет казаться, что все галактики разбегаются именно *от него*! Итак, наблюдаемое разбегание галактик означает просто, что *Вселенная расширяется*.



Эдвин Хаббл
1889–1953

2. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Модель Фридмана

Разбегание галактик, обнаруженное Хабблом в 1929 году, теоретически предсказал ещё в 1922 году советский учёный А. А. Фридман¹. Анализируя уравнения общей теории относительности Эйнштейна, Фридман доказал, что Вселенная не может оставаться стационарной: она должна либо расширяться, либо сжиматься. Фридман выбрал первую возможность и построил модель расширяющейся Вселенной.

Обнаруженное Хабблом разбегание галактик явилось подтверждением модели Фридмана.

Каков возраст Вселенной? Модель Фридмана в сочетании с законом Хаббла утверждает, что у Вселенной было «начало»: всё выглядит так, будто примерно *13 миллиардов лет назад* галактики начали разбегаться из одной точки.

Но что же происходило тогда в этой точке: как родилась Вселенная?

Большой взрыв и горячая Вселенная

Известный физик Джордж (Георгий) Гамов² узнал о модели расширяющейся Вселенной от самого Фридмана: Гамов был его учеником. Узнав об открытом Хабблом разбегании галактик, Гамов предположил, что начало Вселенной напоминало *Большой взрыв*.

Совместно с сотрудниками Гамов в 1948 году предложил модель *горячей Вселенной*. Согласно этой модели на началь-



Александр Фридман
1888–1925



Джордж Гамов
1904–1968

¹ А. А. Фридман был не только выдающимся математиком и физиком, но и замечательным лётчиком, а также известным метеорологом. Незадолго до смерти он поднялся на аэростате на рекордную для того времени высоту: 7400 метров.

² Гамов родился в Одессе, учился и работал в Ленинграде, затем некоторое время работал в различных европейских странах, а с 1934 г. жил и работал в США.

ных стадиях Вселенной вещество имело не только колоссальную плотность, но и чрезвычайно высокую *температуру*.

Реликтовое излучение. Из модели горячей Вселенной следовало, что и сегодня должно существовать пронизывающее всю Вселенную излучение, порождённое 13 миллиардов лет назад — ещё в ту раннюю пору, когда температура Вселенной была столь высока, что энергия электромагнитного поля была больше энергии вещества. Это излучение называли *реликтовым*, то есть сохранившимся от древних эпох (вот уж поистине древних!).

Расширяясь вместе со Вселенной, это излучение постепенно остывало и, по оценке Гамова, должно было бы сегодня иметь температуру¹ всего в несколько кельвинов.

И в 1964 году такое излучение с температурой чуть ниже 3 К действительно было обнаружено.

Открытие реликтового излучения стало триумфом модели горячей Вселенной, и с тех пор она стала общепринятой. Однако последующее развитие физики, астрофизики и астрономии вносило в неё всё новые уточнения.

Сценарий Большого взрыва. Согласно современным представлениям в первые моменты после Большого взрыва «главными» были сильные взаимодействия, благодаря которым возникли ядра водорода и гелия. Затем начали рождаться электроны, позитроны и нейтрино. Это происходило до тех пор, пока температура не упала до нескольких миллиардов градусов.

Следующую фазу расширения называют *фотонной эрой*, потому что она характеризуется преобладанием излучения над веществом. Она длилась около миллиона лет и закончилась, когда температура упала до трёх тысяч градусов: при такой температуре электроны и ядра начали образовывать атомы, вещество стало нейтральным и поэтому прозрачным для электромагнитного излучения.

«Получив свободу» и постепенно расширяясь, это излучение охлаждалось и стало тем самым реликтовым излучением, которое сохранилось до наших дней.

Начало формирования галактик. Когда Вселенная просуществовала один или два миллиарда лет, под действием сил

¹ Напомним, что излучение может характеризоваться температурой (см. главу «Кванты и атомы»).

тяготения из облаков водорода и гелия начали формироваться зародыши галактик, а затем в них — зародыши звёзд. Когда вещество в их центральной части нагрелось вследствие сжатия до миллионов градусов, начались термоядерные реакции.

3. БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ

Говоря о предполагаемом будущем Вселенной, мы имеем в виду события, которые могут произойти через *миллиарды* лет.

Оказалось, что будущее Вселенной зависит от *средней плотности материи* в ней. Если эта плотность меньше критической, равной, согласно космологическим моделям, примерно $10^{-26} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, то силы тяготения не смогут остановить про-

цесс расширения Вселенной, и она будет неограниченно расширяться. Это — *модель открытой Вселенной*.

Если же средняя плотность материи во Вселенной больше критической, силы тяготения через какое-то время остановят расширение Вселенной, а затем заставят вещество сжиматься. Это — *модель замкнутой Вселенной*.

Согласно астрономическим наблюдениям, плотность видимого современными приборами вещества во Вселенной ниже критической, что как будто свидетельствует в пользу открытой Вселенной, которая должна неограниченно расширяться. Однако есть веские основания предполагать существование «тёмной», или «невидимой», материи, масса которой может намного превышать массу видимого вещества.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Расскажите о законе Хаббла. Какие выводы можно сделать из этого закона?
2. Чему примерно равен возраст Вселенной?
3. Опишите основные этапы эволюции Вселенной согласно современным представлениям.
4. Объясните, почему закон Хаббла справедлив не только для нас, но и для жителей любой галактики.
5. Что такое Большой взрыв?
6. Какое вы знаете подтверждение модели горячей Вселенной?



Расстояния до ближайших звёзд часто измеряются световыми годами.

Светимостью звезды называется мощность её излучения. За единицу светимости принимают светимость Солнца.

Большинство звёзд принадлежат *главной последовательности* на диаграмме «температура—светимость». Кроме того, существует много *красных гигантов* — огромных звёзд с низкой температурой поверхности и *белых карликов* — очень малых звёзд с высокой температурой поверхности.

Эволюция звезды с массой, близкой к массе Солнца: облако разреженного межзвёздного газа \Rightarrow звезда на главной последовательности \Rightarrow красный гигант \Rightarrow белый карлик.

Эволюция звезды с массой, существенно большей массы Солнца: облако разреженного межзвёздного газа \Rightarrow белый или голубой гигант на главной последовательности \Rightarrow красный гигант \Rightarrow вспышка сверхновой \Rightarrow нейтронная звезда или чёрная дыра.

Диаметр нашей Галактики по современным представлениям, около 100 000 световых лет. Она содержит от 200 миллиардов до триллиона звёзд. В ядре Галактики, видимо, находится массивная чёрная дыра.

Ближайшие к нам другие галактики: Большое и Малое Магеллановы Облака и галактика Андромеды. *Галактики* образуют группы, скопления и сверхскопления.

Закон Хаббла: $v = Hr$, где v — скорость удаления галактики, r — расстояние до галактики. Постоянная Хаббла $H \approx 1/13$ миллиардов лет. Из закона Хаббла следует, что Вселенная расширяется из одной точки, причём расширение началось примерно 13 миллиардов лет назад.

Модель расширяющейся Вселенной была предложена советским учёным А. А. Фридманом.

Согласно *модели горячей Вселенной*, предложенной Гамовым, на начальных стадиях вещество во Вселенной имело колоссальную плотность и чрезвычайно высокую температуру. Подтверждением модели горячей Вселенной является обнаруженное *реликтовое излучение* с температурой немного ниже 3 К.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Путь великих открытий, сделанных учёными в течение нескольких столетий, мы с вами прошли всего за два года. Из-за этого многое пришлось оставить в стороне, но мы надеемся, что нам всё же удалось донести до вас радость, которую испытывали учёные, открывая законы природы.

Жажда открытий и была главной движущей силой, «действующей» на учёных в их очень трудном, но и самом интересном деле — ПОИСКЕ ИСТИНЫ. Такой силы нет в перечне сил физики — так же, как нет, например, силы духа или силы чувства. Но на самом деле такие силы есть, и именно они движут людьми — в том числе и учёными.

Природу этих сил изучает не физика, а другие науки: ведь физикой все науки не исчерпываются, хотя эта великая наука разгадала больше загадок мироздания, чем любая другая.

Развитие физики и астрономии привело нас к развенчанию представления о центральном месте человека во Вселенной: выяснилось, что наша Земля — всего лишь одна из многих планет, кружащихся вокруг одной из бесчисленного множества звёзд...

Однако в развитии науки можно увидеть и другое — торжество человеческого разума, дерзнувшего «объять необъятное».

Живущий на «заурядной» планете человек оказался сам весьма незаурядным: создав науки и построив приборы, он заглянул со своей «маленькой» планеты в невероятные глубины космоса и узнал возраст Вселенной. Вот уж, поистине, «не место красит человека, а человек — место».

1. НАБЛЮДЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Цель работы: исследовать поведение проводника с током в магнитном поле.

Оборудование: источник постоянного тока, дугообразный и полосовой магниты, штатив с лапкой, проволоочная катушка, реостат, ключ, соединительные провода.

Описание работы

Требуется определить (качественно), как зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, от значения магнитной индукции, силы тока в проводнике и длины проводника.

Ход работы

1. Положите дугообразный магнит на стол, как показано на рисунке 1, и подвесьте одну из катушек к лапке штатива, чтобы она не касалась вставленного в неё полюса дугообразного магнита.

Концы катушки подключите через реостат и ключ к источнику постоянного тока. Реостат установите на максимальное сопротивление.

2. Замкните цепь на несколько секунд и заметьте, насколько отклонится катушка от первоначального положения.

3. Изменяя положение ползунка реостата (то есть изменяя силу тока), повторите опыт 2—3 раза.

Сделайте вывод, как зависит сила, действующая на катушку, от силы тока в ней. Запишите свой вывод.

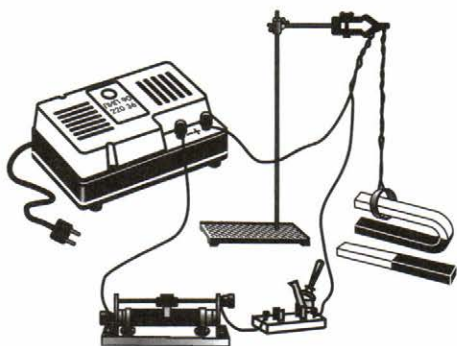


Рис. 1

¹ Лабораторные работы написаны совместно с В. А. Орловым.

4. Заметьте величину отклонения катушки от первоначального положения при той же силе тока (то есть при том же положении движка реостата) в случае, когда в катушке находятся два магнита (дугообразный и полосовой), сложенные вместе одноимёнными полюсами, как показано на рисунке 2.

Сравнив этот опыт с предыдущим, сделайте вывод, как зависит сила, действующая на катушку с током, от значения магнитной индукции. Запишите свой вывод.



Рис. 2

2. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Цели работы: 1) определить на опыте, от чего зависят сила и направление индукционного тока в катушке; 2) познакомиться с принципом действия трансформатора.

Оборудование: миллиамперметр¹, проволочная катушка, дугообразный и полосовой магниты, источник тока, школьный трансформатор, реостат, ключ, соединительные провода.

Описание работы

Индукционный ток в замкнутом контуре возникает при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. В данной работе магнитный поток изменяют следующими способами:

1) *изменяя во времени* магнитное поле, в котором находится неподвижный контур — например, вдвигая магнит в катушку или выдвигая его из катушки;

2) *перемещая* этот контур (или его части) в *постоянном* магнитном поле (например, надевая катушку на магнит).

Ход работы

1. Одну из катушек без сердечника подключите к зажимам миллиамперметра. Надевайте и снимайте катушку с северного полюса дугообразного магнита с различной скоростью (рис. 3).



Рис. 3

¹ Нулевое деление миллиамперметра должно находиться посередине шкалы.

Для каждого случая замечайте максимальное значение силы индукционного тока и его направление (по отклонению стрелки миллиамперметра). Запишите вывод.

2. Переверните магнит и наденьте катушку на его южный полюс, а затем снимите её. Повторите опыт, увеличив скорость движения катушки. Обратите внимание на показания миллиамперметра, в частности на направление отклонения стрелки прибора. Запишите выводы.

3. Сложите два магнита (полосовой и дугообразный) одноимёнными полюсами и повторите эксперимент с разной скоростью движения катушки относительно магнитов. Запишите вывод.

4. Соберите установку, схематически изображённую на рисунке 4.

5. Проведите следующие опыты.

а) Поставьте ползунок реостата в положение, соответствующее минимальному сопротивлению. Замкните цепь ключом. Запишите, что вы наблюдали при замыкании цепи.

б) Разомкните цепь. Запишите, что вы наблюдали при размыкании цепи.

в) При замкнутой цепи изменяйте положение ползунка реостата и наблюдайте за показаниями миллиамперметра. Запишите, что вы наблюдали.

г) Какие явления, наблюдаемые в этом опыте, помогают понять принцип действия трансформатора? Запишите свой ответ.

6. Запишите выводы из эксперимента.

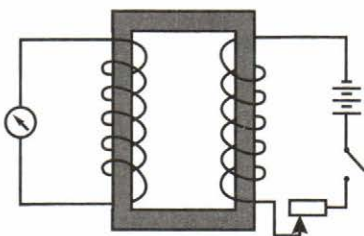


Рис. 4

3. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА

Цель работы: проверить зависимость периода колебаний нитяного маятника от его длины и измерить ускорение свободного падения.

Оборудование: штатив с муфтой и кольцом, шарик с отверстием, нить, часы с секундной стрелкой, измерительная лента, линейка с миллиметровыми делениями.

Описание работы

Период колебаний нитяного маятника вычисляют по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина нити. Из этой формулы следует, что квадрат периода пропорционален длине нити. Поэтому если уменьшить длину нити в 4 раза, период колебаний должен уменьшиться в 2 раза.

Из приведённой формулы для периода колебаний получаем, что $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$. Таким образом, измерив длину маятника и период его колебаний, можно определить на опыте значение ускорения свободного падения g .

Ход работы

1. Подвесьте к стоящему на краю стола штативу шарик на нити, подобрав длину нити так, чтобы шарик висел на расстоянии нескольких сантиметров от пола.

2. Измерьте расстояние l от точки подвеса до центра шарика.

3. Отклоните шарик от положения равновесия на 5—10 см и отпустите его.

4. Измерьте время t , в течение которого маятник совершает N полных колебаний (удобно взять $N = 40$). Период колебаний вычислите по формуле $T = \frac{t}{N}$.

5. Вычислите $g_{\text{эксп}} = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = \frac{4\pi^2 l N^2}{t^2}$ и сравните его с табличным значением ускорения свободного падения.

6. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

$l, \text{ м}$	N	$t, \text{ с}$	T	$g_{\text{эксп}}$	$\frac{g_{\text{эксп}}}{g}$

7. Уменьшите длину нити в 4 раза и повторите опыт. Сравните периоды колебаний в этом и предыдущем опытах. Запишите результат сравнения и сделайте вывод.

8. Запишите выводы из эксперимента.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

Цель работы: определить показатель преломления стекла, из которого изготовлена плоскопараллельная пластинка.

Оборудование: плоскопараллельная пластинка, булавки, линейка, транспортир.

Описание работы

Анализируя ход луча света сквозь плоскопараллельную пластинку, можно с помощью геометрических построений определить показатель преломления стекла, из которого она изготовлена.

Ход работы

1. Положите на стол лист картона, а на него — стеклянную пластинку.

2. Воткните в картон по одну сторону пластинки две булавки 1 и 2 так, чтобы булавка 2 касалась грани пластинки (рис. 5). Булавки будут отмечать направление падающего луча.

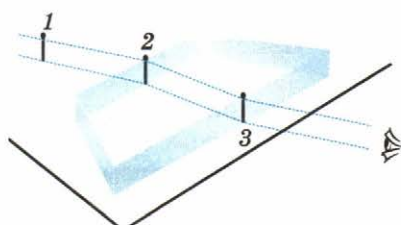


Рис. 5

3. Глядя сквозь пластинку на первые две булавки, воткните третью так, чтобы она закрывала первые две: тогда все три булавки будут находиться на одном луче. При этом булавка 3 должна касаться пластинки.

4. Уберите булавки, обведите пластину карандашом и в местах проколов листа картона булавками поставьте точки.

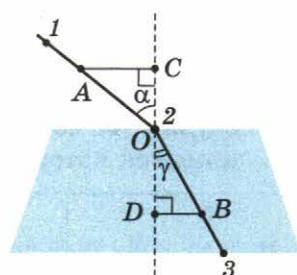


Рис. 6

5. Начертите падающий луч 1—2, преломленный луч 2—3, а также перпендикуляр к границе пластинки (рис. 6).

6. Отметьте на лучах точки A и B так, чтобы $OA = OB$. Из точек A и B опустите перпендикуляры AC и BD на перпендикуляр к границе пластинки (см. рис. 6).

7. Измерив AC и BD , вычислите показатель преломления стекла. Для этого воспользуйтесь определением показателя преломления:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}.$$

Поскольку $\sin \alpha = \frac{AC}{OA}$, а $\sin \gamma = \frac{BD}{OB} = \frac{BD}{OA}$, получаем:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{AC}{BD}.$$

8. Повторите опыт и расчёты, изменив угол падения α .

9. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

Номер опыта	AC , мм	BD , мм	n
1			
2			

10. Запишите выводы из эксперимента.

5. НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА¹

Цель работы: экспериментально изучить явления интерференции и дифракции.

Оборудование: электрическая лампа (одна на класс), две стеклянные (или прозрачные пластмассовые) пластинки, проволочная рамка, стеклянная трубка, мыльная вода, компакт-диск, спиртовка, спички, лезвие бритвы, тонкая чёрная ткань², пинцет.

Описание работы

Интерференция наблюдается при наложении волн, испускаемых одним и тем же источником, но приходящих в данную точку разными путями (например, после отражения от различных поверхностей).

Явление дифракции состоит в том, что вследствие волновой природы свет отклоняется от прямолинейного распространения — например, огибает края препятствий.

¹ Эту работу можно рекомендовать для выполнения дома.

² Удобно взять капрон.

В данной работе можно наблюдать явления интерференции и дифракции с помощью простейшего оборудования.

Ход работы

1. Окуните проволочную рамку в мыльный раствор и внимательно рассмотрите образовавшуюся мыльную плёнку. Обратите внимание, что при освещении плёнки белым светом (от окна или лампы) возникают окрашенные полосы.

С помощью стеклянной трубки выдуйте мыльный пузырь и внимательно рассмотрите его. При освещении его белым светом наблюдается образование цветных интерференционных полос.

Запишите ответы на вопросы.

- а) Как объяснить возникновение окраски мыльной плёнки?
- б) Почему окраска пленки всё время меняется?

2. Сложите вместе стеклянные пластинки и прижмите их друг к другу пальцами. Из-за того, что соприкасающиеся поверхности не идеально плоские, между пластинками образуются тончайшие воздушные пустоты. В результате отражения света от пластин возникают радужные полосы и кольца.

Почему при изменении нажима на пластинки меняются форма и расположение интерференционных полос? Запишите свой ответ.

3. Рассмотрите под разными углами поверхность компакт-диска, на которую производится запись.

Ответьте на вопросы.

- а) Что вы наблюдаете?
- б) Чем обусловлены наблюдаемые явления?

4. Возьмите пинцетом лезвие бритвы и нагрейте его в пламени спиртовки. Запишите ответы на вопросы.

- а) Какое явление вы наблюдали?
- б) Как его можно объяснить?

5. Посмотрите сквозь чёрную капроновую ткань на нить накала светящейся лампы. Поворачивая ткань вокруг оси, добейтесь чёткой дифракционной картины в виде двух скрещённых под прямым углом дифракционных полос. Объясните наблюдаемое явление.

6. В каких из проделанных вами опытов наблюдалось явление интерференции, а в каких — явление дифракции? Обсудите кратко ваш ответ.

7. Запишите выводы из эксперимента.

6. НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ

Цель работы: изучить сплошные спектры излучения твёрдых тел и линейчатые спектры газов; ознакомиться с устройством и работой спектроскопа.

Оборудование: спектроскоп¹, плоскопараллельная пластина со скошенными гранями, лампочка на подставке, набор спектральных трубок с водородом, гелием и неоном, прибор для зажигания спектральных трубок, экран с щелью.

Описание работы

Спектры излучения раскалённых твёрдых тел — сплошные, а спектры излучения газов, находящихся в атомарном состоянии, — линейчатые. По расположению и цвету линий в линейчатом спектре газа можно определить, какой это газ.

Ход работы

1. Укрепите спектроскоп в лапке штатива, расположив коллиматорную щель вертикально. На расстоянии 5—10 см от входной щели коллиматора установите электрическую лампочку так, чтобы нить накаливания и щель были на одном уровне. Рассмотрите через окуляр спектр излучения нити лампы. Запишите вывод.

2. Возьмите в одну руку экран с щелью, а в другую — стеклянную пластину со скошенными гранями. Экран расположите вертикально на фоне горящей лампы на расстоянии 30—40 см от глаза, а пластину — горизонтально перед глазами. Посмотрите на ярко освещённую щель в экране через грани пластины, расположенные под углом друг к другу.

Слегка поворачивая пластину вокруг вертикальной оси, определите последовательность цветов в сплошном спектре. Запишите выводы.

3. Наблюдайте линейчатый спектр водорода с помощью спектроскопа. Какие яркие линии спектра и в какой последовательности вы заметили? Запишите ваши ответы.

4. Повторите опыт с линейчатым спектром гелия. Запишите ваши выводы.

5. Повторите опыт с линейчатым спектром неона. Запишите выводы.

6. Запишите выводы из эксперимента.

¹ От одного до трёх на класс.

7. ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ¹ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ФОТОГРАФИЯМ

Цель работы: определить тип заряженной частицы по результатам сравнения её трека с треком протона в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Оборудование: фотографии треков заряженных частиц, лист кальки, угольник, линейка, карандаш.

Описание работы

Вам предложены фотографии треков двух заряженных частиц, движущихся по окружностям в плоскости, параллельной плоскости фотографии. Линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости фотографии. Одна из частиц — протон, а тип другой частицы требуется определить. Начальные скорости частиц равны.

Тип частицы определяют путём сравнения её удельного заряда (отношения электрического заряда к массе) $\frac{q}{m}$ с удельным зарядом протона.

Удельный заряд частицы, движущейся со скоростью v , можно определить, измерив радиус R траектории движения этой частицы в магнитном поле, модуль индукции которого равен B . Расчёт даёт, что $\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}$.

Для протона $\frac{e}{m_p} = \frac{v}{BR_p}$, где e — электрический заряд протона (равный элементарному электрическому заряду), m_p — масса протона, R_p — радиус траектории движения протона в магнитном поле.

Отсюда следует, что если неизвестная частица и протон движутся с одинаковыми по модулю скоростями в одном и том же магнитном поле, отношение их удельных зарядов обратно пропорционально отношению радиусов траекторий движения протона и неизвестной частицы: $\frac{q/m}{e/m_p} = \frac{R_p}{R}$.

Для измерения радиуса окружности надо провести две произвольные различные хорды этой окружности. Центр окруж-

¹ Треком называют след, оставленный движущейся частицей в устройстве для исследования процессов, происходящих с ядрами и элементарными частицами (в камере Вильсона или пузырьковой камере).

ности лежит на пересечении перпендикуляров к хордам, проведённых через их середины.

Ход работы

1. Изучите рисунок 7, сделанный по фотографиям треков двух заряженных частиц. Обе эти частицы — ядра лёгких элементов. Трек I принадлежит протону, а трек II — частице, тип которой надо определить.

2. На приведённом рисунке проведите описанное выше геометрическое построение и найдите радиусы траекторий неизвестной частицы и протона. Результат запишите.

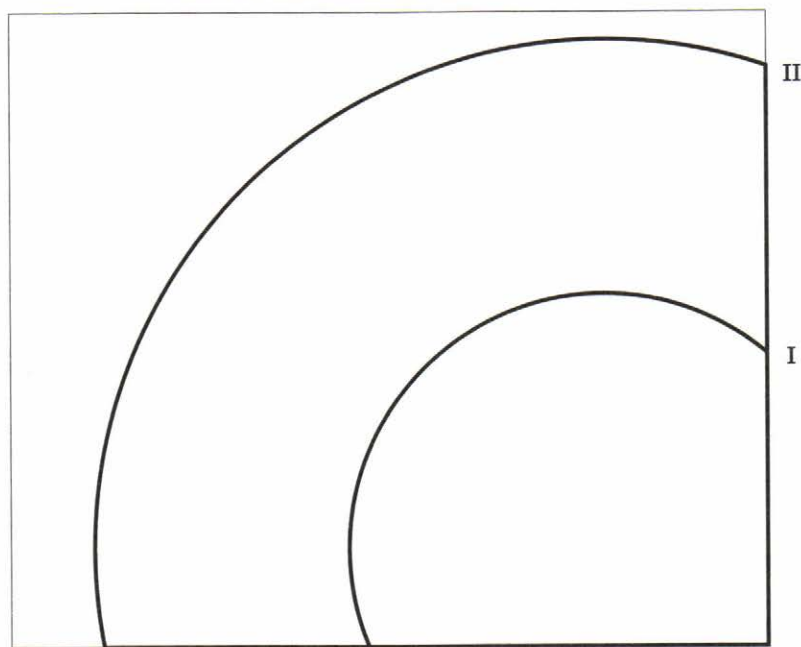


Рис. 7

3. Сравните удельные заряды неизвестной частицы и протона. Расчёт и результат запишите.
4. Определите тип неизвестной частицы. Запишите вывод.
5. Запишите выводы из эксперимента.

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Цель работы: экспериментально изучить модель радиоактивного распада.

Оборудование: около 100 одинаковых мелких монет в коробке, пустая коробка (отличающаяся по виду от первой), поднос.

Описание работы

За промежуток времени, равный периоду полураспада T , каждое из радиоактивных ядер может распасться с вероятностью $1/2$. Процесс радиоактивного распада можно моделировать подбрасыванием монеты, при котором с одинаковой вероятностью ($1/2$) выпадают «орёл» или «решка». Примем условно, что если выпадает «орёл», то это означает, что ядро не распалось, а если «решка», то распалось. Каждое подбрасывание монет соответствует промежутку времени, равному периоду полураспада. Распавшиеся «ядра»-монетки складывают во вторую коробку, а с нераспавшимися «ядрами»-монетками опыт повторяют несколько раз.

Ход работы

1. Подсчитайте начальное количество монет N_0 и занесите результат в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

Начальное количество монет	Количество бросаний, $n = \frac{t}{T}$	Количество «нераспавшихся ядер», N
	1	

2. Перемешайте монеты в коробке и высыпьте на поднос. Подсчитайте число «нераспавшихся ядер» N (то есть монет, которые легли орлом вверх) и запишите в таблицу (после первого бросания это число будет примерно равно половине начального количества монет). Положите «распавшиеся ядра» (то есть монеты, которые легли решкой вверх) во вторую коробку, а «нераспавшиеся ядра» — обратно в первую коробку для повторения опыта.

3. Повторите опыт, описанный в пункте 2, ещё 9 раз. Результаты подсчёта «нераспавшихся ядер» N записывайте каждый раз в таблицу.

4. Постройте в тетради график зависимости $N(t)$, соответствующий формуле радиоактивного распада $N = N_0 \cdot 2^{-n}$.

Отметьте в этих же координатах ваши экспериментальные точки и сделайте вывод. Запишите его.

5. Запишите выводы из эксперимента.



ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ¹

1. ФИГУРЫ ЛИССАЖУ

Цели проекта

1. Изучение сложения колебаний маятника, происходящих одновременно в двух плоскостях.
2. Изучение фигур Лиссажу, получающихся в результате сложения таких колебаний.

Задачи проекта

1. Изучение теоретического материала по данной теме.
2. Изготовление двойного маятника с песочницей, с помощью которого можно получать фигуры Лиссажу.
3. Нахождение соотношений между периодами колебаний по двум взаимно перпендикулярным осям, при которых получаются простые фигуры Лиссажу.

Оборудование

1. Прочная нить или тонкая верёвка длиной 3—4 метра.
2. Зажим типа «крокодил» или маленькая бельевая прищепка.
3. Воронка со срезанной трубкой или самодельная картонная воронка.
4. Хорошо промытый мелкий сухой песок.
5. Тёмный лист фанеры или прочного картона.

Выполнение проекта

Базовый уровень

1. Изготовьте маятник с песочницей, который может совершать колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с разными периодами. Для этого подвесьте песочницу на двух нитях одинаковой длины (рис. 1, а), а затем соедините нити вместе на некоторой высоте зажимом или прищепкой l (рис. 1, б). Удобно подвешивать маятник в дверном проёме.

При колебаниях такого маятника период колебаний по одной оси определяется длиной L (см. рис. 1), а по другой — длиной l .

Подложите под маятник заготовленный тёмный лист фанеры или прочного картона.

¹ В подготовке материалов для проектов принимал участие И. Н. Корнильев.

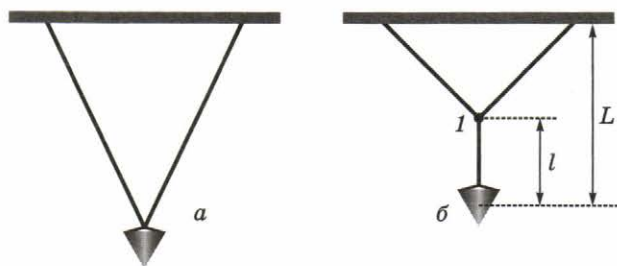


Рис. 1

2. Насыпьте в песочницу песок и, закрыв пальцем отверстие, через которое может высыпаться песок, отведите маятник в сторону так, чтобы начальное смещение по каждой оси было отличным от нуля.
3. Отпустите маятник. По следу, оставляемому струйкой песка на листе фанеры или картона, наблюдайте за фигурами, которые маятник описывает при колебаниях. При случайном соотношении длин L и l эти фигуры обычно не получаются замкнутыми.
4. Изменяя положение зажима или прищепки, подберите соотношение длин L и l так, чтобы получались замкнутые фигуры типа показанных на рисунке 2. Такие фигуры называют фигурами Лиссажу по имени французского учёного, который изучал их впервые.

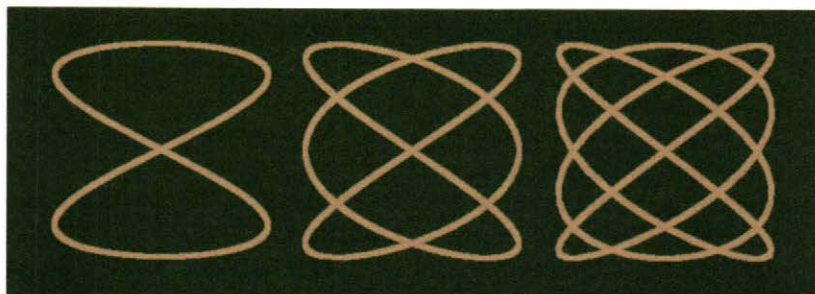


Рис. 2

5. Измерьте частоты колебаний маятника по одной и другой осям для полученных вами фигур Лиссажу и найдите отношение частот.
6. Проверьте, выполняется ли соотношение между периодом и длиной нити для колебаний в одной и другой плоскости.

Углублённый уровень

7. Рассчитайте, пользуясь формулой для периода колебаний математического маятника, чему должно быть равно отношение длин L и l для того, чтобы получались фигуры Лиссажу, показанные на рисунке 2.
8. Объясните, почему простые фигуры Лиссажу получаются, когда отношение периодов колебаний маятника в одной и другой плоскости равно отношению небольших натуральных чисел. Напишите уравнения зависимости координат x и y от времени для этих случаев.
9. Используя эти уравнения, составьте компьютерную программу, с помощью которой фигуры Лиссажу можно получать на мониторе компьютера.
10. Исследуйте фигуры Лиссажу с помощью школьного осциллографа (рис. 3).
11. Исследуйте с помощью компьютерного моделирования, как изменяется вид фигур Лиссажу при изменении соотношения между начальными фазами колебаний в одной и другой плоскости. Проверьте свои расчёты на опыте.
12. Спроектируйте простое устройство, позволяющее с помощью фигур Лиссажу определять частоту изменения напряжения для неизвестного источника переменного напряжения. Удобно при этом воспользоваться тем, что частота переменного напряжения в осветительной сети равна 50 Гц.

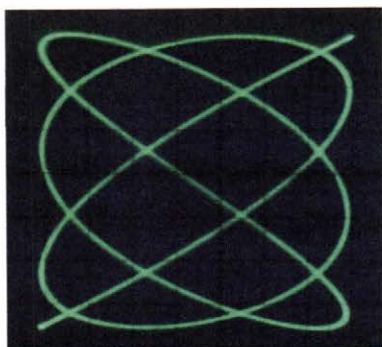


Рис. 3

2. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Техника безопасности

В опытах с лазерным фонариком избегайте попадания прямых и отражённых лучей фонарика в глаз: *это может повредить сетчатку глаза!*

Цели проекта

1. Изучить явления дифракции и интерференции света в опыте с прохождением лазерного пучка через ткань.

2. Изучить явления дифракции и интерференции света в опыте с компакт-диском.

Задачи проекта

1. Изучение теоретического материала по данной теме.
2. Получение интерференционной картины при прохождении света лазерной указки через ткань и объяснение особенностей этой картины.
3. Нахождение интерференционных максимумов при отражении света лазерной указки от компакт-диска.

Оборудование

1. Лазерный фонарик (указка или брелок).
2. Плотная капроновая ткань.
3. Белый экран (можно использовать светлую стену однородной окраски, лист бумаги или картона).
4. Компакт-диск (не содержащий ценной информации).
5. Самодельный транспортир (его можно изготовить из куска фанеры или плотного картона).

Выполнение проекта

Базовый уровень

1. Соберите установку для изучения прохождения света лазерной указки 1 через ткань 2 (рис. 4). Лазерный фонарик можно закрепить с помощью скотча или прищепки. Расстояние до экрана 3 должно быть не менее 3—4 метров. Опыт проводите вечером при выключенном освещении.

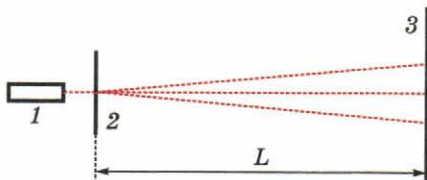


Рис. 4

2. Рассмотрите интерференционную картину, которая получается на экране при прохождении света фонарика через ткань (рис. 5).
3. Объясните, почему все наблюдаемые на экране интерференционные максимумы одного цвета.



Рис. 5

4. Объясните, почему интерференционные максимумы наблюдаются не только слева и справа от центрального (как в случае прохождения света через дифракционную решетку), а также сверху и снизу.
5. Измерьте расстояние s от центрального до первого интерференционного максимума и расстояние L до экрана. Используя то, что в данном эксперименте все углы малы, объясните, почему расстояние d между нитями, длина волны света λ и расстояние L до экрана связаны соотношением

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{s}{L}.$$

6. Приняв, что длина волны, соответствующая красному цвету, равна 0,7 мкм, определите, сколько нитей придется на 1 см ткани.
7. Рассмотрите прохождение света лазерной указки через различные виды тканей. Опишите, как по наблюдаемой интерференционной картине можно определить структуру ткани. Этот метод исследования структуры вещества используют в науке и технике.

Углублённый уровень

8. Осветите компакт-диск белым светом и объясните, почему при этом наблюдаются радужные полосы (рис. 6).
9. Соберите установку для нахождения интерференционных максимумов (рис. 7). Лазерный фонарик 1 укреплен на самодельном транспорте 2. Луч фонарика 3 отражается от лежащего на столе компакт-диска.



Рис. 6

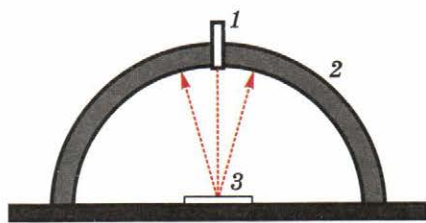


Рис. 7

Часть диска, на которую попадает луч фонарика, должна находиться в его периферийной части, причём бороздки должны быть ориентированы перпендикулярно плоскости транс-

порттира. Проверьте, что луч фонарика падает перпендикулярно плоскости диска. Для этого поместите рядом с фонариком лист белой бумаги. При правильной подготовке оборудования яркое пятно, образованное отражённым от компакт-диска светом, должно находиться близко к фонарику.

10. Перемещая лист бумаги вдоль транспортира, определите по появляющимся на этом листе ярким пятнам положения первого и второго интерференционных максимумов. Отметьте положения этих максимумов на транспортире.
11. Вычислите расстояние между бороздками на компакт-диске, приняв длину волны света, соответствующего красному цвету, равной $0,7 \text{ мкм}$.
12. Сравните расстояния между бороздками на CD и DVD-дисках. Объясните, почему на DVD-диске помещается больше информации, чем на CD-диске. Сравните длины дорожек на дисках обоих видов и объёмы информации, которые на них можно записать.

3. ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цели проекта

1. Изучить явление поляризации света.
2. Изучить свойства поляризованного света.

Задачи проекта

1. Убедиться на опыте в том, что свет, излучаемый жидкокристаллическим монитором, является поляризованным.
2. Убедиться на опыте в том, что свет, отражённый поверхностью воды, является поляризованным.
3. Познакомиться с явлением вращения плоскости поляризации.

Оборудование

1. Жидкокристаллический дисплей.
2. Блюдце с водой.
3. Несколько рулонов скотча разной толщины.

Выполнение проекта

Базовый уровень

1. Наклейте в произвольном порядке полоски скотча друг на друга так, чтобы внешние стороны образовавшейся пластины были не липкими.

2. Посмотрите на белый свет, излученный дисплеем, после его прохождения через пластину из полос скотча и последующего отражения на поверхности воды.



Рис. 8

Если смотреть на это отражение под углом $50\text{--}55^\circ$, вы увидите цветную мозаику (рис. 8). Она обусловлена тем, что при прохождении полос разной толщины плоскость поляризации света, излученного дисплеем, поворачивается на различные углы. При этом угол поворота различен для разных длин волн, чем и объясняется наблюдаемое разложение белого света на все цвета радуги.

Углублённый уровень

3. Убедитесь в том, что при рассматривании белого света на дисплее непосредственно через пластинку (без отражения на поверхности воды) цветная мозаика не наблюдается.
4. Объясните, почему появление цветной мозаики в результате отражения от поверхности воды доказывает, что отражённый от воды свет является поляризованным.



Интернет-ресурсы для дополнительного изучения физики

<http://school-collection.edu.ru/catalog/pupil/?subject=30> — Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов (ЦОР), раздел «Физика».

<http://potential.org.ru/> — Образовательный журнал для старшеклассников и учителей.

<http://allphysics.ru/> — Сайт для всех интересующихся физикой.

<http://sfiz.ru/index.php> — «Эта удивительная физика».

<http://experiment.edu.ru/> — Российский общеобразовательный портал.

<http://fiz.1september.ru/> — сайт журнала «Физика. Первое сентября».

<http://www.astronom-ntl.narod.ru/physmain.htm> — Астрономия и физика на ладони.

<http://gannalv.narod.ru/fiz/> — Физика в школе.

<http://presfiz.narod.ru/> — Физика в презентациях.

<http://physics03.narod.ru/> — Физика вокруг нас.

ОТВЕТЫ И УКАЗАНИЯ

§ 1. 1. На обоих рисунках северный полюс обозначен цифрой 2. 2. Стрелка компаса указывает на север потому, что северный полюс магнитной стрелки притягивается к южному магнитному полюсу Земли. Следовательно, вблизи Северного географического полюса расположен южный магнитный полюс нашей планеты. А северный магнитный полюс Земли расположен вблизи её Южного географического полюса. 3. Проводники с током электрически нейтральны¹. 4. Притягиваться будут витки, токи в которых направлены одинаково; отталкиваться — витки, токи в которых направлены противоположно. 5. Знак «плюс» соответствует цифре 1 на рисунке *a*, цифре 2 на рисунке *б*. 6. У к а з а н и е. Воспользуйтесь тем, что половинки магнита, полученные в результате его разрезания, тоже подобны катушкам с током. 7. Вниз. 8. У к а з а н и е. Учтите, что электроны заряжены отрицательно. 10. В случае *a*) модуль магнитной индукции равен нулю, в случае *б*) он равен $2B$. 11. Рисунок *a* иллюстрирует опыт с полосовым магнитом, рисунок *б* — с прямолинейным проводником с током. 14. В соседних витках пружины токи будут направлены одинаково, поэтому после замыкания ключа пружина сожмётся. Это приведёт к размыканию цепи, и под действием силы тяжести пружина вернётся к начальному состоянию, замкнув цепь. В результате в пружине снова возникнет ток, и она опять сожмётся, разомкнув цепь. Таким образом, после замыкания ключа будут наблюдаться колебания: пружина будет попеременно сжиматься и разжиматься, касаясь плиты.

§ 2. 1. а) 0. б) $0,05 \text{ Н}$. 2. Модуль магнитной индукции $B = 3,08 \text{ Тл}$. 3. Угол между проводником и вектором магнитной индукции $\alpha = 30^\circ$. 4. Сила тока в проводнике $I = 4 \text{ А}$. 5. У к а з а н и е. По рисунку *a* можно найти направление силы Ампера; по рисунку *б* — направление вектора магнитной индукции; по рисунку *в* — направление тока. 6. а) От нас. б) Влево. 7. а) Горизонтально. б) Вертикально. 8. У к а з а н и е. По рисунку можно найти направление силы Ампера. 9. в) Уменьшаться до нуля. 10. б) В положении, изображённом на рисунке 2.10. в) Растягивают. 11. У к а з а н и е. По рисунку можно найти направление тока в проводнике. 12. б) 45° . в) $0,35 \text{ Н}$.

§ 3. 1. а) В $8,8 \cdot 10^9$ раз. б) В $4,4 \cdot 10^9$ раз. 2. У к а з а н и е. По рисунку *a* можно найти направление силы Лоренца; по рисунку *б* — направление вектора магнитной индукции; по рисунку *в* — знак заряда частицы. 3. У к а з а н и е. По рисунку можно найти направление

¹ Строго говоря, это не совсем точно: вокруг проводников с токами существует электрическое поле. Однако в рассматриваемых примерах сила взаимодействия проводников, обусловленная электрическими силами, намного меньше силы, обусловленной магнитным взаимодействием.

силы Лоренца. 4. Нет. 5. Указание. Сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы. 8. а) Против часовой стрелки. б) Протон; 1835. в) Для протона; в 1835 раз. 9. Может: если скорость частицы направлена так же, как вектор магнитной индукции поля, или противоположно ему. 10. а) Положительный. б) 314 Кл/кг. в) Радиус и период обращения уменьшатся. г) Лишнее данное — радиус окружности.

§ 4. 1. а) Blq . б) $\frac{Blq}{m}$. в) \sqrt{Lg} . г) $\sqrt{5Lg}$. д) $q_{\min} = \frac{m\sqrt{5Lg}}{Bl}$.

е) 7,3 Кл. 2. а) Вправо. б) $\frac{B_0Il - ma}{mg}$. в) $B \leq B_0 - \frac{ma}{Il}$. 3. а) К нам.

б) $I > \frac{mg(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}{Bl(\cos\alpha - \mu\sin\alpha)}$. в) От нас. Указание. Если $\operatorname{tg}\alpha < \mu$, то

при отсутствии силы Ампера скорость стержня при движении вниз будет уменьшаться, то есть ускорение стержня будет направлено вдоль наклонной плоскости вверх (см. § 19 в нашем учебнике для

10-го класса). г) $I = \frac{mg(\mu\cos\alpha - \sin\alpha)}{Bl(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}$. 4. б) На участок провода, рас-

положенный вблизи точки А, будет действовать сила Ампера, направленная от нас, а на участок провода, расположенный вблизи точки С, — к нам. в) Если смотреть сверху, то сила Ампера, действующая на верхнюю часть провода, будет поворачивать провод по часовой стрелке, а сила Ампера, действующая на нижнюю часть провода, — против. В результате провод обовьётся вокруг полосового магнита, как показано на рисунке 1. г) Притягиваться. 10. Увеличится в $\sqrt{2}$ раз.

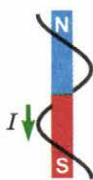


Рис. 1

11. Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. 12. б) $v = \frac{E}{B}$. в) Не изменится. 13. а) $\frac{(Blq)^2}{2m^2g}$.

б) $\frac{mg}{2} - \frac{(qBl)^2}{4Lm}$. 14. а) $\frac{(BlQ)^2}{2m}$. б) $\frac{BlQ}{\sqrt{2km}}$. 15. а) $m = \frac{Bl(I_1 - I_{\min})}{a_1}$.

б) $\frac{I_{\min}a_1}{g(I_1 - I_{\min})}$. 16. а) От нас. б) $\frac{BlI(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{m} - \mu g$. 17. а) От нас.

б) $\frac{mg(\mu\cos\alpha + \sin\alpha)}{IL}$. 18. б) На участок стержня, расположенный

вблизи точки А, будет действовать сила Ампера, направленная вниз, а на участок стержня, расположенный вблизи точки С — вверх. в) Стержень 2 повернётся так, чтобы ток в нём был направлен так же, как в стержне 1. г) Притягиваться. 20. а) $2 \cdot 10^6 \frac{M}{C}$. б) $r = 5,1$ мм;

$h = 5,6$ см. в) Не будет. 21. $\frac{E}{rBB_1}$.

§ 5. 3. б) $6,3 \cdot 10^{-2}$ Вб. в) 60° . 4. В случаях д) и е). Указание. В случаях а) — г) не изменяется магнитный поток через рамку. 5. Вправо. 6. Притягиваться. 7. Подтверждает. 8. а) Кольцо будет отталкиваться от магнита. б) Кольцо будет притягиваться к магниту. 9. а) Уменьшается. б) Вверх. в) От нас. г) Противоположно скорости стержня. 10. Указание. По рисунку *a* можно найти направление движения постоянного магнита; по рисунку *б* — где какой полюс постоянного магнита; по рисунку *в* — направление тока в катушке. 11. а) Увеличиваться. б) К нам. в) Притормаживать. 12. а) В положении 1 — вправо, в положении 2 индукционного тока нет, в положении 3 — влево. б) В положении 1 — к нам, в положении 2 индукционного тока нет, в положении 3 — от нас. в) В положении 1 — вверх, в положении 2 индукционного тока нет, в положении 3 — вверх.

§ 6. 1. Рисунки *б*, *г*, *д* — первый; *а*, *в* — второй. 2. К нам. 3. По часовой стрелке (если смотреть сверху). 5. В случае *a* против часовой стрелки; в случае *б* — по часовой стрелке. 6. а) На $0,02$ Вб. б) 4 мВб/с. в) 4 мВ. г) $2 \cdot 10^{-4}$ А. д) 10^{-3} Кл. е) $4 \cdot 10^{-6}$ Дж. 9. а) $9,8 \cdot 10^{-5}$ Кл. б) $1,96 \cdot 10^{-4}$ Кл. 10. а) $1,6 \cdot 10^{-4}$ Вб/с. б) $1,6 \cdot 10^{-4}$ В. в) $1,6 \cdot 10^{-2}$ В. г) $1,6 \cdot 10^{-2}$ В. д) $6,3 \cdot 10^{-7}$ Кл. е) $3,14 \cdot 10^{-7}$ Кл. 11. а) $0,14$ Вб. б) $6,8$ мКл.

§ 7. 1. Лампы 3 и 4 загорятся сразу, а лампы 1 и 2 будут разгораться постепенно вследствие явления самоиндукции. 2. Вследствие большой ЭДС самоиндукции сила тока кратковременно увеличилась. 3. а) Вследствие односторонней проводимости диода ток будет идти только через лампу 1, которая будет разгораться постепенно, а лампа 2 не будет светить. б) После размыкания ключа ток через катушку будет идти в прежнем направлении, поэтому он сможет идти через диод и лампа 2 на короткое время загорится, после чего обе лампы постепенно погаснут. в) При размыкании ключа сила тока в катушке изменяется не столь быстро, потому что ток будет идти через лампу 2. Поэтому большой ЭДС самоиндукции не возникнет. 5. 5 мГн. 6. $1,5$ В. 7. 20 мкс. 8. а) При $t = 1$ с. Указание. Наибольшая ЭДС соответствует моменту, когда скорость изменения силы тока максимальна. б) $0,04$ В. Указание. Проведите касательную к графику в указанной выше точке и найдите её угловой коэффициент. в) При $t = 2$ с. 9. В первой; в 3 раза. 10. а) 2 А. б) $Q_1 = 36$ мДж; $Q_2 = 24$ мДж. 11. $3 \cdot 10^{-4}$ Гн. 12. а) 6 мкГн. б) $0,6$ мВ.

§ 8. 1. Вверх на рисунке. 2. Верхний на рисунке. 5. 4 м/с. 7. Указание. В таком случае сила Лоренца, действующая на свободные заряды, либо равна нулю, либо направлена поперёк проводника. 9. б) $0,01$ В. в) 2 мА. г) $6 \cdot 10^{-5}$ Дж. д) $4 \cdot 10^{-5}$ Н. е) $4 \cdot 10^{-5}$ Н. ж) $6 \cdot 10^{-5}$ Дж. з) $6 \cdot 10^{-3}$ Кл. и) $6 \cdot 10^{-5}$ Дж. 10. Указание. Эта сила направлена так же, как скорость упорядоченного движения свободных зарядов. 11. Указание. Эта сила направлена противоположно

скорости проводника. 13. $\frac{F_A vt}{cm}$. 14. По часовой стрелке. 15. Верхняя.

17. Влево. 19. $a = \frac{F_{\text{внеш}}}{m + B^2 l^2 C}$; $I = \frac{F_{\text{внеш}} BlC}{m + B^2 l^2 C}$. 20. а) $A_{\text{внеш}} = \frac{F_{\text{внеш}}^2 t^2}{2(m + B^2 l^2 C)}$.

б) $E_{\text{кин}} = \frac{F_{\text{внеш}}^2 m t^2}{2(m + B^2 l^2 C)^2}$. в) $W_{\text{э}} = \frac{F_{\text{внеш}}^2 B^2 l^2 C t^2}{2(m + B^2 l^2 C)^2}$. г) Работа внеш-

ней силы равна сумме кинетической энергии переключки и энергии электрического поля в конденсаторе. 21. а) 0,036 В. б) Нет. У к а з а н и е.

Движение переключки с постоянной скоростью возможно только при условии, что действующая на неё сила Ампера равна нулю.

в) 0,036 В. г) $7,2 \cdot 10^{-5}$ Кл. 22. а) Скорость переключки будет уменьшаться до некоторого значения вследствие действия силы Ампера.

б) У к а з а н и е. Ток прекратится тогда, когда ЭДС индукции в движущейся переключке станет равной по модулю напряжению на конденсаторе.

г) $v_k = \frac{v_0 m}{m + B^2 l^2 C}$; $q = \frac{v_0 BlCm}{m + B^2 l^2 C}$. д) $Q = \frac{m v_0^2}{2} \frac{B^2 l^2 C}{m + B^2 l^2 C}$.

У к а з а н и е. Выделившееся количество теплоты не зависит от сопротивления цепи. Это обусловлено тем, что чем меньше сопротивление цепи, тем больше средняя сила тока в цепи и тем меньше время зарядки конденсатора.

23. б) $\frac{m v_0}{2Bl}$. в) $\frac{3m v_0^2}{8}$. У к а з а н и е. Восполь-

зуйтесь законом сохранения энергии. 24. $q = \frac{CB l m g t}{m + CB^2 l^2} = 0,33$ Кл.

25. а) $I = \frac{\mathcal{E}}{R_p}$. б) \mathcal{E} . в) $W_L = \frac{LI^2}{2}$; $W_C = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$. г) $Q = \frac{\mathcal{E}^2}{2} \left(C + \frac{L}{R_p^2} \right)$.

д) $Q_p = \frac{R_p \mathcal{E}^2}{2(R_p + R_n)} \left(C + \frac{L}{R_p^2} \right)$. У к а з а н и е. После размыкания цепи в

течение времени разрядки конденсатора сила тока в резисторе и лампе одинакова.

§ 9. 1. Вследствие закона сохранения энергии. 2. Вследствие закона сохранения энергии.

3. Потому что равнодействующая приложенных к грузу сил в этом положении не равна нулю. 4. Вследствие закона сохранения энергии.

5. а) Максимальна в положениях б, з, минимальна в положениях а, в, д. б) Максимальна в положениях а, в, д, минимальна в положениях б, з. 7. а) Силы тяжести и силы натяжения нити. б) Силы тяжести и силы упругости пружины. в) Силы тяжести и силы Архимеда. 8. 24 см. 10. а) 0,2 с. б) 5 Гц. в) 24 м. г) 0. д) 600. 11. а) $T/4$; $T/2$; T ; $3T/2$. б) $T/2$. в) $T/2$.

13. а) Для графика, изображённого красной линией, $x_{\text{max}} = 10$ см; $T = 1$ с; $v = 1$ Гц; $\omega = 6,28$ с⁻¹. Для графика, изображённого зелёной линией, $x_{\text{max}} = 20$ см; $T = 0,5$ с; $v = 2$ Гц; $\omega = 12,56$ с⁻¹. б) $x = 0,1 \cdot \cos(6,28t)$;

$x = 0,2 \cdot \cos(12,56t)$. 14. а) ωt . 15. а) r ; $\frac{2\pi r}{v}$; $\frac{v}{2\pi r}$; $\frac{v}{r}$. б) v . 16. а) Красным и синим. б) Синим и зелёным. в) Красный $x = 0,005 \cdot \cos(1,57t)$; синий $x = 0,005 \cdot \cos(3,14t)$; зелёный $x = 0,01 \cdot \cos(3,14t)$.

§ 10. 1. Указание. Груз колеблется вблизи положения устойчивого равновесия. 4. Увеличить в 4 раза. 5. Уменьшить в 2 раза. 6. а) $2,5 \cdot 10^{-3}$ с. б) 0,314 с. 7. Примерно 1 м. 8. а) Увеличится в 2,45 раза. б) За 29 ч 24 мин. 10. а) 40 с^{-1} . б) 800 Н/м. в) 0,16 с. 12. а) $4,4 \text{ м/с}^2$. б) 28,8 Н и 11,2 Н. в) Больше 1,58 см. 13. При максимальном отклонении от положения равновесия; $\frac{kx_{\max}^2}{2}$. 14. При прохождении грузом положения равновесия; $\frac{kx_{\max}^2}{2}$. 15. $E_{\text{П}} = \frac{kx_{\max}^2}{2} \cos^2 \omega t$; $E_{\text{К}} = \frac{kx_{\max}^2}{2} \sin^2 \omega t$. 17. 1 с; 3 с; 5 с; 7 с. 18. Графику 2. 19. а) Уменьшится в $2\sqrt{2}$ раз. б) Уменьшится в $\sqrt{3}$ раз. в) Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. Указание. Жёсткость половины пружины в 2 раза больше, чем жёсткость целой пружины. г) Не изменится. 20. б) $\pi\sqrt{3}v_{\max}$. 21. а) 1,1 Гц. б) 7,35 см. 22. а) Не больше 4 м/с^2 . б) Больше 8,2 см.

§ 11. 8. а) Увеличится в 2 раза. б) Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. 9. 0,38 мс. 10. 0,79 нФ. 11. а) 2000 с^{-1} . б) $3,14 \cdot 10^{-3}$ с. в) 50 мкФ. г) 20 мА. 14. а) $1/3$. б) 3. 16. а) Сила тока. б) Энергия электрического поля в конденсаторе. в) Энергия магнитного поля в катушке. 19. Увеличится в $2\sqrt{2}$ раз. 20. Увеличится в $\sqrt{6}$ раз. Указание. Ёмкость конденсатора прямо пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между ними. 21. 0,5 мкДж.

§ 12. 2. $i = 0,314 \sin 100\pi t$. 3. $1/2$; $1/2$. 6. На рисунке а — повышающий, а на рисунке б — понижающий. 7. а) 2 В. б) 2 В. в) 110 и 21. 8. а) 0,5 В. б) 20 В. в) 2 А. г) 1,41 А. д) 72 кДж.

§ 13. 9. Меньше 5 см. 10. а) $\frac{mg}{k}$. Указание. При гармонических колебаниях нить не должна провисать. б) От 0 до $2mg$. 11. а) 0,91 м/с; 0. б) 0,73 м/с; g . 15. а) $3,78 \text{ с}^{-1}$. б) 15 см/с. 16. $2\pi \sqrt{\frac{lm}{mg + qE}}$. 17. Не изменится. Указание. Сила Лоренца перпендикулярна скорости заряженного тела. 18. а) 1,67 Гц. б) 2,28 Гц. 19. 5 мм. Указание. Не должна провисать нить и не должен сдвигаться брусок. 20. а) $M < m$. б) $M = m$. в) $M = 2m$.

§ 14. 2. 2,5 с; 0,4 Гц. 5. а) 2 с; 0,5 Гц. б) 0,25 м/с. 6. 0,75 м. 7. 3,4 м. 8. От 6,6 см до 11 см. 9. В миллион раз. 10. 3 км. 11. 0,66 м. Ука-

з а н и е. Это расстояние равно половине длины волны. **12.** 3,75 м. **13.** 340 м/с. **14.** 1 кГц. **15.** 108 м. **16.** 3,3 кН. **17.** $165 \cdot n$ м, где n — натуральное число. У к а з а н и е. Наблюдение удара совпадает по времени с приходом звука одного из предыдущих ударов.

§ 15. **2.** От $3,95 \cdot 10^{14}$ Гц до $7,9 \cdot 10^{14}$ Гц. **5.** В 10^{11} раз. **6.** а) $\frac{3}{2}$ п. б) Радиоволны. **7.** Все, кроме б) и е). **8.** Инфракрасное излучение. **9.** а) 10^{10} Гц. б) Обе волны относятся к СВЧ-волнам.

§ 17. **1.** В те промежутки времени, когда знаки зарядов пластин конденсатора такие же, как у полюсов источника постоянного тока, с которыми соединены эти пластины. **2.** У к а з а н и е. Катушку $L_{св}$ будет пронизывать магнитный поток, изменяющийся во времени с той же частотой. **4.** Влево; вправо. **6.** а) От $4,1 \cdot 10^6$ Гц до $1,3 \cdot 10^7$ Гц. б) От 23 м до 73 м. **11.** Увеличится на 36,2 м. **12.** а) Наименьшая частота $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$; наибольшая $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$. б) $L_1C_2 < L_2C_1$. У к а з а н и е: наибольшая частота в «нижнем» диапазоне частот должна быть меньше наименьшей частоты в «верхнем» диапазоне частот. **13.** а) 8 мГц. б) 138 м. в) От 2,17 МГц до 7,5 МГц.

§ 18. **1.** Пылинки или частички дыма будут рассеивать свет во все стороны. **3.** а) $1,5d$. б) Увеличиваться. в) Уменьшаться. **4.** а) На продолжении перпендикуляра, проведённого из центра диска к экрану. б) 48,3 см. **5.** а) 20 см. б) 80 см. в) На 8 см. **6.** 50° . **7.** 0° . **8.** 25° . **9.** Увеличится на 20° . **10.** 60° . **11.** 69° . **14.** Положение изображения не изменится, но уменьшится область видения, то есть область пространства, из которой можно видеть это изображение. Более подробно это рассмотрено в § 20. У к а з а н и е. Изображение создаётся любой частью зеркала. Для построения изображения надо зеркало мысленно продолжить. **16.** $1,53$. **17.** $40,6^\circ$. **18.** $41,6^\circ$. **19.** $48,8^\circ$. **20.** в) 1,73. **21.** б) Да. в) Нет. У к а з а н и е. При переходе луча из стекла в воду предельный угол полного отражения больше, чем при переходе луча из стекла в воздух. **22.** а) 5 см; 25 см. б) 24. **23.** Да; нет. У к а з а н и е. Увидеть в маленьком зеркале изображение удалённого большого дома можно в зеркале, расположенном достаточно близко к глазу. **24.** $0,5h$. У к а з а н и е. См. рисунок 2. **25.** в) $d = 1,02$ см. **26.** а) Полным внутренним отражением при падении лучей из воды на границу раздела «вода — воздух». б) 1,75 м.

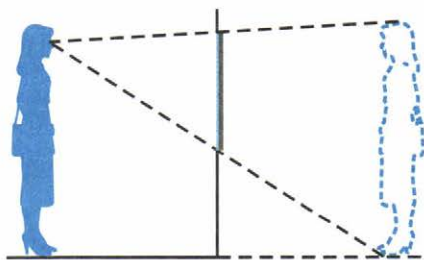


Рис. 2

§ 19. 5. 20 см. 8. Указание. После преломления в рассеивающей линзе лучи идут так, будто они испущены источником, находящимся в фокальной плоскости линзы с той же стороны, откуда падает пучок параллельных лучей. 10. Трёх средних: это луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси; луч, идущий через оптический центр линзы; луч, проходящий через фокус линзы. 20. а) Формулой (6), потому что изображение на экране может быть только действительным, а действительное изображение может дать только собирающая линза. б) 45 см. 21. 25 см. 23. Два решения: 30 см или 60 см.

§ 20. 1. а) 58,5 дптр. б) 62,5 дптр. 2. а) Дальноркостью. б) 59,5 дптр. в) 3 дптр. 3. а) От 15 мм до 15,15 мм. б) 1,25 мм. 4. 6,4 мкм. 5. а) В 10^6 раз. б) 2 м. в) $2,5 \cdot 10^{-4}$ с. Указание. Если высота орбиты спутника намного меньше радиуса Земли, скорость спутника можно приближённо считать равной первой космической скорости. 6. 10 см. 7. 0,36 мм. 8. а) Близорукостью. б) 64 дптр. в) -1,5 дптр. 9. 1 км 700 м. 10. 0,17 мм. 11. 15 мкм. 12. В 100 раз.

§ 21. 3. Мнимым, потому что в точке S_1 пересекаются не сами лучи, а их продолжения. 6. а) 1,73 м. б) $40,6^\circ$. в) 3,44 м. 8. а) Косуса. б) 17,5 см. 17. 5. 18. 81 см; лишним данным является глубина водоёма: достаточно знать, что свая погружена в воду полностью. 19. а) 6 см. б) 10,4 см. в) Нет. Указание. Учтите преломление лучей света на поверхности воды. 21. а) 32 см. б) Действительным. 22. а) 30 см. б) 2 см.

§ 22. 2. На рисунке 22.3, а разность хода волн равна нулю, а на рисунке 22.3, б она равна λ . 3. $\frac{\lambda}{2}$. 6. $9,6^\circ$. 7. $d \sin \varphi_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$. 11. $\frac{\lambda}{n}$. 12. Указание. Учтите, что свет, отражённый от нижней поверхности плёнки, проходит сквозь плёнку дважды, а также то, что длина волны света в плёнке в n раз меньше, чем в воздухе. 13. 0,106 мкм. 14. а) 7. Указание. Центральному максимуму соответствует $k = 0$. б) В 6 раз. Указание. Воспользуйтесь тем, что максимумы 6-го порядка (для которых разность хода волн равна 6λ) лежат на одной линии с источниками. в) $19,5^\circ$; 30° . Указание. Воспользуйтесь формулой (4). 15. б) $s = \frac{L\lambda}{2h} = 1$ мм. Указание. Расстояние между S и S_1 равно $2h$. Синусы и тангенсы малых углов можно приближённо считать равными значениям самих углов в радианной мере. Поэтому для соседних максимумов можно записать: $2h(\sin \varphi_{k+1} - \sin \varphi_k) \approx 2h(\varphi_{k+1} - \varphi_k) = 2h \cdot \Delta\varphi = \lambda$. С другой стороны, $\Delta\varphi = \frac{s}{L}$. 16. Указание. Учтите, что свет, отражённый в точке B_1 , проходит расстояние CB_1 дважды (сверху вниз и снизу вверх).

г) 55 мкм. д) 1,27 мм. 17. На 2,5 мкм. Указание. Используйте соотношение между длиной световой волны в воде и в воздухе. Учтите, что внутри плёнки отражённый свет проходит дважды.

§ 23. 1. Центральный максимум соответствует нулевой разности хода волн, и поэтому его положение не зависит от длины волны.

3. $0,0218^\circ$; $0,0435^\circ$. 5. 0,65 мкм. 8. $d \sin \varphi_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$. 9. а) $36,9^\circ$.

б) 7,5 см. 10. 3. 11. Указание. Для того, чтобы наблюдались хотя бы интерференционные максимумы первого порядка для всех длин волн видимого света, период решётки должен быть больше длины волны, соответствующей красному цвету. 12. а) Центральный (нулевой) интерференционный максимум, общий для всех волн. б) Нулевого и первого. в) Длина волны увеличивается при переходе от фиолетового цвета к красному. 13. 1,1 см. 14. На каждой щели решётки происходит дифракция световых волн, которые после прохождения решётки интерферируют друг с другом. 15. а) 1,9 см. б) 1,9 см. 16. а) 0,37 мкм. б) $21,7^\circ$. в) 30° .

§ 24. 1. Общее заключается в том, что в обоих явлениях белый свет раскладывается в цветной спектр. Различие состоит в том, что при преломлении сильнее всего отклоняются лучи, соответствующие фиолетовому цвету, а в результате дифракции сильнее всего отклоняются волны, соответствующие красному цвету. 2. Примерно в 1300 раз. 3. Примерно в 4 раза. 4. В $4 \cdot 10^6$ раз. 5. В $1,3 \cdot 10^3$ раз. 6. Частотой. Указание. Дошедшие до сетчатки световые волны приводят в колебания электроны с частотой, равной частоте падающей волны. 7. Чёрным. Указание. Трава отражает преимущественно лучи, соответствующие зелёному цвету, а красный светофильтр пропускает в основном лучи, соответствующие красному цвету. 8. «Можно» — красным, «Нельзя» — зелёным. 9. Они отражают свет, упавший на них с голубого неба. 10. В обоих случаях мозг получает сигналы примерно одинаковой интенсивности от светочувствительных «красных» и «зелёных» колбочек, расположенных в сетчатке глаза.

§ 25. 1. На рисунке б. 3. Под углом 90° . 4. Указание. Отражённый стеклом свет является поляризованным. 8. В воздухе; в 1,33 раза. 9. а) 1,5. б) $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц. в) 0,625 мкм. г) 0,417 мкм. 10. а) $2,16 \cdot 10^8$ м/с. б) 1,39. 11. а) $2,254 \cdot 10^8$ м/с. б) $2,234 \cdot 10^8$ м/с. в) В 250 раз. 12. а) Увеличилась. б) 0,48 мкм. в) 0,36 мкм. г) $6,25 \cdot 10^{14}$ Гц. д) $6,25 \cdot 10^{14}$ Гц.

§ 26. 1. а) Только электрическое. б) Электрическое и магнитное. Указание. Заряженное тело движется относительно велосипеда. 2. В первом опыте движется катушка относительно магнита, неподвижного в лабораторной системе отсчёта. В этом случае причиной возникновения индукционного тока является сила Лоренца, дей-

ствующая на свободные заряды в катушке: она играет роль сторонней силы. Во втором же случае движется магнит относительно катушки, неподвижной в лабораторной системе отсчёта. В таком случае причиной возникновения индукционного тока является вихревое электрическое поле, порождаемое изменяющимся во времени магнитным полем. 3. а) с. б) с. в) Больше промежутков времени, в течение которого свет двигался от В к А. У к а з а н и е. По условию корабли удаляются друг от друга.

§ 27. 2. а) В $9,1 \cdot 10^5$ раз. б) В $3,75 \cdot 10^4$ раз. 3. $9 \cdot 10^{13}$ Дж. 4. 3000 т; 60 вагонов. 5. $1,1 \cdot 10^{-11}$ кг. 6. $3,7 \cdot 10^{-11}$ кг. 7. 1 ч 40 мин. 8. На 44 м/с.

§ 28. 1. Надо использовать заряженное тело, знак заряда которого известен. 2. От электрода 2 к электроду 1. У к а з а н и е. Электрон имеет отрицательный заряд. 4. а) $8 \cdot 10^{-19}$ Дж. б) $1,3 \cdot 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. 5. $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. 6. 2,5 эВ. 9. $1,3 \cdot 10^{15}$ Гц. 11. а) 3 кДж. б) $10^{-5} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$. У к а з а н и е. Воспользуйтесь формулой, связывающей энергию и импульс фотона. в) 10^{-5} Н. г) 10^{-6} Па. 12. 0,34 мкм. 13. а) 580 км/с. б) В 72,5 раза. в) В 517 раз. 14. 260 нм. 15. 0,51 В. 17. 350 мкН.

§ 29. 3. Увеличилась на $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

§ 30. 2. $\frac{\lambda_{21}\lambda_{32}}{\lambda_{21} + \lambda_{32}}$. У к а з а н и е. Воспользуйтесь соотношением между частотой и длиной волны света.

§ 31. 1. $1,27 \cdot 10^{17}$. 2. $1,27 \cdot 10^{-4}$ Па.

§ 32. 1. $^{12}_6\text{C}$. 2. ^4_2He . 3. Могут. У к а з а н и е. Заряд ядра определяется не массовым числом, а зарядовым. 4. В таких ядрах протонов и нейтронов поровну. 5. Нет.

§ 33. 1. Почти на 13 м (пятый этаж). 2. 20 км (более чем в 2 раза выше самой высокой горы на Земле). 5. $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$. 8. $^{214}_{83}\text{Pb} \rightarrow ^{214}_{83}\text{Bi} + ^0_{-1}e$. 12. а) Примерно одна тысячная. б) $6 \cdot 10^{-8}$. 13. Свинец-208. 14. Свинец-210. 15. $^{224}_{88}\text{Ra}$. 16. $^{209}_{83}\text{Bi}$. 17. 5 α -распадов и 3 β -распада. 19. 0,031. 20. а) 7,2 ч. б) 12 ч. в) 693 суток. 21. 80 суток.

§ 34. 1. $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$. 2. $1,43 \cdot 10^{12}$ Дж; 48 т. 3. $8,17 \cdot 10^{10}$ Дж; 2,7 т.

§ 37. 2. а) 8 мин. б) 43 мин. в) 4 ч 10 мин. 3. $9,4 \cdot 10^{12}$ км. 4. Примерно в 270 тысяч раз.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоколебания 135
Адроны 290
Ампер А. 6
Ампер — единица тока 7
Амплитуда волн 116
— колебаний 77
Амплитудная модуляция 137
Аннигиляция 290
Античастица 289
Астероиды 318
Астрономическая единица 301
Атомная электростанция 284
Атомное ядро 240
Атомный взрыв 282
- Барионы 291
Басов Н. Г. 251
Беккерель А. 267
Белые карлики 327
Близорукость 165
Большой взрыв 345
Бор Н. 242, 258
Браге Т. 299
- Венера 312
Вихревое поле 53
Волновой фронт 208
Волоконная оптика 150
Вынужденное излучение
света 250
Вынужденные колебания 88
Высота звука 120
- Галактика Андромеды 339
Галилей Г. 337
Гармонические колебания 78
Гейзенберг В. 257, 264
Гельмгольц Г. 306
Генератор на транзисторе 135
Геометрическая оптика 143
Герц Г. 124
Гипотеза Ампера 8
— де Бройля 255
— Планка 228
Главная последовательность 326
Голубые гиганты 326
- Гравитационное взаимо-
действие 293
Гюйгенс Х. 180
- Дальнозоркость 165
Де Бройль Л. 255
Детектирование 131
Дефект масс 277
Дисперсия света 199
Дифракционная решётка 195
Дифракция волн 190
Длина волны 116
- Закон Ампера 17
— отражения света 146
— преломления света 148
— прямолинейного распростра-
нения света 144
— радиоактивного распада 271
— Хаббла 343
— электромагнитной
индукции 54
Зарядовое число 264
Затухающие колебания 88
Земля 313
- Изотопы 262
Индуктивность 60
Индукционный генератор 99
Интерференция волн 179
Инфразвук 119
Инфракрасное излучение 202
Ионизирующее излучение 287
- Кант И. 320
Квантовая механика 256
Квантовые генераторы 251
Кварки 291
Кеплер И. 299, 329
Колебательный контур 92
Кольца Ньютона 184
Кометы 319
Коперник Н. 299
Корпускулярно-волновой дуа-
лизм 255
Красное смещение 343

- Красные гиганты 326
— карлики 326
Критическая масса 284
Курчатов И. В. 283
Кюри П. 267
- Лазеры 251
Ландау Л. Д. 333
Лебедев П. Н. 127
Ленц Э. Х. 47
Лептоны 290
Линейчатые спектры 245
Линзы 153
Линии магнитной индукции 10
Лоренц Х. 24
Луна 298
- Магнитная индукция 9
Магнитное поле 9
Магнитный поток 43
Максвелл Дж. 123
Марс 315
Массовое число 264
Математический маятник 85
Мезоны 291
Менделеев Д. И. 249
Механические волны 115
— колебания 75
Млечный Путь 337
Модель горячей Вселенной 346
Модуляция 131
- Нейтрон 263
Нейтронные звёзды 333
Непрерывные спектры 245
Ньютон И. 329
- Оптическая сила линзы 157
Относительность одновременно-
сти 219
- Переменный электрический
ток 99
Период волны 116
— колебаний 77
— электромагнитных колеба-
ний 93
Периодическая система химиче-
ских элементов 249
- Планетарная модель атома 241
Планеты земной группы 311
Планеты-гиганты 316
Планк М. 229
Поглощённая доза
излучения 287
Позитрон 289
Полное внутреннее отражение
149
Поляризация света 206
Поперечные волны 115
Попов А. С. 130
Постоянная Планка 229
— Хаббла 344
Построение изображений в лин-
зах 157
Постулаты Бора 242
— специальной теории относи-
тельности 217
Правило буравчика 11
— левой руки 18
— Ленца 45
— смещения 270
Предельный угол полного отра-
жения 149
Принцип Гюйгенса —
Френеля 209
— относительности Галилея 214
— относительности Эйнштейна
217
— Паули 249
— суперпозиции 13
Продольные волны 115
Просветление оптики 185
Протон 262
Протонно-нейтронная модель
ядра 264
Прохоров А. М. 251
- Радий 267
Радиоактивность 267
Радиоактивные
превращения 269
Рассеивающая линза 156
Расширение Вселенной 344
Реакции деления 280
— синтеза 279

- Резерфорд Э. 239, 262, 269
 Резонанс 89
 Реликтовое излучение 346
- Самоиндукция 58
 Сатурн 318
 Сахаров А. Д. 34, 286
 Светимость звезды 324
 Световой год 302
 Свободные колебания 76
 Сила Ампера 16
 — Лоренца 24, 67
 Сильное взаимодействие 292
 Склодовская-Кюри М. 267
 Слабое взаимодействие 293
 Собирающая линза 154
 Солнце 305
 Соотношение
 неопределённости 257
 Спектр 199
 Спектральный анализ 247
 Спектры излучения 245
 — поглощения 246
 Спонтанное излучение света 250
 Струве В. Я. 323
- Тамм И. Е. 34, 286
 Термоядерные реакции 280
 Термоядерный синтез 306
 Тесла Н. 17
 Томсон У. 95
 Трансформатор 105
- Удельная энергия связи 278
 Ультразвук 119
 Ультрафиолетовое
 излучение 203
 Управляемая цепная ядерная ре-
 акция 282
 Управляемый термоядерный
 синтез 286
 Уравнение гармонических коле-
 баний 79
 — Эйнштейна для фотоэффекта
 233
- Фаза колебаний 108
 Фарадей М. 41
 Ферми Э. 282
 Ферромагнетики 8
 Фокальная плоскость 155
 Фокус линзы 155
 Формула Томсона 95
 — тонкой линзы 161
 Фотон 232
 Фотоэффект 230
 Френель О. 191
 Фридман А. А. 345
 Фриш О. 281
- Хаббл Э. 343
- Цепная реакция деления 282
- Частота волны 116
 — колебаний 77
 Чёрные дыры 335, 338
- Шмидт О. Ю. 320
 Шрёдингер Э. 255
- Эйнштейн А. 217, 232, 250, 335
 Электродвигатель 21
 Электромагнитная индукция 41
 Электромагнитное взаимодей-
 ствие 293
 Электромагнитные волны 123
 — колебания 92
 Электрон-вольт 232
 Энергетические уровни 248
 Энергия магнитного поля
 тока 62
 — покоя 225
 — связи 276
 Эрстед Х. 6
- Юнг Т. 191
 Юпитер 317
- Ядерная энергетика 282
 Ядерные реакции 275
 — силы 265
 Ядерный реактор 282

ОГЛАВЛЕНИЕ

Изучаем физику ВМЕСТЕ	3
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	
Глава 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	
§ 1. Магнитные взаимодействия. Магнитное поле	6
1. Взаимодействие постоянных магнитов.....	6
2. Взаимодействие проводников с током.....	6
3. Магнитные свойства вещества	8
4. Магнитное поле	9
§ 2. Закон Ампера	16
1. Модуль вектора магнитной индукции.....	16
2. Закон Ампера.....	17
3. Правило левой руки	18
4. Рамка с током в магнитном поле.....	20
5. Применение силы Ампера.....	21
§ 3. Сила Лоренца	24
1. Модуль силы Лоренца	24
2. Направление силы Лоренца.....	26
3. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле	27
ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ...	
§ 4. Проводники и заряженные частицы в магнитном поле.....	30
1. Проводник с током в магнитном поле	30
2. Движение заряженной частицы в магнитном и электрическом полях	33
Глава 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	
§ 5. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца.....	41
1. Опыты Фарадея	41
2. Магнитный поток	43
3. Правило Ленца	45
§ 6. Закон электромагнитной индукции	51
1. Причины возникновения индукционного тока.....	51
2. Закон электромагнитной индукции.....	54
§ 7. Самоиндукция. Энергия магнитного поля	58
1. Явление самоиндукции.....	58
2. Индуктивность	60
3. Энергия магнитного поля тока.....	62
ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ...	
§ 8. Применение закона электромагнитной индукции.....	64
1. ЭДС индукции в проводнике, движущемся с постоянной скоростью	64
2. Совершает ли работу сила Лоренца?.....	67
3. Ускоренное движение проводника в магнитном поле....	70

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Глава 3. КОЛЕБАНИЯ

§ 9. Свободные механические колебания.....	75
1. Качественное рассмотрение свободных колебаний.....	75
2. Основные характеристики колебаний.....	77
3. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени.....	78
§ 10. Динамика механических колебаний.....	83
1. Периоды колебаний пружинного и математического маятников.....	83
2. Соотношение между смещением, скоростью и ускорением тела при гармонических колебаниях.....	86
3. Превращения энергии при гармонических колебаниях..	87
4. Вынужденные колебания.....	88
§ 11. Колебательный контур.....	92
1. Свободные электромагнитные колебания.....	92
2. Период электромагнитных колебаний.....	93
3. Превращения энергии при электромагнитных колебаниях.....	96
4. Аналогия между механическими и электромагнитными колебаниями.....	97
§ 12. Переменный электрический ток.....	99
1. Индукционный генератор электрического тока.....	99
2. Производство, передача и потребление электроэнергии ...	103
ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ...	108
§ 13. Более сложные вопросы колебаний.....	108
1. Фаза колебаний.....	108
2. Колебания груза, подвешенного на пружине.....	109
3. Математический маятник.....	111

Глава 4. ВОЛНЫ

§ 14. Механические волны. Звук.....	115
1. Механические волны.....	115
2. Звук.....	118
§ 15. Электромагнитные волны.....	123
1. Предсказание и открытие электромагнитных волн.....	123
2. Свойства электромагнитных волн.....	124
3. Шкала электромагнитных волн.....	127
§ 16. Передача информации с помощью электромагнитных волн.....	130
1. Изобретение радио.....	130
2. Принципы радиосвязи.....	130
3. Передача радиоволн.....	132
4. Приём радиоволн.....	132
5. Современные средства связи.....	134
ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ...	135
§ 17. Передача и приём радиоволн.....	135
1. Генератор на транзисторе.....	135

2. Амплитудная модуляция	137
3. Настройка на нужную частоту	138
4. Детектирование	139
ОПТИКА	
Глава 5. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	
§ 18. Законы геометрической оптики	143
1. Что изучает геометрическая оптика	143
2. Прямолинейное распространение света. Тень и полутень	144
3. Отражение света	146
4. Преломление света	148
§ 19. Линзы	153
1. Виды линз. Основные элементы линзы	153
2. Фокусы линзы. Фокальная плоскость	154
3. Построение изображений в линзах	157
4. Увеличение линзы	159
5. Формула тонкой линзы	161
§ 20. Глаз и оптические приборы	164
1. Глаз	164
2. Оптические приборы	166
ГОТОВИМСЯ К ЕГЭ: КЛЮЧЕВЫЕ СИТУАЦИИ В ЗАДАЧАХ ...	
§ 21. Более сложные вопросы геометрической оптики	170
1. Изображение в одном и двух зеркалах	170
2. Преломление и полное внутреннее отражение на границе «вода — воздух»	171
3. Построение изображения в линзе	174
Глава 6. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	
§ 22. Интерференция волн	179
1. Свет — частицы или волны?	179
2. Интерференция волн на поверхности воды	180
3. Интерференция света	184
§ 23. Дифракция волн	190
1. Дифракция механических волн	190
2. Дифракция света	191
3. Опыт Юнга	191
4. Дифракционная решётка	195
§ 24. Цвет	199
1. Дисперсия света	199
2. Окраска предметов	201
3. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение	202
§ 25. Поляризация света. Соотношение между волновой и геометрической оптикой	206
1. Поляризация света	206
2. Соотношение между волновой и геометрической оптикой	208

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Глава 7. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 26. Основные положения	
специальной теории относительности	214
1. Принцип относительности Галилея	214
2. Справедлив ли принцип относительности для электромагнитных явлений?	214
3. Основные положения специальной теории относительности	216
§ 27. Некоторые следствия	
специальной теории относительности	219
1. Относительность одновременности	219
2. Относительность промежутков времени	222
3. Энергия тела	224
4. Отменяет ли теория относительности классическую механику?	226

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 8. КВАНТЫ И АТОМЫ

§ 28. Фотоэффект. Фотоны	228
1. Гипотеза Планка	228
2. Явление фотоэффекта	229
3. Теория фотоэффекта	232
4. Фотоны	234
5. Применение фотоэффекта	235
§ 29. Строение атома	238
1. Опыт Резерфорда	238
2. Планетарная модель атома	240
3. Теория атома Бора	242
§ 30. Атомные спектры	245
1. Спектры излучения и поглощения	245
2. Энергетические уровни	247
§ 31. Лазеры. Квантовая механика	250
1. Спонтанное и вынужденное излучение	250
2. Принцип действия лазера	251
3. Применение лазеров	254
4. Корпускулярно-волновой дуализм	255
5. Соответствие между классической и квантовой механикой	257

Глава 9. АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

§ 32. Атомное ядро	262
1. Строение атомного ядра	262
2. Ядерные силы	265
§ 33. Радиоактивность	267
1. Открытие радиоактивности	267
2. Радиоактивные превращения	269

§ 34. Ядерные реакции и энергия связи ядер	275
1. Ядерные реакции	275
2. Энергия связи атомных ядер	276
3. Реакции синтеза и деления ядер	278
§ 35. Ядерная энергетика	282
1. Ядерный реактор	282
2. Перспективы и проблемы ядерной энергетики	285
3. Влияние радиации на живые организмы	287
§ 36. Мир элементарных частиц	289
1. Открытие новых частиц	289
2. Классификация элементарных частиц	290
3. Фундаментальные частицы и фундаментальные взаимодействия	292

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

Глава 10. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

§ 37. Размеры Солнечной системы	297
1. Земля и Луна	297
2. Орбиты планет	299
3. Размеры Солнца и планет	303
§ 38. Солнце	305
1. Источник энергии Солнца	305
2. Строение Солнца	308
§ 39. Природа тел Солнечной системы	311
1. Планеты земной группы	311
2. Планеты-гиганты	316
3. Малые тела Солнечной системы	318
4. Происхождение Солнечной системы	320

Глава 11. ЗВЁЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, ВСЕЛЕННАЯ

§ 40. Разнообразие звёзд	323
1. Расстояния до звёзд	323
2. Светимость и температура звёзд	325
§ 41. Судьбы звёзд	329
1. «Звезда-гостя» и «звезда Тихо Браге»	329
2. От газового облака до белого карлика	330
3. Эволюция звёзд разной массы	332
§ 42. Галактики	337
1. Наша Галактика — Млечный Путь	337
2. Другие галактики	339
§ 43. Происхождение и эволюция Вселенной	343
1. Разбегание галактик	343
2. Большой взрыв	345
3. Будущее Вселенной	347

Послесловие	349
Лабораторные работы	350
Проектно-исследовательская деятельность	361
Ответы и указания	368
Предметно-именной указатель	377

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Проектная и исследовательская деятельность



Поставим опыт



Углубляем и расширяем знания



Используем ресурсы Интернета



Систематизируем и обобщаем знания



Проверь себя



Готовимся к экзамену



Решим задачу

