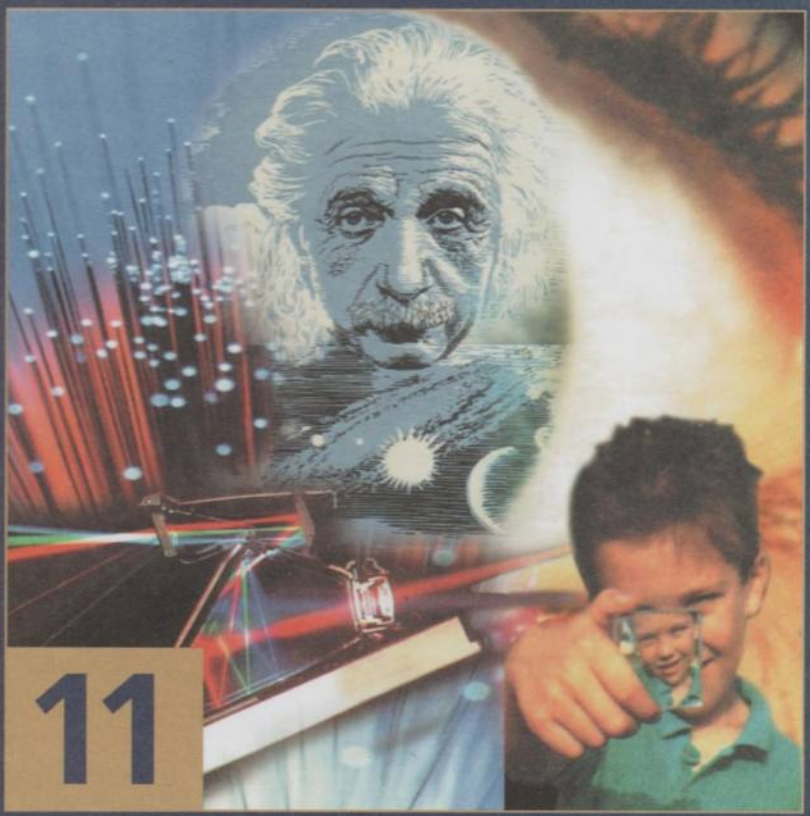
Г. Я. Мякишев
Б. Б. Буховцев
В. М. Чаругин

Классический курс

физика



11

БАЗОВЫЙ И
УГЛУБЛЁННЫЙ
УРОВНИ

Классический курс

Г. Я. Мякишев Б. Б. Буховцев В. М. Чаругин

физика

11 класс

**Учебник
для общеобразовательных
организаций**

Базовый и углублённый уровни

Под редакцией **Н. А. Парфентьевой**

Рекомендовано
Министерством просвещения
Российской Федерации

7-е издание, переработанное

Москва
«Просвещение»
2019

УДК 373:53+53(075.3)
ББК 22.3я721
М99

Серия «Классический курс» основана в 2007 году

Разделы «Основы электродинамики», «Колебания и волны», «Оптика» и «Квантовая физика» написаны **Б. Б. Буховцевым и Г. Я. Мякишевым**.
Раздел «Астрономия» написан **В. М. Чаругиным**.

На учебник получены положительные экспертные заключения **научной** (заключение РАО № 953 от 18.11.2016 г.), **педагогической** (заключение РАО № 724 от 21.11.2016 г.) и **общественной** (заключение РКС № 439-ОЭ от 19.12.2016 г.) экспертиз.

Мякишев Г. Я.
М99 Физика. 11 класс : учеб. для общеобразоват. организаций : базовый и углубл. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин ; под ред. Н. А. Парфентьевой. — 7-е изд., перераб. — М. : Просвещение, 2019. — 432 с. : [4] л. ил. — (Классический курс). — ISBN 978-5-09-071607-9.

Материал учебника, завершающего предметную линию «Классический курс», даёт представление о современной физике: теории относительности, квантовой теории, физике атомного ядра и элементарных частиц, строении Вселенной.

Учебный материал содержит информацию, расширяющую кругозор учащегося; темы докладов на семинарах, интернет-конференциях; ключевые слова, несущие главную смысловую нагрузку по изложенной теме; образцы заданий ЕГЭ.

Учебник соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования и реализует базовый и углублённый уровни образования учащихся 11 классов.

УДК 373:53+53(075.3)
ББК 22.3я721

ISBN 978-5-09-071607-9

© Издательство «Просвещение», 2014, 2019
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2014, 2019
Все права защищены

КАК РАБОТАТЬ С УЧЕБНИКОМ

В этом учебнике, так же как и в учебнике для 10 класса, введены следующие условные обозначения:

 — параграфы, обязательные для изучения всеми учащимися на базовом уровне;

 — параграфы для тех, кто изучает физику более подробно и на углублённом уровне;



— дополнительные сведения;



— фрагменты текста, на которые надо обратить более пристальное внимание;



— определения и формулировки, которые необходимо запомнить;

 — обсудить в классе или с товарищем некоторые утверждения, привести собственные примеры или ответить на вопросы;

 — провести простые опыты, обратить внимание на явления, наблюдаемые в повседневной жизни;

 — темы докладов на дополнительных занятиях, которые могут быть проведены в виде круглых столов, интернет-конференций и т. п.;

 — примерные темы проектной и исследовательской деятельности;

 — образцы заданий ЕГЭ;

 — вопросы к параграфу;



— ключевые слова для поиска информации по теме параграфа.

В конце каждой главы предложен примерный план для составления конспекта изученного материала. Эти конспекты помогут вам подготовиться к экзаменам.

При работе с учебником можно использовать электронное приложение, которое размещено в электронном каталоге издательства «Просвещение» на интернет-ресурсе www.prosv.ru. Оно содержит подробные биографии учёных, примеры решения задач, рисунки, фотографии, тесты, анимации, опыты и т. д. Работа с электронным приложением также поможет вам глубже понять изучаемый материал. Искать нужную тему или определение следует по каталогу. В данном учебнике используются следующие обозначения, взятые из него:


— биографии учёных;


— анимации;


— видеофильмы, в которых показаны опыты;


— тесты;


— периодическая таблица элементов Менделеева;


— примеры решения задач;



— образцы заданий ЕГЭ.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (Продолжение)

Продолжим изучение электродинамики. Ознакомимся с магнитными полями, не изменяющимися с течением времени (стационарными полями) и магнитными и электрическими полями, изменяющимися со временем. Со стационарными электрическими полями вы ознакомились в 10 классе.

ГЛАВА 1 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Движущиеся заряды создают, кроме того, магнитное поле.

§ 1 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Как взаимодействуют неподвижные электрические заряды? Каков механизм этого взаимодействия?
Какие свойства электрического поля вы изучали?

Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия каждый из зарядов создаёт электрическое поле, которое действует на другой заряд. Однако между электрическими зарядами могут существовать силы и иной природы. Их можно обнаружить с помощью следующего опыта.

Возьмём два гибких проводника, укрепим их вертикально, а затем присоединим нижними концами к полюсам источника тока (рис. 1.1). Притяжения или отталкивания проводников при этом не обнаружится, так как заряд проводников, полученный от источника, очень мал.

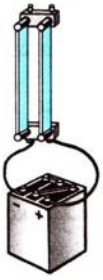


Рис. 1.1

Если теперь другие концы проводников замкнуть проволокой так, чтобы в проводниках возникли токи *противоположного направления*, то проводники начнут отталкиваться друг от друга (рис. 1.2). В случае же токов *одного направления* проводники притягиваются (рис. 1.3).

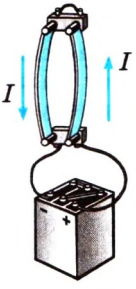


Рис. 1.2



Рис. 1.3

Ток — это направленное движение электрических зарядов, следовательно, взаимодействие проводников зависит от направления их движения.

Запомни **Магнитными взаимодействиями** называют взаимодействия между проводниками с током, т. е. между направленно движущимися электрическими зарядами.

Запомни **Магнитными силами** называют силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга.

Какие поля вы уже знаете и какими свойствами они обладают?

Магнитное поле. Согласно теории близкодействия подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое *магнитным*.

Электрический ток в проводнике создаёт вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток в другом проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.

Важно Магнитное поле представляет собой особую форму материи. Оно существует реально, независимо от нас, от наших знаний о нём; его нельзя обнаружить нашими органами чувств, а можно лишь с помощью проводников с током или магнитных стрелок.

Опыт показывает, что магнитное поле создаётся не только токами в проводниках. Любое направленное движение электрических зарядов вызывает появление магнитного поля. Так, например, токи в газах, полупроводниках вызывают возникновение в окружающем их пространстве магнитного поля. Направленное смещение связанных электрических зарядов в диэлектрике, помещённом в переменное электрическое поле, также вызывает появление магнитного поля.

Интересно Магнитная стрелка — маленький продолговатый магнит с двумя полюсами на концах — южным S и северным N.

Замкнутый контур с током в магнитном поле. Для изучения магнитного поля можно взять замкнутый контур малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется) размеров. Например, можно взять маленькую плоскую проволочную рамку произвольной формы (рис. 1.4). Подводящие ток проводники нужно расположить близко друг к другу (рис. 1.4, *а*) или сплести их вместе (рис. 1.4, *б*). Тогда результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на эти проводники, будет мала по сравнению с силами, действующими на проводники, образующие контур.

Выяснить характер действия магнитного поля на контур с током можно с помощью следующего опыта. Подвесим на тонких гибких проводниках, сплетённых вместе, маленькую плоскую рамку, состоящую из нескольких витков проволоки. На расстоянии, значительно большем размеров рамки, вертикально расположим провод (рис. 1.5, *а*). Рамка при пропускании электрического тока через неё и через провод поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (рис. 1.5, *б*). При изменении направления тока в проводе рамка поворачивается на 180°.

Магнитное поле создаётся не только электрическим током, но и постоянными магнитами. Если мы подвесим на гибких проводах плоскую рамку с током между полюсами магнита, то рамка

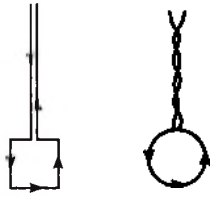


Рис. 1.4

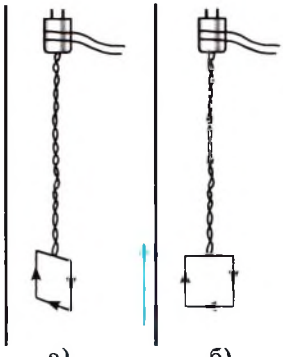


Рис. 1.5

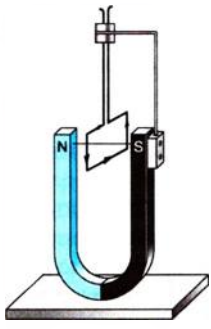


Рис. 1.6

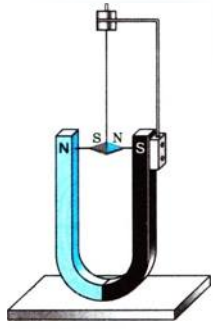


Рис. 1.7

будет поворачиваться до тех пор, пока её плоскость не установится перпендикулярно линии, соединяющей полюсы магнита (рис. 1.6).

Если между полюсами магнита поместить магнитную стрелку, то она также будет поворачиваться и установится определённым образом вдоль линии, соединяющей полюсы магнита (рис. 1.7).



Важно Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током и на магнитную стрелку *ориентирующее действие*.

Интересно Однородное магнитное поле оказывает на рамку, как показывает опыт, лишь ориентирующее действие. В неоднородном магнитном поле рамка, кроме того, будет двигаться поступательно, притягиваясь к проводнику с током или отталкиваясь от него.

Перечислим основные свойства магнитного поля, которые установлены экспериментально.

1. Магнитное поле порождается электрическим током (направленно движущимися зарядами) и постоянными магнитами.

2. Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (на движущиеся заряды) или на магнитную стрелку.

Понаблюдайте за изменением положения стрелки компаса при приближении к южному и северному полюсам постоянного магнита и удалении его от них.

Вектор магнитной индукции.

Запомни Векторную характеристику магнитного поля называют **вектором магнитной индукции** и обозначают буквой $\vec{B}$.

Запомни За **направление вектора магнитной индукции** принимается направление, которое показывает северный полюс *N* магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (рис. 1.8, *а*).

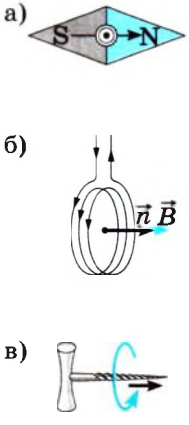


Рис. 1.8

Это направление совпадает с направлением положительной нормали к замкнутому контуру с током (рис. 1.8, *б*). *Положительная нормаль* направлена в ту сторону, куда перемещается буравчик (с правой нарезкой), если вращать его по направлению тока в рамке (рис. 1.8, *в*). Вектор магнитной индукции в центре рамки совпадает по направлению с положительной нормалью.

Используя рамку с током или магнитную стрелку, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке поля.

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка в каждой точке устанавливается по касательной к окружности (рис. 1.9). В центре кругового тока магнитная стрелка перпендикулярна плоскости, которой принадлежит этот круговой ток.

Направление вектора магнитной индукции можно определить также с помощью *правила буравчика*.

Важно Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика указывает направление вектора магнитной индукции.

Если магнитное поле создано несколькими источниками, то действует *принцип суперпозиции полей*: индукция $\vec{B}$ магнитного поля в данной точке при наличии нескольких источников поля с индукциями $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$, ... представляет собой векторную сумму магнитных полей, созданных каждым источником в отдельности: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots$ При этом индукция магнитного поля каждого источника определяется так, как будто других источников поля не существует.

Линии магнитной индукции. Наглядную картину магнитного поля можно получить, если построить так называемые *линии магнитной индукции*. С помощью линий магнитной индукции можно изображать магнитное поле аналогично тому, как мы изображаем силовыми линиями электростатическое поле.

Интересно Опыт по определению направления вектора индукции магнитного поля Земли проводит каждый, кто ориентируется на местности по компасу.

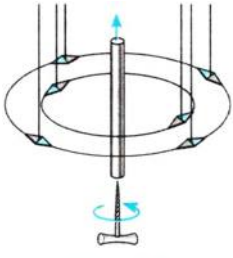


Рис. 1.9

Важно Однако линии магнитной индукции, в отличие от линий напряжённости электростатического поля, не являются силовыми линиями.

Запомни **Линии магнитной индукции** — векторные линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с вектором $\vec{B}$ в данной точке поля (рис. 1.10).

Для магнитного поля *прямолинейного проводника с током* из приведённых ранее опытов следует, что

линии магнитной индукции — концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током (см. рис. 1.9).

Центр концентрических окружностей находится на оси проводника. Стрелки на линиях магнитной индукции указывают, в какую сторону направлен вектор магнитной индукции, касательный к данной линии.

Подумайте, как можно определить полюсы батарейки, подключённой к проводнику, имея магнитную стрелку.

На рисунке 1.11 показана картина линий магнитной индукции поля *катушки с током* (*соленоида*). Если длина соленоида много больше его диаметра, то магнитное поле внутри соленоида можно считать однородным. Линии магнитной индукции такого поля параллельны и находятся на равных расстояниях друг от друга.



Рис. 1.10

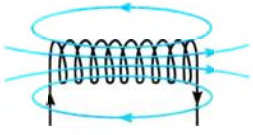


Рис. 1.11

Подумайте, чем отличаются линии магнитной индукции от силовых линий электростатического поля.

На рисунке 1.12 показаны линии магнитного поля Земли. Линии магнитной индукции поля Земли подобны линиям магнитной индукции поля соленоида. Магнитный северный полюс N близок к Южному географическому полюсу, а магнитный южный полюс S — к Северному географическому полюсу. Ось такого большого магнита составляет с осью вращения Земли угол 11,5°. Периодически магнитные полюсы меняют свою полярность. Последняя такая смена произошла около 30 000 лет назад.



Рис. 1.12

Картину линий магнитной индукции можно сделать видимой, воспользовавшись мелкими железными опилками.

В магнитном поле каждый кусочек железа, насыпанный на лист картона, намагничивается и ведёт себя как маленькая магнитная стрелка. Большое количество опилок позволяет выяснить расположение линий магнитной индукции. Примеры картин магнитного поля приведены на рисунках 1.13—1.16.

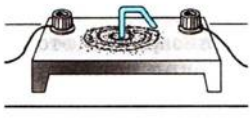


Рис. 1.13

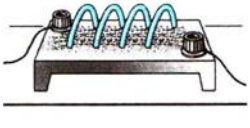


Рис. 1.14



Рис. 1.15

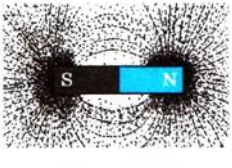


Рис. 1.16

Вихревое поле. Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они всегда замкнуты.

Запомни **Вихревыми** называют поля с замкнутыми векторными линиями.

Важно Магнитное поле — вихревое поле.

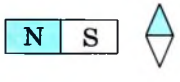
Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно заключается в том, что магнитное поле не имеет разноимённых источников.

Важно Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.

Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Вихревое поле — Найти

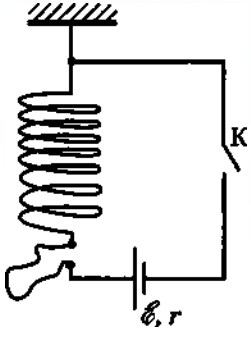
1. Какие взаимодействия называют магнитными?
2. Перечислите основные свойства магнитного поля.
3. Как ориентируются в однородном магнитном поле замкнутый контур с током и магнитная стрелка?
4. Что называют линиями магнитной индукции?
5. Какие поля называют вихревыми?

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



1) повернётся на 180°
2) повернётся на 90° по часовой стрелке
3) повернётся на 90° против часовой стрелки
4) останется в прежнем положении

2. Мягкая пружина из нескольких крупных витков провода подвешена к потолку. Верхний конец пружины подключён к источнику тока через ключ K, а нижний — с помощью длинного мягкого провода (см. рис.). Как изменится длина пружины через достаточно большое время после размыкания ключа K? Ответ поясните, указав, какие физические явления и закономерности вы использовали для объяснения.



3. Направление вектора индукции магнитного поля в данной точке пространства совпадает с направлением
1) силы, действующей на неподвижный заряд в этой точке
2) силы, действующей на движущийся заряд в этой точке
3) северного полюса магнитной стрелки, помещённой в эту точку
4) южного полюса магнитной стрелки, помещённой в эту точку

§ 2 СИЛА АМПЕРА

Вспомните свойства магнитного поля.
Какова основная характеристика магнитного поля? На основе каких действий поля она вводится?



А. Ампер (1775—1836)

Магнитное поле действует на все участки проводника с током. Зная силу, действующую на каждый малый участок проводника, можно вычислить силу, действующую на весь замкнутый проводник в целом.

Закон, определяющий силу, действующую на отдельный небольшой участок проводника (элемент тока), был установлен в 1820 г. А. Ампером. Так как создать обособленный элемент тока нельзя, то Ампер проводил опыты с замкнутыми проводниками. Меняя форму проводников и их расположение, он сумел установить выражение для силы, действующей на отдельный элемент тока.

Действие магнитного поля на проводник с током будем изучать на установке, изображённой на рисунке 1.17. Свободно подвешенный горизонтально проводник находится в поле постоянного подковообразного магнита. Поле магнита сосредоточено в основном между его полюсами, поэтому магнитная сила действует практически только на часть проводника длиной Δl, расположенную непосредственно между полюсами. Сила $\vec{F}$ измеряется с помощью специальных весов, которые соединяют с проводником двумя стерженьками. Она направлена горизонтально, перпендикулярно проводнику и линиям магнитной индукции.

Увеличивая силу тока в 2 раза, можно заметить, что и действующая на проводник сила также увеличивается в 2 раза. Добавив ещё один такой же магнит, мы в 2 раза увеличим размеры области, где существует магнитное поле, и тем самым в 2 раза увеличим длину части проводника, на которую действует магнитное поле. Сила при этом также увеличится в 2 раза. И наконец, сила Ампера зависит от угла, образованного вектором $\vec{B}$ с проводником.

Интересно

Ампер установил закон для силы взаимодействия двух небольших участков (элементов) проводников с током. Он был сторонником теории дальнодействия и не пользовался понятием поля. Однако по традиции и в память о заслугах этого учёного выражение для магнитной силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, также называют законом Ампера.

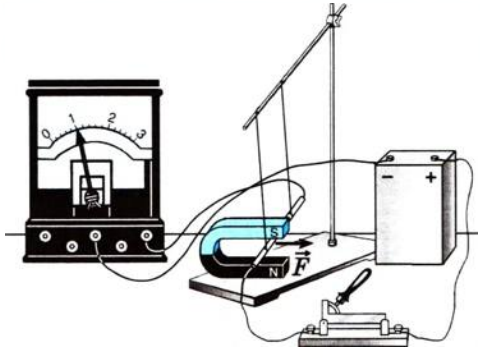


Рис. 1.17

Подумайте, как изменятся результаты эксперимента, если повернуть магнит так, чтобы сверху был северный полюс, а снизу — южный.

В этом можно убедиться, меняя наклон подставки, на которой находятся магниты, так, чтобы изменялся угол между проводником и линиями магнитной индукции. Сила достигает максимального значения $\vec{F}_m$, когда вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику.

Итак, максимальная сила, действующая на отрезок проводника длиной Δl, по которому идёт ток, прямо пропорциональна произведению силы тока I на длину участка Δl: $F_m \sim I\,\Delta l$.

Этот опытный факт можно использовать для определения модуля вектора магнитной индукции. В самом деле, поскольку $F_m \sim I\,\Delta l$, то отношение $\frac{F_m}{I\Delta l}$ не будет зависеть ни от силы тока в проводнике, ни от длины участка проводника. Именно поэтому это отношение можно принять за характеристику магнитного поля в том месте, где расположен участок проводника длиной Δl.

Запомни

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

$$B = \frac{F_m}{I\Delta l}. \qquad (1.1)$$

Магнитное поле полностью характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В каждой точке магнитного поля можно определить направление вектора магнитной индукции и его модуль, если измерить силу, действующую на отрезок проводника с током.

Вспомните определение напряжённости электрического поля. Что общего в определении характеристик электрического и магнитного полей?

Модуль силы Ампера. Пусть вектор магнитной индукции $\vec{B}$ составляет угол α (рис. 1.18) с направлением отрезка проводника с током (элементом тока). (За направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику идёт ток.) Опыт показывает, что магнитное поле, вектор индукции которого направлен вдоль проводника с током, не оказывает никакого действия на ток. Модуль силы зависит лишь от модуля составляющей вектора $\vec{B}$, перпендикулярной проводнику, т. е. от $B_\perp = B\sin\alpha$, и не зависит от составляющей $\vec{B}_\parallel$, направленной вдоль проводника.

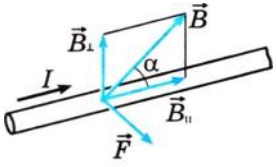


Рис. 1.18

Максимальная сила Ампера согласно формуле (1.1) равна:

$$F_m = I\Delta l B,$$

ей соответствует угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При произвольном значении угла α сила пропорциональна не B,

а составляющей $B_\perp = B \sin \alpha$. Поэтому выражение для силы F, действующей на малый отрезок проводника Δl, при силе тока в нём I, со стороны магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, составляющей с элементом тока угол α, имеет вид

Обсудите с одноклассниками, можно ли закон Ампера вывести теоретически.

$$F = I\,|\vec{B}|\,\Delta l \sin \alpha. \qquad (1.2)$$

Это выражение называют *законом Ампера*.

Закон Ампера

Модуль силы Ампера равен произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями вектора магнитной индукции и элемента тока.

Зная направление и модуль силы, действующей на любой участок проводника с током, можно вычислить суммарную силу, действующую на весь замкнутый проводник. Для этого надо найти сумму сил, действующих на каждый участок проводника.

Подумайте: в каком случае магнитное поле не действует на проводник с током? Как для определения силы Ампера разумно раскладывать вектор $\vec{B}$ на составляющие?

Направление силы Ампера. В рассмотренном выше опыте вектор $\vec{F}$ перпендикулярен элементу тока и вектору $\vec{B}$. Его направление определяется *правилом левой руки*.

Важно

Если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная проводнику составляющая $B_\perp$ вектора магнитной индукции $\vec{B}$ входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по ходу тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на отрезок проводника (рис. 1.19).

Это правило справедливо во всех случаях.

Единица магнитной индукции. Мы ввели новую величину — вектор магнитной индукции.

Запомни

За **единицу модуля вектора магнитной индукции** можно принять магнитную индукцию однородного поля, в котором на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует со стороны поля максимальная сила $F_m = 1$ Н.

Согласно формуле (1.1) единица магнитной индукции равна $1\,\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Единица магнитной индукции получила название *тесла* (Тл) в честь сербского учёного-электротехника Н. Теслы (1856—1943).

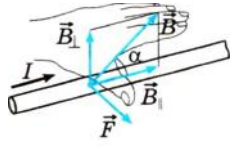


Рис. 1.19

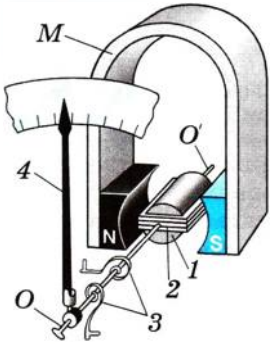


Рис. 1.20

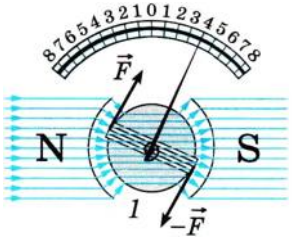


Рис. 1.21

Применение закона Ампера. Ориентирующее действие магнитного поля на контур с током используют в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы — *амперметрах* и *вольтметрах*.

Измерительный прибор магнитоэлектрической системы устроен следующим образом (рис. 1.20). На лёгкую алюминиевую рамку *2* прямоугольной формы с прикреплённой к ней стрелкой *4* намотана катушка, к которой подводится ток. Рамка укреплена на двух полуосях OO'. В положении равновесия её удерживают две тонкие спиральные пружины *3*. Силы упругости со стороны пружин, возвращающие катушку в положение равновесия, пропорциональны углу отклонения стрелки от положения равновесия. Катушку помещают между полюсами постоянного магнита M с наконечниками специальной формы. Внутри катушки расположен цилиндр *1* из железа. Такая конструкция обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в той области, где находятся витки катушки (рис. 1.21). В результате при любом положении катушки силы, действующие на неё со стороны магнитного поля, максимальны и при неизменной силе тока постоянны.

Векторы $\vec{F}$ и $-\vec{F}$ изображают силы, действующие на катушку со стороны магнитного поля и поворачивающие её. Катушка с током поворачивается до тех пор, пока силы упругости со стороны пружин не уравновесят силы, действующие на рамку со стороны магнитного поля. Увеличивая силу тока в 2 раза, мы обнаружим, что стрелка поворачивается на угол, вдвое больший, и т. д. Это происходит потому, что силы, действующие на катушку со стороны магнитного поля, прямо пропорциональны силе тока: $F_m \sim I$. Благодаря этому можно определить силу тока по углу поворота катушки, если проградуировать прибор. Для этого надо установить, каким углам поворота стрелки соответствуют известные значения силы тока.

Обсудите с одноклассниками, почему при такой конструкции прибора сила Ампера не зависит от угла поворота рамки. Как можно было бы измерять силу тока, если бы рамка находилась в однородном магнитном поле?

Такой же прибор может измерять и напряжение. Для этого нужно градуировать прибор так, чтобы угол поворота стрелки соответствовал определённым значениям напряжения. Заметим, что сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления амперметра.

В электродинамическом *громкоговорителе* (динамике) используется действие магнитного поля постоянного магнита на переменный ток в подвижной катушке. Громкоговоритель служит для возбуждения звуковых волн под действием переменного электрического тока, меняющегося со звуковой частотой.

Схема устройства громкоговорителя показана на рисунке 1.22, *а*. Звуковая катушка ЗК располагается в зазоре кольцевого магнита *M*. С катушкой жёстко связан бумажный конус — диафрагма *D*. Диафрагма укреплена на упругих подвесах, позволяющих ей совершать вынужденные колебания вместе с подвижной катушкой.

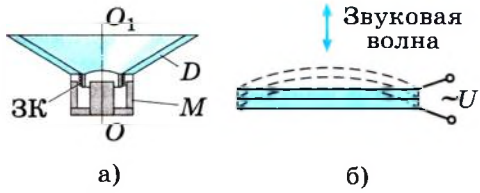


Рис. 1.22

По катушке проходит переменный электрический ток с частотой, равной звуковой частоте сигнала с микрофона или с выхода радиоприёмника, проигрывателя, магнитофона. Под действием силы Ампера катушка колеблется вдоль оси громкоговорителя OO_1 (см. рис. 1.22, *а*) в такт с колебаниями тока. Эти колебания передаются диафрагме, и поверхность диафрагмы излучает звуковые волны.

Звук в радиоприёмнике, проигрывателе и магнитофоне возникает в результате движения катушки с током в поле постоянного магнита.

Интересно

Качественные громкоговорители воспроизводят без значительных искажений звуковые колебания в диапазоне 40—15 000 Гц. Но такие устройства очень сложны. Поэтому обычно применяют системы из нескольких громкоговорителей, каждый из которых воспроизводит звук в определённом небольшом интервале частот. Общим недостатком всех громкоговорителей является их малый КПД. Они излучают лишь 1—3 % подводимой энергии.

Вспомните принцип действия электродвигателя.

Наряду с электромеханическими громкоговорителями в настоящее время широкое применение получили громкоговорители, устройство которых основано на пьезоэлектрическом эффекте (рис. 1.22, *б*). Этот эффект проявляется в виде деформации некоторых типов кристаллов в электростатическом поле. Пьезогромкоговорители очень удобны в изготовлении и могут быть совсем маленькими. Вследствие этого они нашли широкое применение в радиотелефонах, мобильных телефонах, ноутбуках и микрокомпьютерах.

Закон Ампера используют для расчёта сил, действующих на проводники с током, во многих технических устройствах, в частности в электродвигателях, с которыми вы ознакомились в основной школе.

Закон Ампера. Правило левой руки. Применение закона Ампера

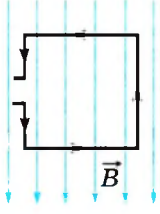
Найти

1. Как определяется модуль вектора магнитной индукции?
2. Чему равен модуль вектора силы Ампера?
3. Сформулируйте правило для определения направления силы Ампера.
4. В каких единицах выражается магнитная индукция?
5. Используя правило буравчика и правило левой руки, покажите, что токи, направленные параллельно, притягиваются, а направленные противоположно — отталкиваются.

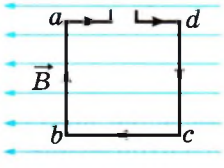
6. Почему магнитные силы, действующие на проводники катушки прибора, не зависят от угла поворота катушки?
7. Что удерживает рамку от вращения в магнитном поле?
8. Чем амперметр отличается от вольтметра?
9. Укажите направления вектора магнитной индукции, электрического тока и силы Ампера на схеме громкоговорителя (см. рис. 1.22).

1. Прямолинейный проводник длиной 0,1 м, по которому идёт электрический ток, находится в однородном магнитном поле с индукцией 4 Тл и расположен под углом 60° к вектору магнитной индукции. Сила тока 3 А. Чему равна сила, действующая на проводник со стороны магнитного поля?
1) 1,6 Н 2) 1 Н 3) 1,4 Н 4) 2,4 Н

2. На проводник, расположенный в однородном магнитном поле под углом 30° к направлению линий магнитной индукции, действует сила F. Если увеличить этот угол в 3 раза, то на проводник будет действовать сила, равная
1) 0 2) $F/2$ 3) $2F$ 4) $3F$



3. В однородном магнитном поле находится рамка, по которой начинает идти ток (см. рис.). Сила, действующая на верхнюю сторону рамки, направлена
1) вниз 3) перпендикулярно плоскости листа, на нас
2) вверх 4) перпендикулярно плоскости листа, от нас



4. Квадратная рамка расположена в однородном магнитном поле в плоскости линий магнитной индукции так, как показано на рисунке. Направление тока в рамке показано стрелками. Как направлена сила, действующая на сторону ab рамки со стороны магнитного поля?
1) перпендикулярно плоскости чертежа, от нас
2) перпендикулярно плоскости чертежа, на нас
3) вертикально вверх, в плоскости чертежа
4) вертикально вниз, в плоскости чертежа

5. Укажите устройство, принцип действия которого основан на явлении возникновения силы, действующей на проводник в магнитном поле, при прохождении через проводник электрического тока.
1) реостат 3) электродвигатель
2) металлоискатель 4) электрочайник

6. В основе работы электродвигателя лежит
1) действие магнитного поля на проводник с электрическим током
2) электростатическое взаимодействие зарядов
3) явление самоиндукции
4) действие электрического поля на электрический заряд

§ 3 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СИЛА АМПЕРА»

Решение задач с применением закона Ампера аналогично решению задач механики. Кроме механических сил, надо учитывать силу Ампера и правильно, по правилу левой руки, определять её направление.

Задача 1. Между полюсами магнита подвешен горизонтально на двух невесомых нитях прямой проводник длиной $l = 0{,}2$ м и массой $m = 10$ г. Вектор индукции однородного магнитного поля перпендикулярен проводнику и направлен вертикально; $B = 49$ мТл. На какой угол α от вертикали отклонятся нити, поддерживающие проводник, если по нему пропустить ток? Сила тока $I = 2$ А.

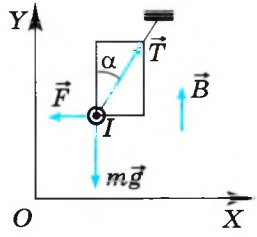


Рис. 1.23

Р е ш е н и е. На проводник действуют следующие силы: силы упругости $\vec{T}$ двух нитей, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила Ампера $\vec{F}$ (рис. 1.23). Модуль силы Ампера $F = IBl$. При равновесии проводника суммы проекций сил на вертикальное и горизонтальное направления (с учётом их знаков) равны нулю:

$$-mg + 2T\cos\alpha = 0,$$

$$-F + 2T\sin\alpha = 0.$$

Отсюда $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{F}{mg} = \dfrac{IBl}{mg} \approx 0{,}2$. Следовательно, угол $\alpha \approx 11°$.

Задача 2. Рамка с током находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 2$ мТл. Определите момент сил, действующих на рамку, если угол между нормалью к плоскости рамки и вектором магнитной индукции $\alpha = 30°$. Сила тока, идущего по рамке, $I = 10$ мА, длина стороны рамки $a = 5$ см.

Р е ш е н и е. На рисунке 1.24 показаны определённые по правилу левой руки направления сил Ампера, действующих на стороны рамки. Очевидно, что $|\vec{F}_3| = |\vec{F}_4|$ и сумма этих сил равна нулю. Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ вызывают вращение рамки в одном направлении. Суммарный момент этих сил $M = M_1 + M_2$, где $M_1 = M_2 = (F_1\sin\alpha)a/2$.

Вектор индукции магнитного поля перпендикулярен сторонам AC и ED рамки. Согласно закону Ампера $F_1 = F_2 = IBa$. Тогда $M = IBa^2\sin\alpha = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ Н · м.

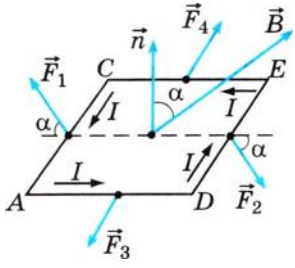


Рис. 1.24

Задача 3. Проводник, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного магнитного поля, подвешенный на двух нитях, в одном случае весит 15 Н, а в другом 10 Н в зависимости от направления тока в нём. Определите массу проводника.

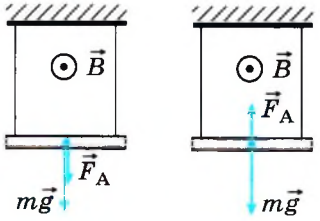


Рис. 1.25

Р е ш е н и е. На проводник, по которому идёт ток, в магнитном поле действует сила Ампера: $F_A = IBl \sin \alpha$, в данном случае $\alpha = 90°$, поэтому $F_A = IBl$.

В первом случае сила тока направлена так, что сила Ампера совпадает по направлению с силой тяжести (рис. 1.25, *а*), во втором случае сила Ампера направлена в противоположную сторону (рис. 1.25, *б*).

Таким образом, в первом случае $P_1 = mg + IBl$, во втором $P_2 = mg - IBl$.

Сложив левые и правые части уравнений, получим $P_1 + P_2 = 2mg$. Отсюда $m = \dfrac{P_1 + P_2}{2g} = 1{,}25$ кг.

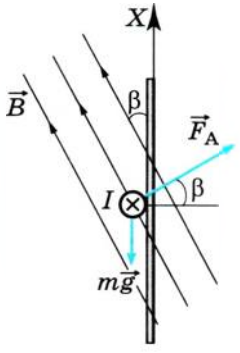


Рис. 1.26

Задача 4. В однородном магнитном поле, индукция которого равна $4 \cdot 10^{-2}$ Тл и направлена под углом $\beta = 30°$ к вертикали, по вертикальным проводам без трения движется вверх прямой проводник массой 10 г, по которому идёт постоянный ток (рис. 1.26, вид сбоку). Сила тока 3 А. Через 5 с после начала движения проводник имеет скорость 20 м/с. Определите длину проводника.

Р е ш е н и е. На проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила Ампера $F_A = IBl \sin \alpha$, где $\alpha = \pi/2$.

Движение проводника осуществляется только в вертикальном направлении. Ускорение проводника найдём из второго закона Ньютона:

$$ma = F_{Ax} - mg,$$

где $F_{Ax} = F_A \sin \beta$ — проекция силы Ампера на вертикальную ось.

Тогда $ma = F_A \sin \beta - mg = IB\Delta l \sin \beta - mg$.

Скорость проводника $v = at = \dfrac{IB\Delta l \sin \beta - mg}{m} t$, откуда

$$\Delta l = \frac{mv + mgt}{tIB \sin \beta} = \frac{m(v + gt)}{tIB \sin \beta} = \frac{7}{3} \text{ м}.$$

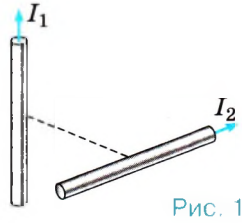


Рис. 1.27

Задачи для самостоятельного решения

1. По двум скрещивающимся под прямым углом прямолинейным проводникам пропускают токи. Силы токов I_1 и I_2 (рис. 1.27). Как будет изменяться расположение проводников относительно друг друга?

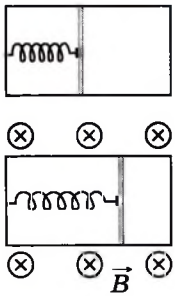
2. Проводник длиной $l = 0{,}15$ м перпендикулярен вектору магнитной индукции однородного магнитного поля, модуль которого $B = 0{,}4$ Тл. Сила тока в проводнике $I = 8$ А. Определите работу силы Ампера, которая была совершена при перемещении проводника на 0,025 м по направлению действия этой силы.

3. Квадратная рамка с током массой 200 г со стороной, равной 20 см, лежит на горизонтальной поверхности. Индукция магнитного поля, равная 4 Тл, параллельна плоскости рамки. При какой минимальной силе тока одна из сторон рамки не давит на поверхность?

1. Участок проводника длиной 10 см находится в магнитном поле с индукцией 50 мТл. Сила электрического тока, проходящего по проводнику, равна 10 А. Какое перемещение совершает проводник в направлении действия силы Ампера, если работа этой силы 0,004 Дж? Проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции.

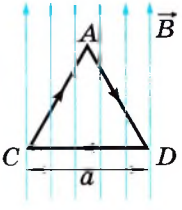
1) 0,0008 м 2) 0,08 м 3) 0,8 м 4) 8 м

2. Свободно перемещающийся по рамке проводник с током через изолятор прикреплён к пружине жёсткостью 5 Н/м (см. рис.). Длина проводника равна 0,5 м, и по нему идёт ток. Сила тока 2 А. При помещении проводника с изолятором в магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости рамки, пружина растянулась на 10 см. Определите значение индукции магнитного поля.

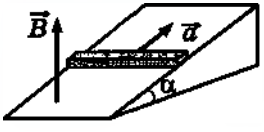


3. По прямому горизонтальному проводнику длиной 1 м с площадью поперечного сечения $1{,}25 \cdot 10^{-5}$ м^2, подвешенному с помощью двух одинаковых невесомых пружинок жёсткостью 100 Н/м каждая, идёт ток. Сила тока 10 А. На какой угол от вертикали отклонятся пружинки при включении вертикального магнитного поля с индукцией 0,1 Тл, если абсолютное удлинение каждой из пружинок при этом составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м? (Плотность материала проводника $8 \cdot 10^3$ кг/м^3.)

4. На непроводящей горизонтальной поверхности стола лежит проводящая жёсткая рамка из однородной тонкой проволоки, согнутой в виде равностороннего треугольника ADC со стороной, равной a (см. рис.). Рамка, по которой идёт ток I, находится в однородном горизонтальном магнитном поле, вектор индукции которого $\vec{B}$ перпендикулярен стороне CD. Каким должен быть модуль индукции магнитного поля, чтобы рамка начала поворачиваться вокруг стороны CD, если масса рамки m?



5. Горизонтальный проводящий стержень прямоугольного сечения поступательно движется вверх с ускорением по гладкой наклонной плоскости в вертикальном однородном магнитном поле (см. рис.). По стержню идёт ток. Сила тока $I = 4$ А. Угол наклона плоскости $\alpha = 30°$. Отношение массы стержня к его длине $m/L = 0{,}1$ кг/м. Ускорение стержня $a = 1{,}9$ м/с^2. Чему равен модуль индукции магнитного поля?



§ 4 ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩУЮСЯ ЗАРЯЖЕННУЮ ЧАСТИЦУ. СИЛА ЛОРЕНЦА

От чего зависит действие магнитного поля на ток?
Что такое элемент тока?
Можно ли утверждать, что сила Ампера прямо пропорциональна вектору магнитной индукции?

Электрический ток — это направленно движущиеся заряженные частицы. Поэтому действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника. Найдём силу, действующую на одну частицу.

Запомни **Силой Лоренца** называют силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

Эта сила названа в честь великого голландского физика Х. Лоренца (1853—1928) — основателя электронной теории строения вещества. Силу Лоренца можно найти с помощью закона Ампера.

Запомни **Модуль силы Лоренца** равен отношению модуля силы $\vec{F}$, действующей на участок проводника длиной Δl, к числу N заряженных частиц, упорядоченно движущихся в этом участке проводника:

$$F_{Л} = \frac{F}{N}. \qquad (1.3)$$

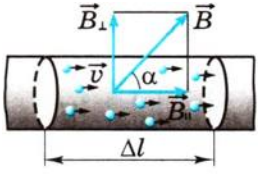


Рис. 1.28

Рассмотрим отрезок тонкого прямого проводника с током (рис. 1.28). Пусть длина отрезка Δl и площадь S поперечного сечения проводника настолько малы, что вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ можно считать одинаковым в пределах этого отрезка проводника. Сила тока I в проводнике связана с зарядом q частиц, концентрацией n заряженных частиц (числом зарядов в единице объёма) и скоростью v их упорядоченного движения следующей формулой:

$$I = qnvS. \qquad (1.4)$$

Обсудите с одноклассником вывод формулы (1.4) на основании представлений электронной теории проводимости.

Модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на выбранный элемент тока, равен:

$$F = |I|B\Delta l \sin \alpha.$$

Подставляя в эту формулу выражение (1.4) для силы тока, получаем

$$F = |q|nvS\Delta lB \sin \alpha = v|q|NB \sin \alpha,$$

где $N = nS\Delta l$ — число заряженных частиц в рассматриваемом объёме. Следовательно, на каждый движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца

$$F_{Л} = \frac{F}{N} = |q|\upsilon B \sin\alpha, \qquad (1.5)$$

где α — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции. Сила Лоренца перпендикулярна векторам $\vec{B}$ и $\vec{\upsilon}$. Её направление определяется с помощью того же *правила левой руки*, что и направление силы Ампера: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции $\vec{B}$, перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению скорости движения положительного заряда (против направления скорости движения отрицательного), то отогнутый на 90° большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца $\vec{F}_{Л}$ (рис. 1.29). Электрическое поле действует на заряд q с силой $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$. Следовательно, если есть и электрическое поле, и магнитное поле, то суммарная сила $\vec{F}$, действующая на заряд, равна:

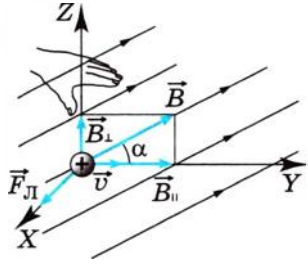


Рис. 1.29

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{Л}.$$

Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, то она *не совершает работы*. Согласно теореме об изменении кинетической энергии (см. учебник физики для 10 класса) это означает, что

Важно

сила Лоренца *не меняет кинетическую энергию частицы* и, следовательно, модуль скорости частицы. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Рассмотрим движение частицы с зарядом q в однородном магнитном поле $\vec{B}$, направленном перпендикулярно вектору начальной скорости частицы $\vec{\upsilon}$ (рис. 1.30). Сила Лоренца зависит от модулей векторов скорости частицы и индукции магнитного поля. Так как магнитное поле не меняет модуль скорости движущейся частицы, то остаётся неизменным и модуль силы Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и, следовательно, определяет центростремительное ускорение частицы. Неизменность по модулю центростремительного ускорения частицы, движущейся с постоянной по модулю скоростью, означает, что частица равномерно движется по окружности радиусом r. Определим этот радиус.

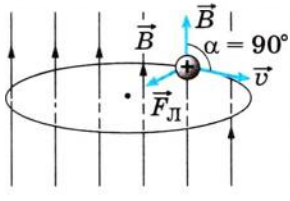


Рис. 1.30

Согласно второму закону Ньютона (см. рис. 1.30)

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB.$$

Отсюда

$$r = \frac{mv}{|q|B}. \qquad (1.6)$$

Время, за которое частица делает полный оборот (период обращения), равно:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}. \qquad (1.7)$$

В каком случае заряженная частица движется в магнитном поле по окружности? Придумайте механическую модель движения частицы в этом случае.

Использование действия магнитного поля на движущийся заряд. Действие магнитного поля на движущийся заряд широко использовали в технике. Достаточно вспомнить телевизионные трубки (кинескопы), в которых летящие к экрану электроны отклоняются с помощью магнитного поля, создаваемого особыми катушками.

Сила Лоренца используется в ускорителе заряженных частиц (циклотроне) для получения частиц с большими энергиями. *Циклотрон* состоит из двух полых полуцилиндров (дуантов) *3*, находящихся в однородном магнитном поле (рис. 1.31). В зазоре между дуантами создаётся переменное электрическое поле с постоянным периодом, равным периоду обращения частицы. Согласно формуле (1.6) при увеличении скорости частицы *1* радиус окружности (траектории *2*), по которой движется частица, увеличивается. Период обращения частицы не зависит от скорости (см. формулу (1.7)), и, следовательно, через полпериода, вследствие изменения направления электрического поля в зазоре, частица снова оказывается в ускоряющем её поле и т. д. На последнем витке частица вылетает из циклотрона.

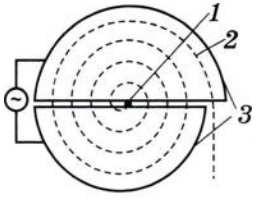


Рис. 1.31

На действии магнитного поля основано также и устройство приборов, позволяющих разделять заряженные частицы по их удельным зарядам, т. е. по отношению заряда частицы к её массе, и по полученным результатам точно определять массы частиц. Такие приборы получили название *масс-спектрографов*.

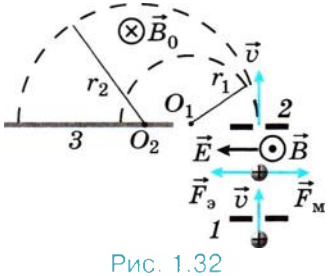


Рис. 1.32

На рисунке 1.32 изображена принципиальная схема простейшего масс-спектрографа. Пройдя через диафрагму *1*, положительно заряженные ионы попадают во взаимно перпендикулярные электрическое ($\vec{E}$) и магнитное ($\vec{B}$) поля. Если сила Лоренца равна электростатической силе $qE = qvB$, то через диафрагму *2* пройдут только ионы, имеющие скорость $v = E/B$. Ионы, движущиеся с другими скоростями, отклонятся и не пройдут через неё.

В области за диафрагмой *2* создаётся магнитное поле с индукцией $\vec{B}_0$. Радиус кривизны траектории ионов в этом магнитном поле $r = \frac{mv}{qB_0}$, и его можно измерить, поставив на пути частиц фотопластинку *3*. Так как скорость частиц одинакова и определяется постоянной прибора E/B, то, зная заряд ионов, можно определить их массу по формуле $m = \frac{qB_0 r}{v} = \frac{qBB_0 r}{E}$ ($r_2 > r_1$, $m_2 > m_1$).

Ещё одно устройство — *токама́к* (тороидальная камера с магнитными катушками), в котором плазма (заряженные частицы) удерживается специально создаваемым магнитным полем, считается наиболее перспективным устройством для осуществления управляемого термоядерного синтеза.

Заряженная частица в магнитном поле. Сила Лоренца

Найти

1. Чему равен модуль силы Лоренца?
2. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если начальная скорость частицы перпендикулярна линиям магнитной индукции?
3. Как определить направление силы Лоренца?

1. В магнитном поле с индукцией $B = 4$ Тл движется электрон со скоростью 10^7 м/с, направленной перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Чему равен модуль F силы, действующей на электрон со стороны магнитного поля? Заряд электрона соответственно $q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

1) $0{,}4 \cdot 10^{-12}$ Н
2) $6{,}4 \cdot 10^{-12}$ Н
3) $0{,}4 \cdot 10^{-26}$ Н
4) $6{,}4 \cdot 10^{-26}$ Н

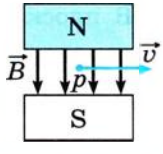
2. Электрон и протон влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции со скоростями v и $2v$ соответственно. Модули зарядов электрона и протона равны $q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Отношение модуля силы, действующей со стороны магнитного поля на электрон, к модулю силы, действующей на протон в этот момент времени, равно

1) 4 : 1
2) 2 : 1
3) 1 : 1
4) 1 : 2

3. Нейтрон и электрон влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции на расстоянии L друг от друга с одинаковыми скоростями v. Отношение модулей сил, действующих на них со стороны магнитного поля в этот момент времени,

1) равно 0
2) равно 1
3) много больше 1
4) много меньше 1, но не равно 0

4. Протон p, влетевший в зазор между полюсами электромагнита, имеет горизонтальную скорость $\vec{v}$, перпендикулярную вектору индукции $\vec{B}$ магнитного поля, направленному вниз (см. рис.). Куда направлена действующая на протон сила Лоренца $\vec{F}$?



1) вертикально вниз
2) вертикально вверх
3) горизонтально, на нас
4) горизонтально, от нас

§ 5 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СИЛА ЛОРЕНЦА»

Решение задач по этой теме основано на законах механики. Вспомним, что сила, перпендикулярная вектору скорости, не вызывает изменения её модуля, а изменяет только её направление, поэтому, когда сила Лоренца и скорость лежат в одной плоскости, частица движется с постоянной скоростью по дуге окружности.

Если скорость направлена под углом к вектору магнитной индукции, то частица участвует в двух движениях: равномерном вдоль линий поля и по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору индукции $\vec{B}$. Это движение происходит уже не в плоскости, а в пространстве.

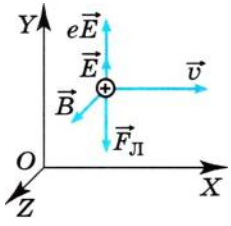


Рис. 1.33

Задача 1. В пространстве, где созданы одновременно однородные и постоянные электрическое и магнитное поля, по прямолинейной траектории движется протон. Известно, что напряжённость электрического поля равна $\vec{E}$. Определите индукцию $\vec{B}$ магнитного поля.

Р е ш е н и е. Прямолинейное движение протона возможно в двух случаях.

1) Вектор $\vec{E}$ направлен вдоль траектории движения протона. Тогда вектор $\vec{B}$ также должен быть направлен вдоль этой траектории, и его модуль может быть любым, так как магнитное поле не будет действовать на частицу.

2) Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{v}$ взаимно перпендикулярны, и сила, действующая на протон со стороны электрического поля, равна по модулю и противоположна по направлению силе Лоренца, действующей на протон со стороны магнитного поля (рис. 1.33). Так как $e\vec{E} + \vec{F}_Л = 0$, то $eE - evB = 0$ и $B = \frac{E}{v}$.

Задача 2. Протон влетает в однородное магнитное поле со скоростью $v = 100$ м/с, направленной под углом $\alpha = 60°$ к линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля $B = 0{,}1$ Тл. Масса и заряд протона равны соответственно $m_p = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ кг, $q_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Определите параметры траектории частицы.

Р е ш е н и е. Мы знаем, что на частицу, движущуюся параллельно линиям магнитной индукции, магнитное поле не действует.

Разложим скорость на две составляющие: одну параллельно линиям магнитной индукции, а другую перпендикулярно им — $\vec{v}_\parallel$ и $\vec{v}_\perp$. Вдоль линий магнитной индукции протон движется с постоянной скоростью $v_\parallel = v\cos\alpha$.

В плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{B}$, протон движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом $r = \frac{mv_\perp}{qB}$ (см. формулу (1.6). Согласно закону независимости движений протон участвует в двух движениях: вдоль линий индукции он движется равномерно и одновременно вращается в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{B}$.

Таким образом, траекторией движения частицы будет винтовая линия. Радиус $r = \dfrac{mv_\perp}{qB} = \dfrac{mv\sin\alpha}{qB} \approx 9{,}1 \cdot 10^{-6}$ м.

Шаг винта — расстояние, которое пройдёт частица за время одного оборота: $h = v_\parallel T = v\cos\alpha\dfrac{2\pi m}{qB} \approx 3{,}3 \cdot 10^{-5}$ м.

Задача 3. В однородное магнитное поле влетает электрон со скоростью $v = 100$ м/с под углом $\alpha = 60°$ к линиям магнитной индукции. Сколько оборотов сделает электрон, прежде чем попадёт на экран Э? Индукция магнитного поля $B = 0{,}01$ Тл. Расстояние от точки O поля, в которую попадает электрон, до экрана $l = 20$ см.

Р е ш е н и е. В поле на электрон начинает действовать сила Лоренца $F = |e|vB\sin\alpha$, которая заставляет электрон двигаться по окружности (рис. 1.34). При этом вдоль оси OX электрон движется равномерно со скоростью $v_x = v\cos\alpha$. Время, за которое электрон долетит до экрана, $t = \dfrac{l}{v\cos\alpha}$. Период обращения электрона по окружности $T = \dfrac{2\pi m}{|e|B}$ (см. формулу (1.7)). Таким образом, число оборотов $N = \dfrac{t}{T} = l|e|B/2\pi mv\cos\alpha = 1{,}1 \cdot 10^6$.

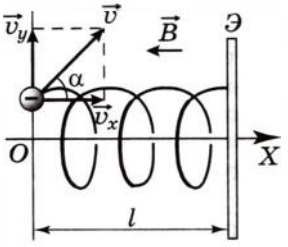


Рис. 1.34

Задача 4. Ток идёт по проводнику прямоугольного сечения (a и b известны), помещённому в однородное магнитное поле, как показано на рисунке 1.35. Сила тока равна I. Разность потенциалов между точками A и C на верхней и нижней гранях проводника равна U. Определите индукцию магнитного поля. Концентрация свободных движущихся электронов равна n.

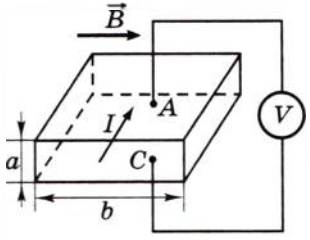


Рис. 1.35

Р е ш е н и е. На направленно движущиеся электроны в магнитном поле действует сила Лоренца, отклоняющая их вверх. Вследствие этого между точками A и C возникает разность потенциалов. (Явление возникновения разности потенциалов между поверхностями проводника, по которому идёт ток, в магнитном поле называется *эффектом Холла*.) Возникающее электрическое поле препятствует дальнейшему разделению зарядов. Оно прекращается, когда сила Лоренца, действующая на движущийся электрон, станет равна электростатической силе:

$$|e|vB = |e|\frac{U}{a}. \qquad (1)$$

Сила тока $I = |e|nvab$, откуда средняя скорость направленного движения электронов $v = \dfrac{I}{|e|nab}$.

Подставим это выражение в формулу (1) и найдём индукцию магнитного поля: $B = \dfrac{U|e|nb}{I}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите радиус окружности и период обращения электрона в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}01$ Тл. Скорость электрона перпендикулярна вектору магнитной индукции и равна 10^6 м/с. Масса электрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, его заряд $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

2. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-2} Тл. В некоторый момент времени вектор его скорости, равной 10^6 м/с, составляет угол 30° с направлением магнитного поля. Вычислите радиус R и шаг h винтовой линии, по которой движется электрон.

3. Заряженные частицы, заряд которых $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ Кл, ускоряются в циклотроне в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-1} Тл и частотой ускоряющего напряжения 6 МГц. Определите кинетическую энергию частиц в момент, когда они движутся по дуге радиусом 2 м.

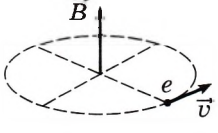
4. Протон влетает в область однородного магнитного поля шириной L. Индукция магнитного поля $\vec{B}$. Скорость $\vec{v}$ протона перпендикулярна индукции поля и границе области поля. Под каким углом α к первоначальному направлению движения протон вылетит из области поля?

5. Электрон влетает в конденсатор со скоростью v_0 параллельно его пластинам, имеющим длину l, а вылетает под углом α к первоначальному направлению движения. Чему должна быть равна индукция магнитного поля, направленного перпендикулярно начальной скорости, при которой направление движения электрона не изменится?

1. Два первоначально покоившихся электрона ускоряются в электрическом поле: первый — в поле с разностью потенциалов U, второй — $4U$. Ускорившиеся электроны попадают в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны скорости движения электронов. Чему равно отношение радиусов кривизны траекторий первого и второго электронов в магнитном поле?

1) 1/4 2) 1/2 3) $\sqrt{2}/2$ 4) $\sqrt{2}$

2. Ион, заряд которого $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}6$ Тл в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{B}$. Радиус дуги, по которой движется ион, $R = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ м. Чему равен импульс иона?



3. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 4 \cdot 10^{-3}$ Тл (см. рис.). Через какое минимальное время электрон вновь окажется в указанной точке? Заряд электрона $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл и его масса $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

4. Заряженный шарик влетает в область магнитного поля с индукцией $B = 0{,}2$ Тл, имея скорость $v = 1000$ м/с, перпендикулярную вектору магнитной индукции. Какой путь он пройдёт к тому моменту, когда вектор его скорости повернётся на 1°? Масса шарика $m = 0{,}01$ г, заряд $q = 500$ мкКл.

§ 6 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

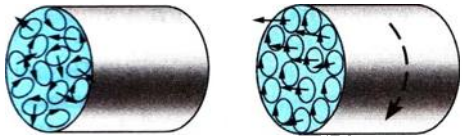
Какое явление описывает формула для силы Лоренца?
От чего зависит результат действия силы Лоренца?

Магнитное поле, как мы уже знаем, создаётся не только электрическими токами, но и постоянными магнитами.

Намагничивание вещества. Постоянные магниты могут быть изготовлены лишь из сравнительно немногих веществ, но все вещества, помещённые в магнитное поле, намагничиваются, т. е. сами становятся источниками магнитного поля. В результате этого вектор магнитной индукции при наличии вещества отличается от вектора магнитной индукции в вакууме.

Гипотеза Ампера. Согласно гипотезе Ампера внутри молекул и атомов циркулируют элементарные электрические токи. (Теперь мы хорошо знаем, что эти токи образуются вследствие движения электронов в атомах.) Круговой ток создаёт магнитное поле. Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены беспорядочно по отношению друг к другу (рис. 1.36, *а*), то векторы магнитной индукции также имеют случайные направления, суммарный вектор равен нулю и никакими магнитными свойствами тело не обладает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле создают сонаправленные магнитные поля, следовательно, векторы индукции этих полей складываются. Можно представить, что суммарное поле элементарных токов эквивалентно магнитному полю тока, идущего по внешней поверхности вещества (рис. 1.36, *б*).

Возьмите постоянный магнит и понаблюдайте, какие металлические предметы притягиваются к нему, а какие нет.



а) б)

Рис. 1.36

Вспомните, как происходит поляризация диэлектрика. Что общего между этим явлением и намагничиванием вещества?

Интересно

Причина, вследствие которой тела обладают магнитными свойствами, была установлена французским учёным Ампером. Сначала, под впечатлением от опытов Эрстеда, Ампер предположил, что магнетизм Земли вызван токами, проходящими внутри земного шара. Главный шаг был сделан: *магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующими внутри его токами.* Далее Ампер пришёл к общему заключению: *магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри его.* Этот решающий шаг от возможности объяснения магнитных свойств тела токами к категорическому утверждению, что магнитные взаимодействия — это взаимодействия токов, — свидетельство большой научной смелости Ампера.

Гипотеза Ампера объясняет, почему магнитная стрелка и рамка (контур) с током в магнитном поле ведут себя одинаково (см. § 1). Стрелку можно рассматривать как совокупность маленьких контуров с током, ориентированных одинаково.

Запомни **Ферромагнетиками** называют вещества, которые создают наиболее сильные магнитные поля.

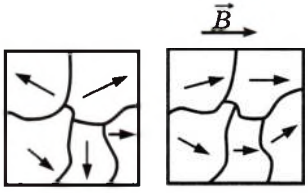
Интересно Большой вклад в развитие теории ферромагнетизма внесли российские учёные Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц и Я. И. Френкель.

Магнитные поля создаются ферромагнетиками не только вследствие обращения электронов вокруг ядер, но и вследствие собственного вращения электронов.

Запомни Собственный вращательный момент (момент импульса) электрона называется **спином**.

Согласно простейшим представлениям электроны вращаются вокруг собственной оси и, обладая зарядом, создают магнитное поле наряду с полем, появляющимся за счёт их орбитального движения вокруг ядер.

Запомни В ферромагнетиках существуют области с параллельными ориентациями спинов, называемые **доменами**; размеры доменов порядка 0,5 мкм.



а) б)

Рис. 1.37

Параллельная ориентация спинов обеспечивает доменам минимум потенциальной энергии. Если ферромагнетик не намагничен, то ориентация доменов хаотична (рис. 1.37, *а*) и суммарное магнитное поле, создаваемое доменами, равно нулю. При включении внешнего магнитного поля домены ориентируются вдоль линий магнитной индукции этого поля (рис. 1.37, *б*) и индукция магнитного поля в ферромагнетиках увеличивается, становясь в тысячи и даже миллионы раз больше индукции внешнего поля.

Интересно Наряду с ферромагнетиками в природе существуют диа- и парамагнетики.

В диамагнетиках при внесении их в магнитное поле индукция магнитного поля в веществе уменьшается, а в парамагнетиках увеличивается, но существенно меньше, чем в ферромагнетиках.

У диамагнетиков магнитные поля электронов в отсутствие внешнего магнитного поля полностью скомпенсированы, однако при его включении эта компенсация нарушается. Вектор индукции орбитального магнитного поля оказывается направленным против вектора индукции внешнего поля.

У парамагнетиков магнитные поля электронов в атоме не полностью скомпенсированы. Атомы представляют собой маленькие постоянные магниты, которые во внешнем магнитном поле ориентируются так, что их магнитное поле усиливает внешнее поле.

Температура Кюри. При температурах, бóльших некоторой определённой для данного ферромагнетика температуры, его ферромагнитные свойства исчезают.

Запомни Температуру, при которой ферромагнитные свойства исчезают, называют **точкой Кюри** по имени открывшего данное явление французского учёного.

Если достаточно сильно нагреть намагниченный гвоздь, то он потеряет способность притягивать к себе железные предметы. Точка Кюри для железа 753 °С, для никеля 365 °С, а для кобальта 1000 °С. Существуют ферромагнитные сплавы, у которых точка Кюри меньше 100 °С.

Первые детальные исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839—1896).

Ферромагнетики и их применение. Хотя ферромагнитных тел в природе не много, именно благодаря их магнитным свойствам они получили наибольшее практическое применение. Железный или стальной сердечник в катушке во много раз усиливает создаваемое ею магнитное поле, не увеличивая силу тока в катушке. Это экономит электроэнергию. Сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д. изготовляют из ферромагнетиков.

При выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остаётся намагниченным, т. е. создаёт магнитное поле в окружающем пространстве. Это объясняется тем, что домены не возвращаются в прежнее положение и их ориентация частично сохраняется. Благодаря этому существуют постоянные магниты.

Постоянные магниты находят широкое применение в электроизмерительных приборах, громкоговорителях и телефонах, звукозаписывающих аппаратах, магнитных компасах и т. д.

Большое применение получили *ферриты* — ферромагнитные материалы, не проводящие электрического тока. Они представляют собой химические соединения оксидов железа с оксидами других веществ. Один из известных ферромагнитных материалов — магнитный железняк — является ферритом.

Магнитная запись информации. Из ферромагнетиков изготовляют магнитные ленты и тонкие магнитные плёнки. Магнитные ленты ранее широко использовались для звукозаписи в магнитофонах и для видеозаписи в видеомагнитофонах.

Магнитная лента представляет собой гибкую основу из полихлорвинила или других веществ. На неё наносится рабочий слой в виде магнитного лака, состоящего из очень мелких игольчатых частиц железа или другого ферромагнетика и связующих веществ.

Запись звука производят на ленту с помощью электромагнита, магнитное поле которого изменяется в такт со звуковыми колебаниями. При движении ленты вблизи магнитной головки различные участки плёнки намагничиваются. Схема магнитной индукционной головки показана на рисунке 1.38, где *1* — сердечник электромагнита; *2* — магнитная лента; *3* — рабочий зазор; *4* — обмотка электромагнита.

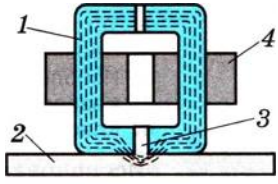


Рис. 1.38

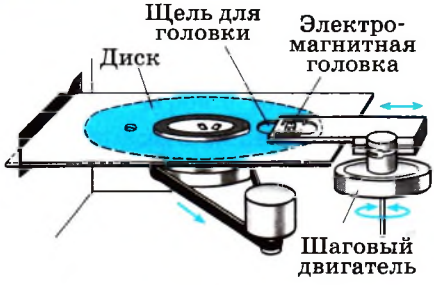


Рис. 1.39

При воспроизведении звука наблюдается обратный процесс: намагниченная лента возбуждает в магнитной головке электрические сигналы, которые после усиления поступают на динамик магнитофона.

Тонкие магнитные плёнки состоят из слоя ферромагнитного материала толщиной от 0,03 до 10 мкм. Их применяют в запоминающих устройствах электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Магнитные плёнки предназначены для записи, хранения и воспроизведения информации. Их наносят на тонкий алюминиевый диск или барабан. Информацию записывают и воспроизводят примерно так же, как и в обычном магнитофоне.

Развитие технологии магнитной записи привело к появлению магнитных микроголовок, позволяющих создавать немыслимую ранее плотность магнитной записи. На ферромагнитном жёстком диске диаметром меньше 8 см хранится до нескольких терабайт (10^{12} байт) информации. Считывание и запись информации на таком диске осуществляются с помощью микроголовки, расположенной на специальном устройстве, позволяющем перемещаться вдоль радиуса диска (рис. 1.39). Сам диск вращается с огромной скоростью, и головка плавает над ним в потоке воздуха, что предотвращает возможность механического повреждения диска.

Намагничивание. Ферромагнетики. Домены. Температура Кюри — Найти

1. Какие вещества называют ферромагнетиками?
2. Для каких целей применяют ферромагнитные материалы?
3. Как осуществляется запись информации в ЭВМ?

ЕГЭ

Повторите материал главы 1 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте их определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Магнитные свойства вещества»

1. Устройство памяти ЭВМ с магнитной записью.
2. Переменное и постоянное магнитные поля Земли.
3. Использование знаний магнитных свойств веществ для геологической разведки.
4. Классификация веществ по магнитным свойствам.

«Исследование магнитных свойств тел, изготовленных из разных материалов»

ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

До сих пор мы рассматривали электрические и магнитные поля, не изменяющиеся с течением времени. Было выяснено, что электростатическое поле создаётся неподвижными заряженными частицами, а магнитное поле — движущимися, т. е. электрическим током. Теперь познакомимся с *электрическими и магнитными полями, которые изменяются со временем.*

§ 7 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Электрический ток вызывает появление магнитного поля. Может ли магнитное поле вызывать направленное движение электрических зарядов?

В 1821 г. М. Фарадей записал в своём дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». Через 10 лет эта задача была им решена.

Электрический ток, рассуждал М. Фарадей, способен намагнитить кусок железа. Не может ли магнит, в свою очередь, вызвать появление электрического тока? Долгое время эту связь обнаружить не удавалось. Трудно было додуматься до главного, а именно: движущийся магнит, или меняющееся во времени магнитное поле, может возбудить электрический ток в катушке.

Интересно

М. Фарадей был уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. Благодаря этому он и сделал открытие, ставшее основой для разработки генераторов всех электростанций мира, превращающих механическую энергию в энергию электрического тока.

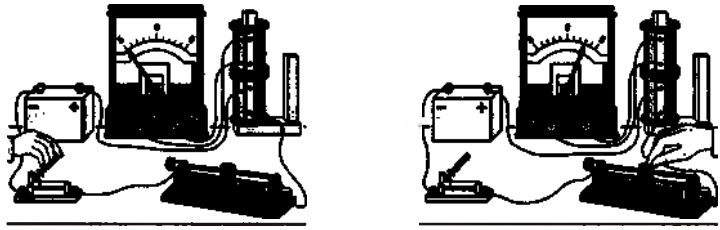
Интересно

Почти одновременно с Фарадеем получить электрический ток в катушке с помощью магнита пытался швейцарский физик Колладон. В ходе работы он пользовался гальванометром, лёгкая магнитная стрелка которого помещалась внутри катушки прибора. Чтобы магнит не оказывал непосредственного влияния на стрелку, концы катушки, куда Колладон вдвигал магнит, надеясь получить в ней ток, были выведены в соседнюю комнату и там присоединены к гальванометру. Вставив магнит в катушку, Колладон шёл в соседнюю комнату и с огорчением убеждался, что гальванометр не показывает тока. Стоило бы ему всё время наблюдать за гальванометром, а кого-нибудь попросить заняться магнитом, замечательное открытие было бы сделано. Но этого не случилось. Покоящийся относительно катушки магнит не вызывает в ней тока.

Запомни

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром, меняется со временем.

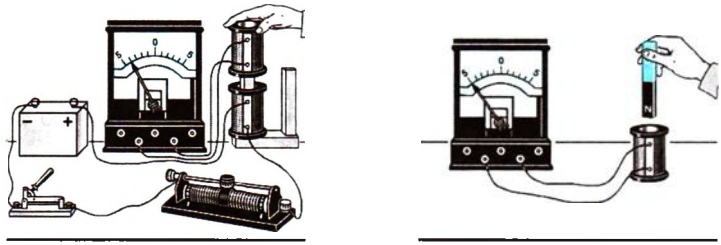
Это явление было открыто 29 августа 1831 г. Редкий случай, когда дата нового замечательного открытия известна так точно!



а) б)

Рис. 2.1

В течение одного месяца Фарадей, проведя множество опытов, установил все главные особенности явления электромагнитной индукции. В настоящее время опыты Фарадея может повторить каждый. Для этого надо иметь две катушки, магнит, батарею элементов и достаточно чувствительный гальванометр.



а) б)

Рис. 2.2

В установке, изображённой на рисунке 2.1, *а*, индукционный ток возникает в одной из катушек в момент замыкания или размыкания электрической цепи другой катушки, неподвижной относительно первой. В других опытах индукционный ток возникает при изменении силы тока в одной из катушек с помощью реостата (рис. 2.1, *б*), при движении катушек относительно друг друга (рис. 2.2, *а*), при движении постоянного магнита относительно катушки (рис. 2.2, *б*).

Уже сам Фарадей заметил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в опытах, которые поставлены по-разному.

Важно В замкнутом проводящем контуре возникает ток при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром.

Предположите, в каком случае при движении рамки в магнитном поле индукционный ток наблюдаться не будет.

И чем быстрее происходит это изменение, тем больше сила возникающего индукционного тока. При этом причина изменения числа линий магнитной индукции

несущественна. Это может быть и изменение числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную неподвижным проводящим контуром, или движение этого контура в неоднородном магнитном поле, густота линий которого меняется в пространстве (рис. 2.3).

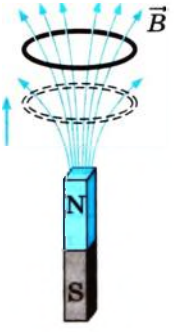


Рис. 2.3

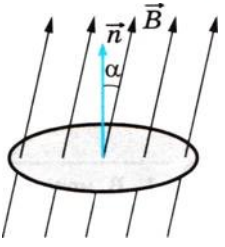


Рис. 2.4

Магнитный поток. Для того чтобы дать точную количественную формулировку закона электромагнитной индукции Фарадея, нужно ввести новую величину — *поток вектора магнитной индукции*.

Для этого рассмотрим плоский замкнутый проводник (контур), ограничивающий поверхность площадью S и помещённый в однородное магнитное поле (рис. 2.4). Нормаль $\vec{n}$ (вектор, модуль которого равен единице) к плоскости проводника составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$.

Интересно

Величина Ф названа магнитным потоком по аналогии с потоком воды, который тем больше, чем больше скорость течения воды и площадь сечения трубы.

Запомни

Магнитный поток Ф (поток вектора магнитной индукции) через поверхность площадью S — это величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на площадь S и косинус угла α между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$:

$$\Phi = BS\cos\alpha. \qquad (2.1)$$

Произведение $B\cos\alpha = B_n$ представляет собой проекцию вектора магнитной индукции на нормаль $\vec{n}$ к плоскости контура. Поэтому

$$\Phi = B_n S. \qquad (2.2)$$

Магнитный поток тем больше, чем больше B_n и S.

Магнитный поток графически можно истолковать как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S.

Единицей магнитного потока является *вебер*.

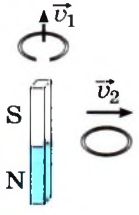
Важно

Магнитный поток в 1 вебер (1 Вб) создаётся однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2, расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

1. В чём главное отличие переменных электрических и магнитных полей от постоянных?
2. В чём заключается явление электромагнитной индукции?
3. Как должен двигаться замкнутый проводящий контур в однородном магнитном поле, не зависящем от времени: поступательно или вращательно, чтобы в нём возник индукционный ток?
4. Дайте определение потока вектора магнитной индукции.

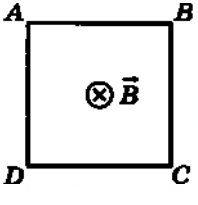
1. В металлическое кольцо в течение первых двух секунд вдвигают магнит, в течение следующих двух секунд магнит оставляют неподвижным внутри кольца, в течение последующих двух секунд его вынимают из кольца. В какие промежутки времени в катушке идёт индукционный ток?
1) 0—6 с 2) 0—2 с и 4—6 с 3) 2—4 с 4) только 0—2 с

2. Какой процесс можно объяснить на основе явления электромагнитной индукции?
1) отклонение магнитной стрелки вблизи проводника с током
2) взаимодействие двух проводов с током
3) появление тока в замкнутой катушке при помещении в неё постоянного магнита
4) возникновение силы, действующей на проводник с током в магнитном поле



3. Одно проводящее кольцо с разрезом поднимают из начального положения вверх над полосовым магнитом (см. рис.), а другое сплошное проводящее кольцо из начального положения смещают вправо. При этом индукционный ток
1) идёт только в первом кольце
2) идёт только во втором кольце
3) идёт и в первом, и во втором кольце
4) не идёт ни в первом, ни во втором кольце

4. Магнитный поток, пронизывающий поверхность, ограниченную кольцом, в однородном поле, НЕЛЬЗЯ изменить
1) вытянув кольцо в овал
2) смяв кольцо
3) повернув кольцо вокруг оси, перпендикулярной плоскости кольца
4) повернув кольцо вокруг оси, проходящей в плоскости кольца



5. Контур $ABCD$ находится в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости чертежа от наблюдателя (см. рис., вид сверху). Магнитный поток через контур будет изменяться, если контур
1) движется в направлении от наблюдателя
2) движется по направлению к наблюдателю
3) поворачивается вокруг стороны AB
4) движется в плоскости рисунка

6. Поток вектора магнитной индукции через поверхность, ограниченную рамкой, площадь которой равна 0,02 м^2, а плоскость расположена под углом 60° к вектору $\vec{B}$, при B = 0,05 Тл равен
1) 0,87 мВб 2) 0,5 мВб 3) 1,25 мВб 4) 2,2 мВб

§ 8 ПРАВИЛО ЛЕНЦА. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Каковы условия существования электрического тока?
Существует ли в индукционной катушке электрическое поле?
От чего зависит сила индукционного тока?

Направление индукционного тока. Рассмотрим следующий опыт. Возьмём катушку и присоединим её к гальванометру. Если магнит приближать к катушке, то стрелка гальванометра отклоняется, в ней появляется индукционный ток такого направления, при котором магнит отталкивается.

При удалении магнита, наоборот, в катушке возникает ток такого направления, при котором магнит притягивается.

В чём состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 2.5, *а*), а во втором случае уменьшается (рис. 2.5, *б*). Причём в первом случае линии индукции $\vec{B}$ магнитного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 2.5 изображены чёрным цветом.

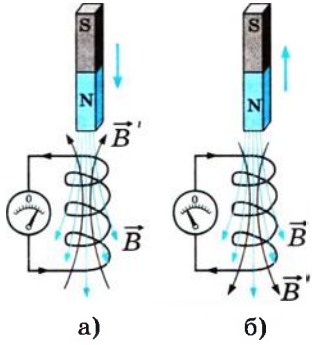


Рис. 2.5

Аналогичные выводы можно сделать с помощью опыта, показанного на рисунке 2.6. На концах стержня, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом. Если поднести магнит к кольцу без разреза, то в нём возникнет индукционный ток и направлен он будет так, что это кольцо оттолкнётся от магнита и стержень повернётся. Если удалять магнит от кольца, то оно, наоборот, притянется к магниту. С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока.



Рис. 2.6

Магнитное поле, созданное возникшим в катушке индукционным током, аналогично магнитному полю полосового магнита. Определите, какие полюсы возникают у катушки (см. рис. 2.5) в указанных двух случаях.

Обсудите с одноклассниками, можно ли для опыта вместо алюминиевых взять железные кольца. Как в этом случае изменятся результаты эксперимента? Почему одно из колец взяли с разрезом?

Отталкивает или притягивает катушка магнит, зависит от направления индукционного тока в ней.

Важно При увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле с индукцией $\vec{B}'$ препятствует усилению магнитного потока через витки катушки.

Если же магнитный поток ослабевает, то индукционный ток создаёт магнитное поле с индукцией $\vec{B}'$, увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

Направление индукционного тока определяется по правилу, которое было установлено русским физиком Э. Х. Ленцем.

Правило Ленца Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.

Более кратко это правило можно сформулировать следующим образом:

Важно Индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

1. Определить направление линий магнитной индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля.

2. Выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$).

3. Установить направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции $\vec{B}$ при $\Delta\Phi > 0$ и иметь одинаковое с ними направление при $\Delta\Phi < 0$.

4. Зная направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$, найти направление индукционного тока, пользуясь правилом буравчика.

Закон электромагнитной индукции. Магнитный поток, как мы знаем, можно графически представить как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S. Чем больше индукция магнитного поля, тем большее число линий магнитной индукции пронизывает эту поверхность. Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время Δt магнитный поток меняется на $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так:

Важно Сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2.3)$$

Запомни Причиной возникновения индукционного тока в цепи является ЭДС, называемая **ЭДС индукции.**

Обозначают её буквой $\mathscr{E}_i$.

Согласно закону Ома для замкнутой цепи $I_i = \frac{\mathscr{E}_i}{R}$. Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока. Следовательно, соотношение (2.3) справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционного тока, так как сила тока зависит и от свойств проводника, а ЭДС определяется только изменением магнитного потока.

Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathscr{E}_i = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|.$$

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?

На рисунке 2.7 изображён замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль $\vec{n}$ к контуру образует правый винт с направлением обхода.

Пусть магнитная индукция $\vec{B}$ внешнего магнитного поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда $\Phi > 0$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$. Согласно правилу Ленца индукционный ток создаёт магнитный поток $\Phi' < 0$. Вектор индукции $\vec{B}'$ поля, созданного индукционным током, в центре кольца направлен в сторону, противоположную векторам $\vec{B}$ и $\vec{n}$ (см. рис. 2.7). Следовательно, индукционный ток

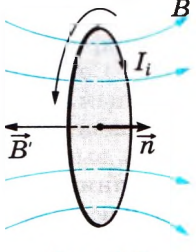


Рис. 2.7

Какова природа сторонних сил, вызывающих направленное движение зарядов в контуре? Чем отличается поле, вызывающее движение зарядов в контуре, от изученного нами электростатического поля?

согласно правилу буравчика направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в формуле для закона электромагнитной индукции должен стоять знак «–», **указывающий на то, что $\mathscr{E}_i$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ имеют разные знаки:**

$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2.4)$$

Вспомните одно из основных свойств электростатического поля — поля, созданного неподвижными зарядами.

Отметим, что линии напряжённости поля, вызывающего движение зарядов, в этом случае замкнуты, направление напряжённости изменяется. Такое поле называется *вихревым* (подробно о вихревом поле мы поговорим в § 35). Работа по перемещению заряда по замкнутому контуру в вихревом поле не равна нулю.

Индукционные токи в массивных проводниках. Особенно большого числового значения индукционные токи достигают в массивных проводниках из-за того, что их сопротивление мало.

Такие токи, называемые *токами Фуко* по имени исследовавшего их французского физика, можно использовать для нагревания проводников. На этом принципе основано устройство индукционных печей, например используемых в быту СВЧ-печей. Также этот принцип используется для плавки металлов. Кроме этого, явление электромагнитной индукции используется в детекторах металла, устанавливаемых при входах в здания аэровокзалов, театров и т. д.

Однако во многих устройствах возникновение токов Фуко приводит к бесполезным и даже нежелательным потерям энергии на выделение тепла. Поэтому железные сердечники трансформаторов, электродвигателей, генераторов и т. д. делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Поверхности пластин должны быть перпендикулярны направлению вектора напряжённости вихревого электрического поля. Сопротивление электрическому току пластин будет при этом максимальным, а выделение тепла — минимальным.

Применение ферритов. Радиоэлектронная аппаратура работает в области очень высоких частот (миллионы колебаний в секунду). Здесь применение сердечников катушек из отдельных пластин уже не даёт нужного эффекта, так как большие токи Фуко возникают в каждой пластине.

В § 6 отмечалось, что существуют магнитные изоляторы — ферриты. При перемагничивании в ферритах не возникают вихревые токи. В результате потери энергии на выделение в них тепла сводятся к минимуму. Поэтому из ферритов делают сердечники высокочастотных трансформаторов, магнитные антенны транзисторов и др. Ферритовые сердечники изготовляют из смеси порошков исходных веществ. Смесь прессуется и подвергается сильной термической обработке.

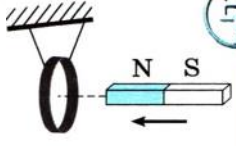
При быстром изменении магнитного поля в обычном ферромагнетике возникают индукционные токи, магнитное поле которых в соответствии

с правилом Ленца препятствует изменению магнитного потока в сердечнике катушки. Из-за этого поток магнитной индукции практически не меняется и сердечник не перемагничивается. В ферритах вихревые токи очень малы, поэтому их можно быстро перемагничивать.

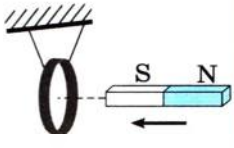
Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции Найти

1. Как определяется направление индукционного тока?
2. Возникает ли в кольце с разрезом электрическое поле, если подносить к нему магнит?
3. Почему закон электромагнитной индукции формулируется для ЭДС, а не для силы тока?
4. Как формулируется закон электромагнитной индукции?
5. Почему в формуле для закона электромагнитной индукции стоит знак «−»?

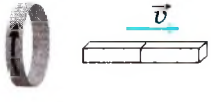
1. Постоянный магнит вводят в замкнутое алюминиевое кольцо (см. рис.). Первый раз — северным полюсом, второй раз — южным полюсом. При этом



1) в обоих опытах кольцо отталкивается от магнита
2) в обоих опытах кольцо притягивается к магниту
3) в первом опыте кольцо отталкивается от магнита, во втором притягивается к магниту
4) в первом опыте кольцо притягивается к магниту, во втором отталкивается от магнита

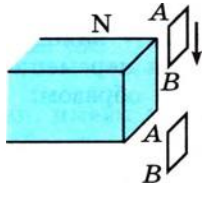


2. Магнит выводят из кольца, и в нём возникает индукционный ток, направление которого показано на рисунке. Какой полюс магнита ближе к кольцу?



1) северный
2) южный
3) отрицательный
4) положительный

3. Вблизи северного полюса магнита падает медная рамка. При прохождении верхнего и нижнего положений рамки (см. рис.) индукционный ток в стороне AB рамки



1) равен нулю в обоих положениях
2) направлен вверх в обоих положениях
3) направлен вниз в обоих положениях
4) направлен вверх и вниз соответственно

4. За 5 с магнитный поток, пронизывающий проволочную рамку, увеличился от 3 до 8 Вб. Чему равно при этом значение ЭДС индукции в рамке?

1) 0,6 В
2) 1 В
3) 1,6 В
4) 25 В

5. В магнитном поле находится несколько витков провода, замкнутого на резистор. Если магнитный поток равномерно увеличить от нуля до значения Φ_0 сначала за время t, а потом за время $4t$, то сила тока в резисторе во втором случае будет

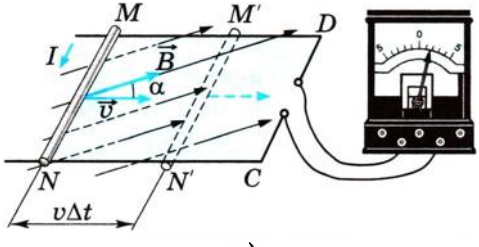
1) в 4 раза больше
2) в 4 раза меньше
3) в 2 раза больше
4) в 2 раза меньше

§ 9 ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ

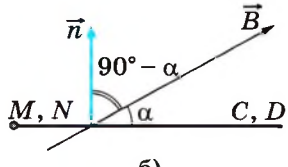
Какая сила действует на движущийся заряд в магнитном поле? Возникнет ли ЭДС индукции, если контур не замкнут?

Рассмотрим теперь второй случай возникновения индукционного тока.

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Она-то и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет магнитное происхождение.



а)



б)

Рис. 2.8

Вычислим ЭДС индукции, возникающую в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле (рис. 2.8, *а*). Пусть сторона контура MN длиной l скользит с постоянной скоростью $\vec{v}$ вдоль сторон NC и MD, оставаясь всё время параллельной стороне CD. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ однородного поля перпендикулярен проводнику и составляет угол α с направлением его скорости.

Магнитный поток через контур $MNCD$ равен:

$$\Phi = BS\cos(90^\circ - \alpha) = BS\sin\alpha,$$

где угол $(90^\circ - \alpha)$ есть угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью $\vec{n}$ к поверхности контура (рис. 2.8 *б*, вид сбоку), а S — площадь, ограниченная контуром $MNCD$. Если считать, что в начальный момент времени ($t = 0$) проводник MN находится на расстоянии NC от проводника CD (см. рис. 2.8, *а*), то при перемещении проводника площадь S изменяется со временем следующим образом:

$$S = l(NC - vt).$$

За время Δt площадь контура меняется на $\Delta S = -lv\Delta t$. Знак «−» указывает на то, что она уменьшается. Изменение магнитного потока за это время равно:

$$\Delta\Phi = -Blv\,\Delta t\sin\alpha.$$

Следовательно,

$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv\sin\alpha.$$

Будет ли сила индукционного тока, равная $\mathscr{E}_i/R$, оставаться постоянной при движении проводника?

Если весь контур $MNCD$ движется в однородном магнитном поле, сохраняя свою ориентацию по отношению к вектору $\vec{B}$, то ЭДС индукции в контуре будет равна нулю,

так как поток Ф через поверхность, ограниченную контуром, не меняется. Объяснить это можно так. При движении контура в проводниках *MN* и *DC* возникают ЭДС индукции, вызывающие токи в одном направлении от *M* к *N* и от *D* к *C*. Суммарный ток в контуре равен нулю.

ЭДС индукции возникает также при повороте рамки в магнитном поле, т. е. при изменении со временем угла α (см. § 21).

Почему при повороте рамки изменяется магнитный поток, если поле и площадь рамки постоянны?

Электродинамический микрофон.

В главе 1 вы ознакомились с электродинамическим громкоговорителем, преобразующим колебания электрического тока в звуковые колебания. Обратный процесс превращения звуковых колебаний воздуха в колебания электрического тока осуществляется с помощью микрофона.

Микрофоны широко применяются в радиовещании, телевидении, системах усиления звука и звукозаписи, для телефонной связи.

Принцип действия одного из самых распространённых микрофонов — электродинамического — основан на явлении электромагнитной индукции. Этот микрофон устроен следующим образом. Диафрагма *2* из тонкой полистирольной плёнки или алюминиевой фольги жёстко соединена со звуковой катушкой *1* из тонкой проволоки (рис. 2.9). Внутри катушки находится постоянный магнит *3*. Линии магнитной индукции перпендикулярны виткам катушки.

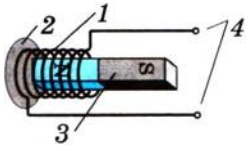


Рис. 2.9

Звуковая волна вызывает колебания диафрагмы и соединённой с ней катушки. При движении витков катушки в магнитном поле в них возникает переменная ЭДС индукции. В результате на зажимах *4* катушки появляется переменное напряжение, вызывающее колебания электрического тока в цепи микрофона. Эти колебания после усиления могут быть поданы на громкоговоритель, записаны на магнитной ленте и т. д.

ИНТЕРЕСНО

В громкоговорителе сила Ампера вызывает колебания катушки и соединённой с ней диафрагмы. В микрофоне колебания диафрагмы передаются подвижной катушке, и в ней возникает индукционный ток.

Электродинамические микрофоны просты по конструкции, имеют небольшие габариты и надёжны в эксплуатации. Искажения преобразуемых колебаний в интервале частот от 50 до 10 000 Гц невелики.

В старых телефонных аппаратах применялись относительно дешёвые угольные микрофоны. Диафрагма в таких микрофонах действовала на угольный порошок и создавала в нём периодические сжатия и разрежения... От этого менялись сопротивление порошка и сила тока в электрической цепи микрофона. Существуют и другие типы микрофонов, например электретный. *Электреты* — это материалы, обладающие способностью достаточно долго сохранять заряды. Если одну из пластин конденсатора (рис. 2.10) соединить с диафрагмой микрофона, то при колебаниях диафрагмы будет изменяться напряжение на конденсаторе с частотой звуковой волны.

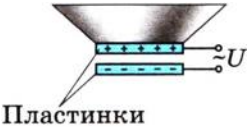


Рис. 2.10

ЭДС индукции. Микрофон. Громкоговоритель

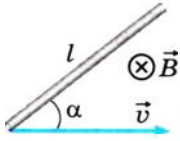
Найти

1. Чему равна сила Лоренца, действующая на свободные электроны проводника, и как она направлена?
2. От чего зависит ЭДС индукции, возникающая в проводнике, который движется в переменном во времени магнитном поле?
3. Можно ли использовать в качестве чувствительного элемента микрофона одну из обкладок конденсатора, колеблющуюся под действием звуковой волны?

1. При движении проводника в магнитном поле между его концами возникает разность потенциалов
1) если проводник движется параллельно линиям магнитной индукции
2) если проводник движется с большой скоростью
3) если при движении он пересекает линии магнитной индукции
4) если магнитное поле неоднородно

2. При движении проводника в однородном магнитном поле в проводнике возникает ЭДС индукции $\mathscr{E}_{i1}$. При уменьшении скорости движения проводника в 2 раза ЭДС индукции $\mathscr{E}_{i2}$ будет равна
1) $2\mathscr{E}_{i1}$ 2) $\mathscr{E}_{i1}$ 3) $0{,}5\mathscr{E}_{i1}$ 4) $0{,}25\mathscr{E}_{i1}$

3. Проводник длиной 1 м вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 2$ Тл вокруг оси, проходящей через один из его концов, с угловой скоростью 2 рад/с перпендикулярно линиям магнитной индукции. Разность потенциалов между концами проводника равна
1) 6,28 В 2) 4 В 3) 2 В 4) 3,14 В



4. Проводящий стержень (см. рис., вид сверху) длиной 20 см движется поступательно в однородном магнитном поле со скоростью 1 м/с. Угол $\alpha = 30°$. ЭДС индукции в стержне равна 0,05 В. Индукция магнитного поля равна
1) 0,25 Тл 3) 0,75 Тл
2) 0,5 Тл 4) 1 Тл

5. Квадратная проволочная рамка со стороной a и сопротивлением R движется со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле индукцией $\vec{B}$. Сила тока, идущего по рамке, равна
1) Bva/R 2) $2Bva/R$ 3) 0 4) $4Bva/R$

§ 10 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ»

Прежде чем решать задачу, надо понять причину, вызывающую появление в проводнике электрического тока или разности потенциалов. Это может быть: 1) изменение во времени вектора индукции однородного магнитного поля; 2) изменение площади, ограниченной контуром; 3) изменение угла между нормалью к поверхности рамки и вектором магнитной индукции.

Необходимо также правильно согласно правилу Ленца определить направление индукционного тока.

Задача 1. Проволочный виток радиусом $r = 5$ см находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого направлен под углом $\alpha = 30°$ к плоскости витка (рис. 2.11). Удельное сопротивление проволоки $\rho = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, её диаметр $d = 2$ мм. Индукция магнитного поля изменяется по закону $B = B_0(1 - kt)$, где $k = 0{,}04$ с$^{-1}$, $B_0 = 3$ Тл. Определите силу и направление тока, идущего по витку. Будет ли направление тока оставаться постоянным?

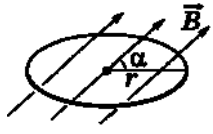


Рис. 2.11

Р е ш е н и е. Магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, будет непрерывно изменяться со временем, следовательно, вследствие явления электромагнитной индукции по витку будет идти ток.

ЭДС индукции $|\mathscr{E}_i| = |\Delta\Phi/\Delta t|$.

Магнитный поток через поверхность, ограниченную витком, определим по формуле $\Phi = BS\sin\alpha = B_0(1 - 0{,}04t)\pi r^2 \sin\alpha$. Тогда $\mathscr{E}_i = 0{,}04B_0\pi r^2 \sin\alpha$.

Сопротивление витка $R = \rho\dfrac{2\pi r}{\pi d^2/4} = \rho\dfrac{8r}{d^2}$.

Сила тока в витке согласно закону Ома

$$I = \frac{\mathscr{E}_i}{R} = \frac{0{,}04B_0\,\pi r^2 \sin\alpha}{\rho\dfrac{8r}{d^2}} = \frac{0{,}04B_0\,\pi r d^2 \sin\alpha}{8\rho} \approx 0{,}19 \text{ А}.$$

Направление индукционного тока определим по правилу Ленца. Магнитный поток уменьшается, следовательно, индукционный ток должен быть направлен так, чтобы индукция магнитного поля, которое он создаёт, была направлена в ту же сторону, что и нормальная составляющая индукции внешнего магнитного поля. Воспользуемся правилом правого винта и увидим, что ток идёт против часовой стрелки.

В момент времени, равный 25 с, направление поля должно измениться на противоположное. Начиная с этого момента индукция магнитного поля увеличивается по модулю. Следовательно, согласно правилу Ленца индукция магнитного поля, созданного индукционным током, должна быть направлена в сторону, противоположную нормальной составляющей вектора $\vec{B}$, таким образом, направление индукционного тока не меняется.

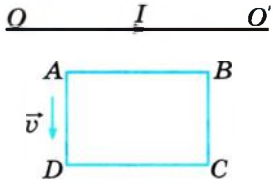


Рис. 2.12

Задача 2. Прямоугольный контур $ABCD$ перемещается поступательно в магнитном поле тока, идущего по прямолинейному длинному проводнику (рис. 2.12). Определите направление тока, индуцированного в контуре, если контур удаляется от провода. Какие силы действуют на контур?

Р е ш е н и е. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ магнитного поля тока I в области расположения контура направлен перпендикулярно плоскости контура от нас. При удалении контура от провода магнитный поток через площадку, ограниченную контуром $ABCD$, убывает ($\Delta\Phi < 0$). Следовательно, вектор магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля тока I_i согласно правилу Ленца направлен от нас, как и вектор $\vec{B}$. Применяя правило буравчика, находим, что индукционный ток в контуре направлен по часовой стрелке.

Взаимодействие тока в контуре с прямолинейным током приводит к появлению сил, действующих на проводники контура. Применив правило левой руки, можно выяснить, что эти силы, во-первых, растягивают рамку, стремясь увеличить площадь контура, и, во-вторых, создают результирующую силу, направленную к прямолинейному проводнику. Оба действия будут препятствовать уменьшению магнитного потока через площадь контура.

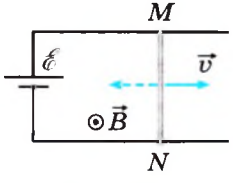


Рис. 2.13

Задача 3. Проводник MN (рис. 2.13) длиной $l = 0{,}4$ м и сопротивлением $R = 4$ Ом лежит на двух горизонтальных проводниках, замкнутых на источник тока, ЭДС которого $\mathscr{E} = 2$ В. Проводники находятся в вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}2$ Тл. Определите силу тока в проводнике, если он движется равномерно со скоростью $v = 5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$: а) вправо; б) влево. Сопротивлением проводников, по которым скользит проводник MN, можно пренебречь.

Р е ш е н и е. При равномерном перемещении проводника изменяется магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, и, следовательно, возникает ЭДС индукции, которая равна $|\mathscr{E}_i| = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|$.

а) При движении проводника вправо магнитный поток через контур увеличивается, индукционный ток направлен так, чтобы согласно правилу Ленца компенсировать причину, его вызывавшую. В данном случае индукционный ток направлен по часовой стрелке, отсюда ЭДС индукции уменьшает силу тока, создаваемого источником. Изменение магнитного потока при движении проводника $\Delta\Phi = Bl\Delta x$, где $\Delta x = v\Delta t$, откуда

$$|\mathscr{E}_i| = Bl\left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| = Blv.$$

По закону Ома для полной цепи $I_1 = \frac{\mathscr{E} - Blv}{R} = 0{,}4$ А.

б) При движении проводника влево магнитный поток уменьшается, индукционный ток, поддерживающий магнитный поток, будет направлен против часовой стрелки, ЭДС индукции вызывает ток того же направления, что и $\mathscr{E}$. Отсюда $I_2 = \dfrac{\mathscr{E} + Blv}{R} = 0{,}6$ А.

Задача 4. Проволочную катушку, насчитывающую 1000 витков, помещают в однородное магнитное поле так, что линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости витков. Катушка подсоединена к гальванометру. Затем катушку удаляют из поля, при этом по цепи катушки проходит заряд 10^{-3} Кл. Определите индукцию магнитного поля, если площадь витка 10^{-3} м^2, а полное сопротивление цепи катушки 2 Ом.

Р е ш е н и е. Магнитный поток через катушку изменяется за время t от $\Phi = NBS$ до нуля. Изменение магнитного потока $\Delta\Phi = NBS$.

В катушке индуцируется ЭДС. Значения ЭДС в разные моменты времени могут быть различными. По закону электромагнитной индукции ЭДС в некоторый момент времени определяется по формуле

$$\mathscr{E}_i = \frac{\Delta\Phi_k}{\Delta t_k},$$

где $\Delta\Phi_k$ — изменение магнитного потока за малый промежуток времени Δt_k. Изменение магнитного потока за это время $\Delta\Phi_k = \mathscr{E}_i \Delta t_k$.

Согласно закону Ома ЭДС равна $\mathscr{E}_i = I_k R$, откуда изменение магнитного потока за время Δt_k равно $\Delta\Phi_k = I_k R \Delta t_k$.

Заряд, прошедший по проводнику, $\Delta q_k = I_k \Delta t_k$.

Полное изменение магнитного потока $\Delta\Phi = \sum\limits_k q_k R = qR$.

Окончательно заряд, прошедший через поперечное сечение проводника при изменении магнитного потока на $\Delta\Phi$, равен:

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{NBS}{R}, \text{ откуда } B = \frac{qR}{NS} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите направление индукционного тока в сплошном кольце, к которому подносят магнит (см. рис. 2.6).

2. Сила тока в проводнике OO' (см. рис. 2.12) убывает. Определите направление индукционного тока в неподвижном контуре $ABCD$ и направления сил, действующих на каждую из сторон контура.

3. Металлическое кольцо может свободно двигаться по сердечнику катушки, включённой в цепь постоянного тока (рис. 2.14). Что будет происходить в моменты замыкания и размыкания цепи?

4. Магнитный поток через контур проводника сопротивлением $3 \cdot 10^{-2}$ Ом за 2 с изменился на $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Вб. Определите силу тока в проводнике, если изменение потока происходило равномерно.

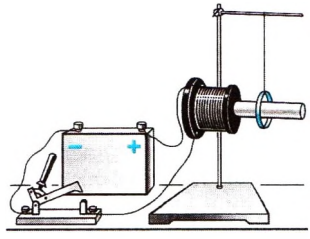


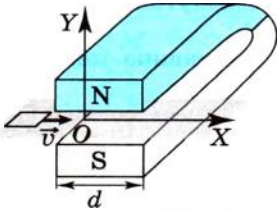
Рис. 2.14

5. Самолёт летит горизонтально со скоростью 900 км/ч. Определите разность потенциалов между концами его крыльев, если модуль вертикальной составляющей магнитной индукции земного магнитного поля $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, а размах крыльев 12 м.

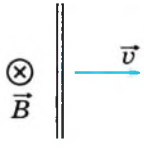
6. В однородном магнитном поле, индукция которого $\vec{B}$, находится замкнутый проводник в виде окружности радиусом r, причём плоскость, которой принадлежит виток, перпендикулярна вектору $\vec{B}$. Какой заряд пройдёт по проводнику, если в магнитном поле проводник деформировать, превратив его в квадрат? Сопротивление проводника R.

1. Плоская горизонтальная фигура площадью $S = 0{,}1$ м^2, ограниченная проводящим контуром, сопротивление которого $R = 5$ Ом, находится в однородном магнитном поле. Какой заряд проходит по контуру за большой промежуток времени, пока проекция магнитной индукции на вертикаль Z равномерно меняется от $B_{1z} = 2$ Тл до $B_{2z} = -2$ Тл?

2. Медное кольцо из провода диаметром 2 мм расположено в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого меняется по модулю со скоростью 1,09 Тл/с. Плоскость кольца перпендикулярна вектору магнитной индукции. Чему равен диаметр кольца, если сила индукционного тока, возникающего в нём, равна 10 А? Удельное сопротивление меди $\rho = 1{,}72 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.



3. Квадратная рамка со стороной $b = 5$ см изготовлена из медной проволоки сопротивлением $R = 0{,}1$ Ом. Рамку перемещают по гладкой горизонтальной поверхности с постоянной скоростью υ вдоль оси OX (см. рис.). За время движения рамка проходит между полюсами магнита и вновь оказывается в области, где магнитное поле отсутствует. Индукционные токи, возникающие в рамке, оказывают тормозящее действие, поэтому для поддержания постоянной скорости движения к ней прикладывают внешнюю силу $\vec{F}$, направленную вдоль оси OX. С какой скоростью движется рамка, если суммарная работа внешней силы за время движения $A = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ Дж? Ширина полюсов магнита $d = 20$ см. Считайте, что магнитное поле имеет резкую границу, однородно между полюсами, а его индукция $B = 1$ Тл.



4. Горизонтально расположенный проводник (см. рис.) длиной 1 м движется равноускоренно в вертикальном однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,5 Тл и направлена перпендикулярно проводнику и скорости его движения. При начальной скорости проводника, равной нулю, проводник переместился на 1 м. ЭДС индукции на концах проводника в конце движения равна 2 В. Чему равно ускорение проводника?

§ 11 ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При каких условиях возникает явление электромагнитной индукции?
Обязательно ли наличие переменного электрического поля?
Какими способами можно создать переменное магнитное поле?

Самоиндукция. Если по катушке идёт переменный ток, то магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется. Поэтому в том же самом проводнике, по которому идёт переменный ток, возникает ЭДС индукции.

Запомни **Самоиндукцией** называют явление возникновения ЭДС индукции в самом проводнике, по которому идёт переменный ток. Эта ЭДС называется **ЭДС самоиндукции** $\mathscr{E}_{si}$.

По правилу Ленца в момент нарастания тока ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_{si}$ и соответственно электрическое поле препятствуют нарастанию тока. Наоборот, в момент уменьшения тока возникающее поле поддерживает его.

Индуктивность. Модуль вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля, создаваемого током, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток Ф пропорционален B, то $\Phi \sim B \sim I$.

Можно, следовательно, утверждать, что

$$\Phi = LI, \qquad (2.5)$$

где L — коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и магнитным потоком.

Как вы думаете, почему данное явление называют явлением самоиндукции?

Запомни Величину L называют **индуктивностью контура** или его **коэффициентом самоиндукции**.

Используя закон электромагнитной индукции и выражение (2.5), получаем равенство

$$\mathscr{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \qquad (2.6)$$

если считать, что форма контура остаётся неизменной и поток меняется только за счёт изменения силы тока.

Обсудите с одноклассниками, как можно было бы определить индуктивность проводника опытным путём. Какие для этого вам понадобились бы приборы?

Интересно Так как поток Ф, определяемый формулой (2.5), существует только тогда, когда по контуру идёт ток, то говорят, что это *поток, сцеплённый с контуром*.

Запомни Из формулы (2.6) следует, что **индуктивность** — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока в нём на 1 А за 1 с.

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

Очевидно, что индуктивность одного проволочного витка меньше, чем у катушки (соленоида), состоящей из N таких же витков, так как магнитный поток катушки увеличивается в N раз.

Единицу индуктивности в СИ называют *генри* (обозначается Гн).

Важно Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нём при равномерном изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В:

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

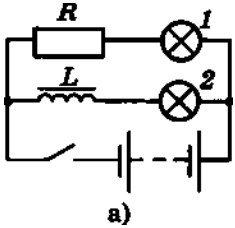
Как зависит индуктивность катушки с плотно намотанными витками от площади её витков и от её длины?

Явление самоиндукции можно наблюдать в простых опытах. На рисунке 2.15, *а* показана схема параллельного соединения двух одинаковых ламп. Одну из них подключают к источнику через резистор R, а другую — последовательно с катушкой L, снабжённой железным сердечником.

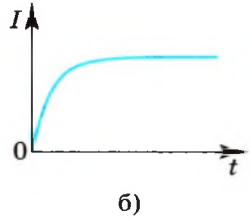
При замыкании ключа первая лампа вспыхивает практически сразу, а вторая — с заметным запозданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения (рис. 2.15, *б*).

Подумайте, какую роль в цепи (см. рис. 2.15, *а*) выполняет катушка.

Появление ЭДС самоиндукции при размыкании можно наблюдать в опыте с цепью, схематически показанной на рисунке 2.16. При размыкании ключа в катушке L возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате в момент размыкания через гальванометр идёт ток (цветная стрелка), направленный против начального тока до размыкания



а)



б)

Рис. 2.15

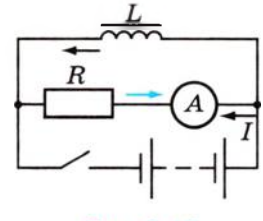


Рис. 2.16

(чёрная стрелка). Сила тока при размыкании цепи может превышать силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе. Это означает, что ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_{si}$ больше ЭДС $\mathscr{E}$ батареи элементов.

Обсудите с одноклассниками, можно ли считать явления инерции в механике и в электродинамике (в электрической цепи) явлениями одной физической природы.

Аналогия между самоиндукцией и инерцией. Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Так, инерция приводит к тому, что под действием силы тело не мгновенно приобретает определённую скорость, а постепенно. Тело нельзя мгновенно затормозить, как бы велика ни была тормозящая сила. Точно так же за счёт самоиндукции при замыкании цепи сила тока не сразу приобретает определённое значение, а нарастает постепенно. Выключая источник, мы не можем прекратить ток в цепи сразу. Самоиндукция поддерживает его некоторое время, несмотря на сопротивление цепи.

Энергия магнитного поля. При размыкании цепи ток убывает постепенно. В проводниках выделяется тепло, несмотря на то что источник тока работы не совершает. Иногда при размыкании цепи проскакивает мощная искра. Эти явления могут наблюдаться благодаря тому, что в контуре накапливается энергия — энергия магнитного поля.

Важно Энергия магнитного поля, созданного током, проходящим по участку цепи с индуктивностью L, определяется по формуле

$$W_м = \frac{LI^2}{2}. \qquad (2.7)$$

Вспомните формулу для расчёта энергии поля конденсатора.

Энергия магнитного поля выражена здесь через характеристику L проводника и силу тока I в нём. Но эту же энергию можно выразить и через характеристики поля. Вычисления показывают, что плотность энергии магнитного поля (т. е. энергия единицы объёма) пропорциональна квадрату магнитной индукции: $w_м \sim B^2$, подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля: $w_э \sim E^2$.

Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля тока

Найти

1. Дайте определение явления самоиндукции.
2. Что называют индуктивностью проводника?
3. Что принимают за единицу индуктивности в СИ?
4. Чему равна ЭДС самоиндукции?
5. Почему для создания тока источник должен затратить энергию?
6. Чему равна энергия магнитного поля?

§ 12 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «САМОИНДУКЦИЯ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ»

При решении задач на явление самоиндукции надо уметь различать магнитный поток, созданный внешним магнитным полем через поверхность, ограниченную контуром, и магнитный поток, сцеплённый с данным контуром. Этот магнитный поток вызывает ток, идущий по самому контуру.

Задача 1. Кольцо из сверхпроводника помещено в однородное магнитное поле, индукция которого нарастает от нуля до B_0. Плоскость кольца перпендикулярна линиям индукции поля. Определите силу индукционного тока, возникающего в кольце. Радиус кольца r, индуктивность L.

Решение. Так как сопротивление кольца равно нулю, то и суммарная электродвижущая сила в нём должна быть равна нулю. Иначе сила тока согласно закону Ома станет бесконечной. Следовательно, изменение магнитного потока внешнего магнитного поля равно по модулю и противоположно по знаку изменению магнитного потока, созданного индукционным током: $\Phi = L\Delta I$. Учитывая, что поток Φ нарастает от 0 до $\pi r^2 B_0$, а сила индукционного тока меняется при этом от 0 до I, получаем $\pi r^2 B_0 = LI$. Отсюда $I = \dfrac{\pi r^2 B_0}{L}$.

Задача 2. Катушка сопротивлением 50 Ом и индуктивностью 10^{-3} Гн находится в однородном магнитном поле. При равномерном изменении индукции магнитного поля за некоторый промежуток времени поток через катушку возрос на 10^{-3} Вб и сила тока увеличилась на 0,1 А. Определите заряд, прошедший по катушке за этот промежуток времени.

Решение. По условию задачи катушка помещена в переменное магнитное поле, следовательно, изменяется магнитный поток через поверхность, ограниченную витками катушки, и в ней возникает индукционный ток. Так как сила тока изменяется, то изменяется и магнитный поток, сцеплённый с контуром, и возникает ЭДС самоиндукции.

При возрастании магнитного потока через катушку в ней возникает ЭДС индукции $|\mathcal{E}_i| = \left|\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|$, вызывающая появление электрического тока. Ток в катушке изменяется, следовательно, одновременно появляется ЭДС самоиндукции $|\mathcal{E}_{si}| = \left|\dfrac{L\Delta I}{\Delta t}\right|$.

ЭДС самоиндукции вызывает ток, препятствующий изменению тока в катушке. Поэтому сила тока в катушке $I = \dfrac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} - \frac{L\Delta I}{\Delta t}}{R}$.

Заряд $q = I\Delta t = \dfrac{\Delta\Phi - L\Delta I}{R} = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ Кл.

Задача 3. Энергия магнитного поля катушки, по которой идёт постоянный ток, равна 3 Дж. Магнитный поток через катушку равен 0,5 Вб. Определите силу тока.

Р е ш е н и е. Магнитный поток, сцеплённый с катушкой, $\Phi = LI$, где L — индуктивность катушки. Энергия магнитного поля катушки, когда по ней идёт ток, $W = \frac{LI^2}{2}$. Тогда для силы тока получим $I = \frac{2W}{\Phi} = 12$ А.

Задача 4. В катушке без сердечника за время $\Delta t = 0{,}01$ с сила тока равномерно увеличивается от $I_1 = 1$ А до $I_2 = 2$ А. При этом в катушке возникает ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_{si} = 20$ В. Определите индуктивность катушки и изменение энергии магнитного поля.

Р е ш е н и е. При изменении силы тока в катушке со временем изменяется магнитный поток, сцеплённый с катушкой, и возникает ЭДС самоиндукции $|\mathscr{E}_{si}| = L\left|\frac{\Delta I}{\Delta t}\right|$. Из этой формулы найдём индуктивность катушки: $L = \frac{\mathscr{E}_{si}}{\Delta I/\Delta t} = 0{,}2$ Гн. Изменение энергии магнитного поля катушки

$$\Delta W_м = \frac{LI_2^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2} = \frac{L}{2}\Delta I(I_2 + I_1) = \frac{\mathscr{E}_{si}\Delta t}{2}(I_2 + I_1) = 0{,}3 \text{ Дж}.$$

Задача 5. К источнику с ЭДС $\mathscr{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением $r = 0{,}2$ Ом параллельно подключены резистор сопротивлением $R_1 = 8$ Ом и катушка индуктивностью $L = 0{,}4$ Гн и сопротивлением $R_2 = 2$ Ом. Определите количество теплоты, выделившейся в резисторе после отключения источника.

Р е ш е н и е. Когда источник отключён, ток продолжает идти по контуру через резистор R и катушку L вследствие явления самоиндукции. Энергия магнитного поля $W = \frac{LI_2^2}{2}$ перейдёт в тепло (Q_1 и Q_2), выделяющееся в резисторе $R1$ и катушке: $W = Q_1 + Q_2$.

Выделяющееся количество теплоты пропорционально сопротивлению, так как токи, идущие через катушку и резистор, равны. Следовательно, $Q_1 = kR_1$, $Q_2 = kR_2$.

Тогда $W = Q_1\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$, а $Q_1 = \frac{W}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{LR_1I_2^2}{2(R_1 + R_2)}$.

Силу тока I_2 найдём по закону Ома для полной цепи: $I = I_1 + I_2 = \frac{\mathscr{E}}{r + \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}}$ (резистор $R1$ и катушка сопротивлением R_2 включены параллельно). Так как силы токов обратно пропорциональны сопротивлениям, то $I_1R_1 = I_2R_2$, $I_1 = \frac{IR_2}{R_1 + R_2}$, $I_2 = \frac{IR_1}{R_1 + R_2}$.

Окончательно $Q_1 = \dfrac{L\mathscr{E}^2R_1^3}{2(r(R_1 + R_2) + R_1R_2)^2(R_1 + R_2)} = 1{,}14$ Дж.

Задачи для самостоятельного решения

1. Чему равны индуктивность и энергия магнитного поля соленоида, если при силе тока, равной 4 А, магнитный поток через соленоид равен 0,4 Вб?

2. Соленоид и резистор соединены параллельно и подключены к источнику тока. Определите количество теплоты, выделяющейся в резисторе сопротивлением R_0, при отключении источника. Индуктивность и сопротивление соленоида равны соответственно $L = 20$ Гн и $R = 10$ Ом, сопротивление резистора $R_0 = 40$ Ом, ЭДС источника $\mathscr{E} = 40$ В. Сопротивлением источника можно пренебречь.

3. Определите число витков соленоида индуктивностью 2,5 Гн, если сила тока в нём равна 5 А, а магнитный поток через площадь одного витка соленоида равен 0,005 Вб.

Повторите материал главы 2 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте их определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Магнитное поле»

1. Источники магнитного поля. Способы наблюдения магнитного поля. Опыты.

2. Силовые характеристики электрического и магнитного полей. Сходство и различия.

3. Явление электромагнитной индукции. Примеры. Опыты.

4. Гальванометры, электродвигатели, громкоговорители.

«Изготовление катушки индуктивности и экспериментальное исследование зависимости индукционного тока в ней от различных факторов»

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Механические и электромагнитные колебания подчиняются совершенно *одинаковым законам*, т. е. описываются одними и теми же уравнениями. Именно поэтому мы изучаем их в одном разделе. Однако надо помнить, что физическая природа этих колебаний абсолютно разная.

Одинаковым количественным законам подчиняются и волновые процессы различной природы.

В современной физике выделился специальный раздел — *физика колебаний*. В нём колебания различной природы рассматриваются с единой точки зрения. Физика колебаний занимается исследованием вибраций машин и механизмов, её выводы лежат в основе электротехники и радиотехники.

ГЛАВА 3 МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В этой главе мы рассмотрим особенности механических колебаний и их отличие от других видов механического движения.

§ 13 СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Какое движение называют механическим?
Можно ли назвать движение полотнища флага на ветру механическим движением?

Колебательные движения, или просто колебания, широко распространены в природе и технике.

Запомни **Колебаниями** называются движения или процессы, обладающие свойством повторяемости во времени.

Запомни **Механические колебания** — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определённые интервалы времени.



Колебания поршня в двигателе автомобиля, поплавка на поверхности воды, маятника часов, веток деревьев на ветру — примеры механических колебаний.

Свободные колебания. Группу взаимодействующих тел, движение которых мы изучаем, называют в механике *системой тел* или просто *системой*.

Запомни Силы, действующие между телами системы, называют **внутренними.** **Внешними силами** называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в неё.

Самым простым видом колебаний являются свободные колебания.

Запомни **Свободными колебаниями** называются колебания в системе под действием внутренних сил, после того как система выведена из положения равновесия и предоставлена затем самой себе.

Выясним, какими свойствами должна обладать система для того, чтобы в ней могли возникнуть свободные колебания.

Обсудите с одноклассниками, какие силы действуют на систему груз—пружина. Почему эти силы можно считать внутренними?

Пружинный маятник. Удобнее всего рассмотреть вначале колебания маленького шарика, нанизанного на гладкий горизонтальный стержень, под действием силы упругости пружины.

Если немного сместить шарик из положения равновесия (рис. 3.1, *а*) вправо, то длина пружины увеличится на x_m (рис. 3.1, *б*) и на шарик будет действовать сила упругости. Эта сила согласно закону Гука пропорциональна удлинению пружины и направлена влево. Если отпустить шарик, то под действием этой силы он начнёт двигаться с ускорением влево, увеличивая свою скорость. Сила упругости при этом будет убывать, так как деформация пружины уменьшается. В момент, когда шарик достигнет положения равновесия, сила упругости пружины станет равной нулю. Следовательно, согласно второму закону Ньютона станет равным нулю и ускорение шарика.

Объясните, почему колебания груза, прикреплённого к пружине, или груза, подвешенного на нити, можно рассматривать как примеры свободных колебаний.

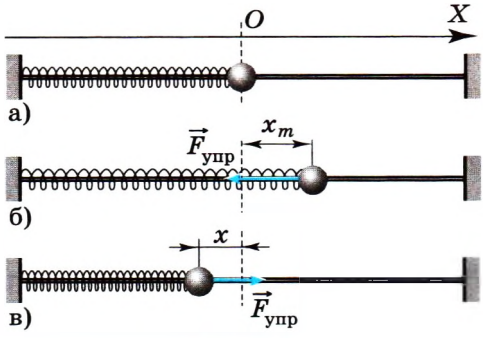


Рис. 3.1

К этому моменту скорость шарика достигнет максимального значения. Не останавливаясь в положении равновесия, он будет по инерции продолжать двигаться влево. Пружина при этом сжимается. В результате появляется сила упругости, направленная уже вправо и тормозящая движение шарика (рис. 3.1, *в*). Эта сила, а значит, и направленное вправо ускорение увеличиваются по модулю прямо пропорционально модулю смещения x шарика относительно положения равновесия. Скорость же будет уменьшаться до тех пор, пока в крайнем левом положении шарика не обратится в нуль. После этого шарик начнёт ускоренно

Интересно Анализ колебаний шарика, подвешенного на вертикальной пружине, сложнее. В этом случае действуют одновременно переменная сила упругости пружины и постоянная сила тяжести. Но характер колебаний в том и другом случае совершенно одинаков.

двигаться вправо. С уменьшением модуля смещения x сила $F_{упр}$ убывает по модулю и в положении равновесия опять обращается в нуль. При этом скорость шарика увеличивается и в положении равновесия становится максимальной, и по инерции шарик проходит положение равновесия, продолжая двигаться вправо. Это движение приводит к растяжению пружины и появлению силы, направленной влево. Движение шарика тормозится до полной остановки в крайнем правом положении — система совершила одно полное колебание, после чего весь процесс повторяется сначала.

Как изменился бы ход рассуждений, если бы шарик был подвешен к пружине?

Если бы не было потерь механической энергии при трении шарика о стержень, то движение шарика не прекратилось бы никогда.

Уравнение движения тела, колеблющегося под действием силы упругости. Согласно второму закону Ньютона произведение массы тела m на его ускорение $\vec{a}$ равно равнодействующей $\vec{F}$ всех сил, приложенных к телу:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \qquad (3.1)$$

Запишем уравнение движения для шарика, движущегося прямолинейно вдоль горизонтали под действием силы упругости $\vec{F}$ пружины (см. рис. 3.1). Направим ось OX вправо. Пусть начало отсчёта координат соответствует положению равновесия шарика (см. рис. 3.1, *а*).

В проекции на ось OX уравнение (3.1) можно записать так: $ma_x = F_{x\ упр}$, где a_x и $F_{x\ упр}$ соответственно проекции ускорения и силы упругости пружины на эту ось.

Согласно закону Гука проекция $F_{x\ упр}$ прямо пропорциональна смещению шарика из положения равновесия. Смещение же равно координате x шарика, причём проекция силы и координата имеют противоположные знаки (см. рис. 3.1, *б*, *в*). Следовательно,

$$F_{x\ упр} = -kx, \qquad (3.2)$$

где k — жёсткость пружины.

Уравнение движения шарика тогда примет вид

$$ma_x = -kx. \qquad (3.3)$$

Разделив левую и правую части уравнения (3.3) на m, получим

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \qquad (3.4)$$

Так как масса m и жёсткость k — постоянные величины, то их отношение $\frac{k}{m}$ также постоянная величина.

Мы получили уравнение, описывающее колебания тела под действием силы упругости. Оно очень простое:

Важно проекция a_x ускорения тела прямо пропорциональна его координате x, взятой с противоположным знаком.

Математический маятник.

Запомни **Математический маятник** — это материальная точка, подвешенная на идеальной (невесомой и нерастяжимой) нити.

Важно *Математический маятник* — модель обычного (реального) маятника.

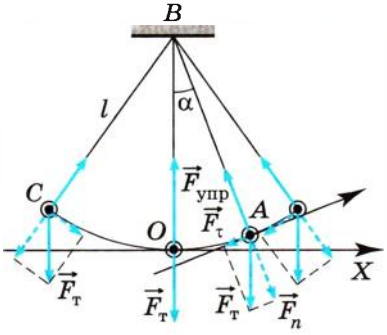


Рис. 3.2

Выведем тело маятника (шарик) из положения равновесия и отпустим. На шарик будут действовать две силы: сила тяжести $\vec{F}_{т} = m\vec{g}$, направленная вертикально вниз, и сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$, направленная вдоль нити (рис. 3.2). Конечно, при движении маятника на него ещё действует и сила сопротивления. Но мы будем считать её пренебрежимо малой.

Для того чтобы отчётливо представить себе динамику движения маятника, удобно силу тяжести разложить на две составляющие: $\vec{F}_{n}$, направленную вдоль нити, и $\vec{F}_{\tau}$, направленную перпендикулярно нити по касательной к траектории шарика. Силы $\vec{F}_{n}$ и $\vec{F}_{\tau}$ в сумме составляют силу $\vec{F}_{т}$. Сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$ и составляющая силы тяжести $\vec{F}_{n}$ перпендикулярны скорости маятника и изменяют только направление скорости, т. е. сообщают ему центростремительное ускорение. Под действием составляющей $\vec{F}_{\tau}$ силы тяжести маятник начинает двигаться по дуге окружности вниз с нарастающей по модулю скоростью. При движении маятника эта составляющая силы тяжести, направленная к положению равновесия, уменьшается по модулю, и в момент, когда маятник проходит через положение равновесия, она становится равной нулю, а скорость шарика становится максимальной, и по инерции он продолжает движение. При этом $\vec{F}_{\tau}$ уже будет направлена против скорости. Поэтому модуль скорости маятника станет уменьшаться. В момент остановки маятника в верхней точке его траектории (точке C) модуль $\vec{F}_{\tau}$ максимален и эта сила будет вызывать движение маятника в сторону положения равновесия, в то же время в этой точке $F_{n} = F_{упр}$, а центростремительное ускорение равно нулю. Далее

Какие упрощения делают, когда тело, подвешенное на нити, считают математическим маятником?

Интересно Нужно иметь в виду, что шарик, подвешенный на нити, будет представлять собой маятник лишь в том случае, если на него действует сила тяжести Земли. Вызывающий эту силу земной шар входит в колебательную систему, которую мы для краткости называем просто маятником.

скорость маятника увеличивается по модулю, и он снова движется к положению равновесия. Пройдя положение равновесия, он возвращается в исходное положение.

Уравнение движения математического маятника. При колебаниях шарика на нерастяжимой нити он всё время движется по дуге окружности, радиус которой равен длине l нити. Поэтому положение шарика в любой момент времени можно определить углом α отклонения нити от вертикали. Будем считать угол α положительным, если маятник отклонён вправо от положения равновесия, и отрицательным, если он отклонён влево (см. рис. 3.2).

Обозначим проекцию силы тяжести на касательную к траектории маятника через $\vec{F}_\tau$. Эта проекция в момент, когда нить маятника отклонена от положения равновесия на угол α, равна:

$$F_\tau = -mg \sin \alpha. \qquad (3.5)$$

Знак «$-$» здесь стоит потому, что величины F_τ и α имеют противоположные знаки. При отклонении маятника вправо ($\alpha > 0$) составляющая силы тяжести $\vec{F}_\tau$ направлена влево и её проекция отрицательна: $F_\tau < 0$. При отклонении маятника влево ($\alpha < 0$) эта проекция положительна: $F_\tau > 0$.

Согласно второму закону Ньютона

$$ma_\tau = F_\tau,$$

или

$$ma_\tau = -mg \sin \alpha. \qquad (3.6)$$

Разделив левую и правую части этого уравнения на m, получим

$$a_\tau = -g \sin \alpha. \qquad (3.7)$$

Ранее предполагалось, что углы отклонения нити маятника от вертикали могут быть любыми. В дальнейшем будем считать их малыми. При малых углах, если угол измерен в радианах,

$$\sin \alpha \approx \alpha.$$

Следовательно, можно принять

$$a_\tau = -g\alpha. \qquad (3.8)$$

Если угол α мал, то эта проекция ускорения примерно равна проекции ускорения на ось OX: $a_\tau \approx a_x$ (см. рис. 3.2). Из треугольника ABO для малого угла α имеем

$$\alpha = \frac{x}{l}. \qquad (3.9)$$

Подставив это выражение в равенство (3.8) вместо угла α, получим

$$a_\tau = -\frac{g}{l} x. \qquad (3.10)$$

Это уравнение имеет такой же вид, что и уравнение (3.4) для ускорения шарика, прикреплённого к пружине. Следовательно, и решение этого уравнения будет иметь тот же вид, что и решение уравнения (3.4). Это означает,

Интересно Силы, пропорциональные смещению и направленные в сторону, противоположную смещению, называют квазиупругими.

что движение шарика и колебания маятника происходят одинаковым образом. Смещения шарика на пружине и тела маятника от положений равновесия изменяются со временем по одному и тому же закону, несмотря на то что силы, вызывающие колебания, имеют различную физическую природу. Умножив уравнения (3.4) и (3.10) на m и вспомнив второй закон Ньютона $ma_x = F_{x\ \text{рез}}$, можно сделать вывод, что колебания в этих двух случаях совершаются под действием сил, равнодействующая которых прямо пропорциональна смещению колеблющегося тела от положения равновесия и направлена в сторону, противоположную этому смещению.

Свободные колебания. Пружинный и математический маятники — Найти

1. Какие колебания называют свободными?
2. При каких условиях в системе возникают свободные колебания?
3. Чему равно перемещение шарика (см. рис. 3.1) за одно полное колебание?

1. Верно(-ы) утверждение(-я):
Свободным является колебание
А. груза, подвешенного к пружине, после однократного его отклонения от положения равновесия
Б. мембраны громкоговорителя во время работы приёмника
1) только А 2) только Б 3) А и Б 4) ни А, ни Б

2. Математический маятник совершает колебания под действием силы
1) тяжести
2) упругости нити
3) тяжести и силы упругости нити
4) тяготения

3. Выберите формулу, связывающую угол отклонения нити и смещение тела при колебаниях математического маятника.
1) $x = \alpha l$ 2) $x = -\alpha l$ 3) $x = g/l$ 4) $x = -g\alpha$

4. Могут ли в какой-то момент времени совпадать направления скорости и ускорения при колебаниях пружинного маятника?
1) ответ зависит от положения маятника в начальный момент времени
2) не могут ни в один из моментов времени
3) могут в моменты максимальной скорости
4) могут при движении от точки максимального отклонения к положению равновесия

5. При колебаниях математического маятника ускорение материальной точки перпендикулярно её скорости
1) в точках максимального отклонения
2) при прохождении положения равновесия
3) в определённой точке, находящейся между положением равновесия и максимального отклонения
4) не будет ни в одной точке

§ 14 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Какое движение называется колебательным?
Каковы условия и причины колебаний пружинного и математического маятников?

Зная, как связаны между собой ускорение и координата колеблющегося тела, можно на основе математического анализа найти зависимость координаты от времени.

Ускорение — вторая производная координаты по времени. Мгновенная скорость точки, как вам известно из курса математики, представляет собой производную координаты точки по времени. Ускорение точки — это производная её скорости по времени, или вторая производная координаты по времени. Поэтому уравнения (3.4) и (3.10) можно записать так:

$$x'' = -\omega_0^2 x, \qquad (3.11)$$

где x'' — вторая производная координаты по времени, $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ для пружинного маятника и $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$ для математического маятника. Уравнение (3.11) — дифференциальное уравнение гармонических колебаний, решением которого является функция синуса или косинуса, т. е.

Важно координата тела, совершающего свободные колебания, меняется с течением времени по формуле синуса или косинуса.

На рисунке 3.3 показано изменение координаты точки со временем по формуле косинуса.

Запомни **Гармоническими колебаниями** называются периодические изменения физической величины в зависимости от времени, происходящие по формуле синуса или косинуса. Такие колебания являются **незатухающими.**

Запишем решение уравнения (3.11) в виде

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \qquad (3.12)$$

Найдём скорость точки, совершающей гармонические колебания:

$$v_x = x' = -\omega_0 x_m \sin \omega_0 t, \qquad (3.13)$$

где x_m — амплитуда колебаний.

Ускорение, равное второй производной от x, имеет вид

$$a_x = x'' = -\omega_0^2 x_m \cos \omega_0 t = -\omega_0^2 x. \qquad (3.14)$$

Подставив выражение для a_x в уравнение (3.11), получим тождество. Следовательно, функция (3.12)

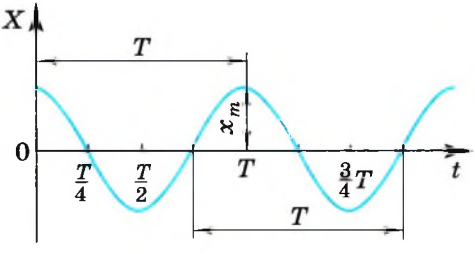


Рис. 3.3

есть решение исходного уравнения (3.11). Решением этого уравнения будет также функция $x = x_m \sin \omega_0 t$.

График зависимости координаты тела от времени согласно формуле (3.12) представляет собой *косинусоиду* (см. рис. 3.3).

Характеристики колебаний.

Запомни **Амплитудой** гармонических колебаний называется модуль наибольшего смещения тела от положения равновесия.

Как вы понимаете, что такое полное колебание в разных колебательных системах? Приведите примеры колебательных систем.

Амплитуда может иметь различные значения в зависимости от того, насколько мы смещаем тело от положения равновесия в начальный момент времени, или от того, какая скорость сообщается телу.

Важно Амплитуда определяется энергией, сообщаемой телу.

При колебаниях движения тела периодически повторяются.

Запомни Промежуток времени, за который система совершает одно полное колебание, называется **периодом** T колебаний.

Зная период, можно определить *частоту колебаний*.

Запомни **Частота** ν колебаний — число колебаний в единицу времени, например за секунду.

Понаблюдайте за колебаниями математического маятника. Как изменить амплитуду колебаний, а как частоту?

Если одно колебание совершается за время T, то число колебаний за секунду

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (3.15)$$

Важно В Международной системе единиц (СИ) частота колебаний равна единице, если за секунду совершается одно полное колебание.

Единица частоты называется *герцем* (сокращённо: Гц) в честь немецкого физика Г. Герца.

Число колебаний за 2π с равно:

$$\omega_0 = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \qquad (3.16)$$

Запомни Величина ω_0 — **циклическая,** или **круговая,** частота колебаний.

Если в уравнении (3.12) время t равно одному периоду, то $\omega_0 T = 2\pi$. Таким образом, если в момент времени $t = 0$ смещение $x = x_m$, то и в момент времени $t = T$ смещение $x = x_m$, т. е. через промежуток времени, равный одному периоду, колебания повторяются.

Запомни **Собственной частотой** колебательной системы называют частоту свободных колебаний.

Зависимость частоты и периода свободных колебаний от свойств системы. Собственная частота колебаний тела, прикреплённого к пружине, согласно уравнению (3.4) равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Она тем больше, чем больше жёсткость пружины k, и тем меньше, чем больше масса тела m. Это легко понять: жёсткая пружина сообщает телу большее ускорение, быстрее меняет скорость тела. А чем тело массивнее, тем медленнее оно изменяет скорость под действием силы. Период колебаний равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (3.17)$$

Важно Период колебаний тела на пружине и период колебаний маятника при малых углах отклонения не зависят от амплитуды колебаний.

Собственная частота колебаний математического маятника согласно формуле (3.10) при малых углах отклонения нити от вертикали зависит от длины маятника и ускорения свободного падения:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \qquad (3.18)$$

Период же этих колебаний равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (3.19)$$

Период колебаний возрастает с увеличением длины маятника. От массы маятника он не зависит. Это легко проверить на опыте

Интересно Для краткости циклическую частоту обычно называют просто частотой. Отличить циклическую частоту от обычной частоты можно по обозначениям.

Подвешивая к разным пружинам разные по массе тела, подтвердите зависимость периода колебаний от параметров системы. Учтите, что жёсткость при уменьшении толщины проволоки пружины уменьшается, а при уменьшении длины увеличивается.

Интересно Формула (3.19) была впервые получена и проверена на опыте голландским учёным Г. Гюйгенсом — современником И. Ньютона. Она справедлива только для малых углов отклонения нити.

с различными маятниками. Зависимость периода колебаний от ускорения свободного падения также можно обнаружить. Чем меньше g, тем больше период колебаний маятника и, следовательно, тем медленнее идут часы с маятником.

Интересно Часы с маятником в виде груза на стержне отстанут за сутки почти на 3 с, если их поднять из подвала на верхний этаж Московского университета (высота 200 м). И это произойдёт только за счёт уменьшения ускорения свободного падения с высотой.

В районах, где залегают плотные породы, ускорение g несколько большее. Это учитывают при поисках полезных ископаемых.

Так, железная руда обладает повышенной плотностью по сравнению с обычными породами. Проведённые под руководством академика А. А. Михайлова измерения ускорения свободного падения под Курском позволили уточнить места залегания железной руды. Сначала они были обнаружены посредством магнитных измерений.

Важно Согласно полученным формулам (3.17) и (3.19) период гармонических колебаний зависит от параметров системы (жёсткости пружины, длины нити и т. д.).

Фаза колебаний. Введём ещё одну величину, характеризующую гармонические колебания, — *фазу колебаний*.

При заданной амплитуде колебаний координата колеблющегося тела в любой момент времени однозначно определяется аргументом косинуса или синуса:

$$\varphi = \omega_0 t.$$

Запомни Величину φ, стоящую под знаком функции косинуса или синуса, называют **фазой** колебаний, описываемых этой функцией.

Выражается фаза в угловых единицах — *радианах*.

Фаза определяет не только значение координаты, но и значения других физических величин, например скорости и ускорения, изменяющихся также по гармоническому закону. Поэтому можно сказать, что

Важно фаза определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени.

В этом состоит значение понятия фазы.

Колебания с одинаковыми амплитудами и частотами могут различаться фазами.

Так как $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, то

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \qquad (3.20)$$

Отношение $\frac{t}{T}$ указывает, сколько полных колебаний совершено от момента начала колебаний. Любому значению времени t соответствует значение

фазы φ, выраженное в радианах. Так, по прошествии времени $t = \frac{T}{4}$ (четверти периода) $\varphi = \frac{\pi}{2}$, по прошествии половины периода $\varphi = \pi$, по прошествии целого периода $\varphi = 2\pi$ и т. д.

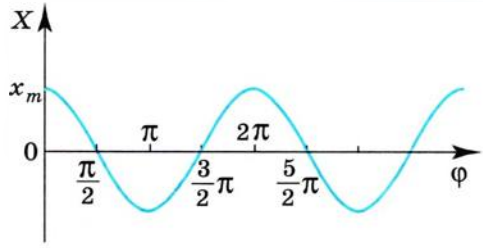


Рис. 3.4

Можно изобразить на графике зависимость координаты колеблющейся точки не от времени, а от фазы. На рисунке 3.4 показана та же косинусоида, что и на рисунке 3.3, но на горизонтальной оси отложены вместо времени различные значения фазы φ.

Описание гармонических колебаний с помощью косинуса и синуса. Вы уже знаете, что при гармонических колебаниях координата тела изменяется со временем по формуле косинуса или синуса.

Так как

$$\cos\varphi = \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right),$$

то одно и то же колебание мы можем описать этими двумя тригонометрическими функциями, различающимися аргументом на $\frac{\pi}{2}$. Выбор функции зависит от начальных условий. Если смещение от положения равновесия максимально в начальный момент, то для описания колебаний удобнее пользоваться формулой $x = x_m \cos\omega_0 t$.

Если бы мы возбудили колебания покоящегося тела кратковременным толчком, то координата тела в начальный момент была бы равна нулю и изменения координаты со временем было бы удобнее описывать с помощью синуса, т. е. формулой

$$x = x_m \sin\omega_0 t,$$

так как при этом начальная фаза равна нулю.

Если в начальный момент времени (при $t = 0$) фаза колебаний равна φ_0, то уравнение колебаний можно записать в виде

$$x = x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \qquad (3.21)$$



Подумайте, какие значения начальной фазы φ_0 могут быть при разных способах возбуждения колебаний.

Сдвиг фаз. Колебания, происходящие с одинаковыми частотой и амплитудой, могут отличаться друг от друга фазами.

Рассмотрим два колебания: $x = x_m \sin\omega_0 t$ и $x = x_m \cos\omega_0 t$. Так как $\cos\omega_0 t = \sin(\omega_0 t + \pi/2)$, то разность фаз, или, как часто говорят, *сдвиг фаз*, этих колебаний составляет $\frac{\pi}{2}$. На рисунке 3.5 показаны графики зависимости координат от времени для этих двух гармонических колебаний,

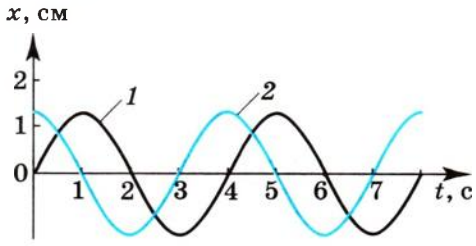


Рис. 3.5

сдвинутых по фазе на $\frac{\pi}{2}$. График *1* соответствует колебаниям, совершающимся по формуле синуса:

$$x = x_m \sin \omega_0 t,$$

а график *2* — колебаниям, совершающимся по формуле косинуса:

$$x = x_m \cos \omega_0 t = x_m \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Превращения энергии при гармонических колебаниях. Пусть в положении равновесия потенциальная энергия колебательной системы равна нулю. Смещая тело на расстояние x_m, мы сообщаем колебательной системе потенциальную энергию $W_п$ и таким образом создаём системе условия для начала движения тела (колебаний).

Обсудите с одноклассниками, как будут выглядеть графики на рисунке 3.5, если сдвиг фаз будет равен π или $3\pi/2$.

При движении тела потенциальная энергия системы уменьшается. Но одновременно увеличивается скорость и, следовательно, возрастает кинетическая энергия. В момент прохождения телом положения равновесия потенциальная энергия колебательной системы становится равной нулю ($W_п = 0$ при $x = 0$). Кинетическая же энергия достигает максимума.

После прохождения положения равновесия скорость тела начинает уменьшаться. Следовательно, уменьшается и кинетическая энергия. Потенциальная же энергия системы снова увеличивается. Когда смещение тела вновь достигает максимума, то кинетическая энергия становится равной нулю. Таким образом, при колебаниях периодически происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Полная механическая энергия при гармонических колебаниях равна сумме кинетической и потенциальной энергий колебательной системы:

$$W = W_к + W_п. \qquad (3.22)$$

Запишите формулу (3.22) в случаях колебаний пружинного и математического маятников с учётом выражений для потенциальной энергии.

Важно

Полная механическая энергия изолированной системы, в которой отсутствуют силы сопротивления, сохраняется (согласно закону сохранения механической энергии) неизменной:

$$W = \text{const}.$$

Она равна либо потенциальной энергии в момент максимального отклонения от положения равновесия, либо же кинетической энергии в момент, когда тело проходит положение равновесия.

Гармонические колебания — частный случай колебаний, происходящих в природе и технике. Однако любой колебательный процесс может быть представлен как сумма гармонических колебаний.

Приведём таблицу основных характеристик гармонических колебаний. Уравнение колебаний $x = x_m \sin(\omega t + \varphi_0)$.

Характеристика	Обозначение	Определение	Зависимость
Амплитуда	x_m, A	Максимальное отклонение от положения равновесия	От энергии, сообщённой системе, $x_m = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{2W}{m}}$
Период колебаний	T	Время одного полного колебания	От параметров системы
Частота колебаний	ν	Число полных колебаний за 1 с	
Циклическая частота колебаний	ω	Число полных колебаний за 2π с	
Фаза колебаний	$\varphi = \omega t + \varphi_0$	Положение колеблющегося тела в данный момент времени	От времени, частоты и начальных условий
Начальная фаза колебаний	φ_0	Положение колеблющегося тела в начальный момент времени ($t = 0$)	От начальных условий

Гармонические колебания. Амплитуда. Период. Частота. Фаза. Энергия

Найти

1. Какие колебания называют гармоническими?
2. Как связаны ускорение и координата при гармонических колебаниях?
3. Как связаны циклическая частота и период колебаний?
4. Почему частота колебаний тела, прикреплённого к пружине, зависит от его массы, а частота колебаний математического маятника от массы не зависит?

1. Груз массой 0,16 кг, подвешенный на лёгкой пружине, совершает свободные гармонические колебания. Определите массу груза, который надо подвесить к той же пружине, чтобы частота колебаний уменьшилась в 2 раза.

1) 0,04 кг 2) 0,08 кг 3) 0,32 кг 4) 0,64 кг

2. Маятниковые часы спешат. Чтобы часы шли точно, необходимо увеличить период колебаний маятника. Для этого надо

1) увеличить массу маятника
2) уменьшить массу маятника
3) увеличить длину маятника
4) уменьшить длину маятника

3. Если на некоторой планете период колебаний секундного земного математического маятника окажется равным 2 с, то ускорение свободного падения на этой планете равно

1) 2,5 м/с^2 2) 5 м/с^2 3) 20 м/с^2 4) 40 м/с^2

§ 15 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ»

Одной из самых сложных задач на эту тему является задача определения собственной частоты колебаний тела. Для этого надо согласно второму закону Ньютона записать уравнение динамики, затем привести его к виду (3.14). Постоянная при x определит квадрат циклической частоты колебаний.

Обратите внимание на отличие циклической частоты от частоты: $\omega = 2\pi\nu$.

При записи уравнения колебаний надо учитывать начальные условия, которые определяют начальную фазу колебаний.

Задача 1. Сколько колебаний совершает математический маятник длиной $l = 4{,}9$ м за время $t = 5$ мин?

Решение. Период колебаний определяется по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Искомое число колебаний можно найти так: $n = \frac{t}{T} = \frac{t}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \approx 67$.

Задача 2. Вертикально подвешенная пружина растягивается прикреплённым к ней грузом на $\Delta l = 0{,}8$ см. Чему равен период T свободных колебаний груза? (Массой пружины можно пренебречь.)

Решение. Период колебаний груза, прикреплённого к пружине, определяется формулой $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, где m — масса груза; k — жёсткость пружины. На груз действуют сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости $\vec{F}_{упр}$. Когда груз находится в равновесии, эти силы равны по модулю: $F_т = F_{упр}$.

Так как $F_т = mg$ и $F_{упр} = k\Delta l$ (закон Гука), то $mg = k\Delta l$, откуда $\frac{m}{k} = \frac{\Delta l}{g}$.

Следовательно, $T = 2\pi\sqrt{\Delta l/g} \approx 0{,}2$ с.

Задача 3. На гладком горизонтальном стержне находится груз, прикреплённый к пружине. Другой конец пружины закреплён. Потянув за груз, пружину растягивают, при этом внешняя сила совершает работу 50 Дж. Затем груз отпускают. Жёсткость пружины 10^4 Н/м, масса груза 10 г. Запишите уравнение колебаний груза и определите его координаты в моменты времени, равные $\pi/4$ мс, $\pi/2$ мс, π мс.

Решение. Уравнение движения груза $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$.

Полная механическая энергия системы равна энергии, сообщённой системе, т. е. равна работе внешней силы: $\frac{kx_m^2}{2} = A$. Отсюда найдём амплитуду колебаний: $x_m = \sqrt{\frac{2A}{k}} = 0{,}1$ м.

Циклическую частоту колебаний определим по формуле для частоты колебаний пружинного маятника: $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 10^3$ рад/с.

При $t = 0$ $x = x_m$, следовательно, начальная фаза колебаний равна нулю, $\varphi_0 = 0$. Уравнение колебаний груза имеет вид

$$x = 0{,}1 \cos(10^3 t). \qquad (1)$$

Период колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \cdot 10^{-3}$ с.

Подставим в уравнение (1) указанные моменты времени:

1) $t_1 = \frac{\pi}{4} \cdot 10^{-3}$ с, заметим, что этот момент времени соответствует 1/8 периода колебаний. Смещение $x_1 = 0{,}1 \cos(10^3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10^{-3}) \approx 0{,}071$ м.

2) $t_2 = \frac{\pi}{2} \cdot 10^{-3}$ с, этот момент времени соответствует 1/4 периода колебаний, из формулы (1) очевидно, что $x_2 = 0$.

3) За время $t_3 = \pi \cdot 10^{-3}$ с груз совершит половину одного полного колебания. Очевидно, что $x_3 = -0{,}1$ м.

Задача 4. В жидкости плотностью $\rho_ж$ плавает цилиндр высотой h (рис. 3.6). Если цилиндр погрузить в жидкость или, напротив, немного вытащить из жидкости, то после того, как его отпустят, цилиндр начинает колебаться. Плотность материала, из которого сделан цилиндр, равна $\rho_м$. Определите период колебаний цилиндра. Силами сопротивления можно пренебречь.

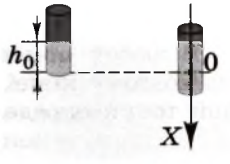


Рис. 3.6

Р е ш е н и е. Условие плавания цилиндра — равенство сил тяжести и Архимеда:

$$F_{Арх} = F_т, \quad \text{или} \quad \rho_ж S h_0 g = \rho_м S h g, \qquad (1)$$

где S — площадь поперечного сечения цилиндра, h_0 — глубина его погружения в жидкость.

Из соотношения (1) следует: $h_0 = \frac{\rho_м}{\rho_ж} h$.

Если увеличить глубину погружения цилиндра на x, то сила Архимеда станет больше силы тяжести и согласно второму закону Ньютона можно записать (проекция на ось X):

$$ma_x = mg - \rho_ж S(h_0 + x)g. \qquad (2)$$

Учитывая соотношение (1), получим $ma_x = -\rho_ж S g x$.

Обратим внимание на то, что равнодействующая сил, действующих на цилиндр, прямо пропорциональна смещению тела от положения равновесия и направлена в сторону, противоположную смещению, следовательно, цилиндр совершает гармонические колебания.

Разделив на массу $m = \rho_м Sh$ левую и правую части уравнения (2), получим $a_x = -\dfrac{\rho_ж g}{\rho_м h} x$.

Отсюда согласно уравнению (3.14) найдём циклическую частоту колебаний: $\omega = \sqrt{\dfrac{\rho_ж g}{\rho_м h}}$.

Период колебаний цилиндра $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{\rho_м h}{\rho_ж g}}$.

Мы видим, что период и частота колебаний определяются также параметрами системы.

Задача 5. Груз, прикреплённый к пружине, колеблется на горизонтальном гладком стержне (см. рис. 3.1). Определите отношение кинетической энергии груза к потенциальной энергии системы в момент, когда груз находится в точке, расположенной посредине между крайним положением и положением равновесия.

Р е ш е н и е. Координата указанной точки равна половине амплитуды колебаний: $x = x_m/2$. Потенциальная энергия системы в момент прохождения груза через эту точку равна $W_п = kx^2/2 = kx_m^2/8$.

В любой момент времени выполняется равенство $W_к + W_п = kx_m^2/2$.

Поэтому кинетическая энергия груза в момент прохождения им указанной точки определяется так:

$$W_к = \frac{kx_m^2}{2} - W_п = \frac{kx_m^2}{2} - \frac{kx_m^2}{8} = \frac{3}{8}kx_m^2.$$

Следовательно, $W_к/W_п = 3$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Груз массой 100 г совершает колебания с частотой 2 Гц под действием пружины. Определите жёсткость пружины.
2. В Санкт-Петербурге в Исаакиевском соборе висел маятник Фуко, длина которого была равна 98 м. Чему был равен период колебаний маятника?
3. Шарик на пружине сместили на расстояние 1 см от положения равновесия и отпустили. Какой путь пройдёт шарик за 2 с, если частота его колебаний $\nu = 5$ Гц? (Затуханием колебаний можно пренебречь.)
4. Тело массой 200 г совершает колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой 2 см под действием пружины жёсткостью 16 Н/м. Определите циклическую частоту колебаний тела и энергию системы.
5. На горизонтальном стержне находится груз, прикреплённый к пружине (см. рис. 3.1). Другой конец пружины закреплён. В некоторый момент времени груз смещают от положения равновесия на $x_m = 10$ см и отпускают. Определите координату груза спустя 1/8 периода колебаний. (Трение не учитывайте.)

§ 16 ЗАТУХАЮЩИЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

Как меняется колебательное движение маятника с течением времени?
Остаётся ли постоянной полная механическая энергия маятника?
Какие силы действуют на маятник?

Свободные колебания груза, прикреплённого к пружине, или маятника являются гармоническими лишь в том случае, когда нет трения. Но силы трения, или, точнее, силы сопротивления окружающей среды, хотя, может быть, и малые, всегда действуют на колеблющееся тело.

Затухающие колебания. Обратимся к эксперименту, схематично изображённому на рисунке 3.1. Трение и сопротивление воздуха препятствуют движению шарика. Направление силы сопротивления как при движении шарика вправо, так и при его движении влево всё время противоположно направлению скорости. Размах его колебаний постепенно будет уменьшаться до тех пор, пока движение не прекратится. При малом трении затухание становится заметным лишь после того, как шарик совершит много колебаний. Если наблюдать движение шарика на протяжении не очень большого интервала времени, то затуханием колебаний можно пренебречь. В этом случае влияние силы сопротивления на движение можно не учитывать.

Если же сила сопротивления велика, то пренебречь её действием даже в течение малых интервалов времени нельзя. Опустите шарик на пружине в стакан с вязкой жидкостью, например с глицерином (рис. 3.7). Если жёсткость пружины мала, то выведенный из положения равновесия шарик совсем не будет колебаться. Под действием силы упругости он просто вернётся в положение равновесия (штриховая линия на рисунке 3.7). За счёт действия силы сопротивления скорость его в положении равновесия будет практически равна нулю.

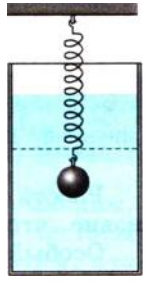


Рис. 3.7

Силы сопротивления совершают отрицательную работу и тем самым уменьшают механическую энергию системы. Поэтому с течением времени максимальные отклонения тела от положения равновесия становятся всё меньше и меньше. В конце концов, после того как запас механической энергии окажется исчерпанным, колебания прекратятся совсем.

Важно Колебания при наличии сил сопротивления являются *затухающими*.

График зависимости координаты тела от времени при затухающих колебаниях изображён на рисунке 3.8. Подобный график может вычертить само колеблющееся тело, например маятник.

На рисунке 3.9 изображён маятник с песочницей. Маятник на равномерно движущемся под ним листе картона струйкой песка вычерчивает график зависимости своей координаты от времени. Это простой метод временно́й

Как изменяется механическая энергия при затухающих колебаниях?
Похож ли график изменения энергии на график, приведённый на рисунке 3.8?

Подвесьте на длинную нить сначала маленький шарик, а затем кубик большого размера. Определите с помощью секундомера период их колебаний и время затухания этих колебаний. Сделайте выводы.

Интересно В автомобилях применяются специальные амортизаторы для гашения колебаний кузова при езде по неровной дороге. При колебаниях кузова связанный с ним поршень движется в цилиндре, заполненном жидкостью. Жидкость перетекает через отверстия в поршне, что приводит к появлению больших сил сопротивления и быстрому затуханию колебаний.

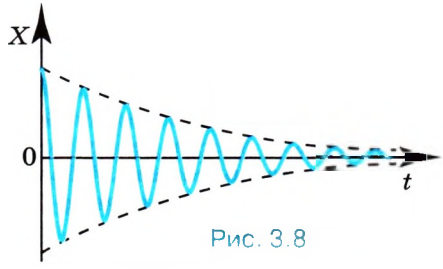
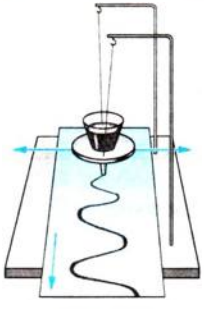


Рис. 3.8


Рис. 3.9

развёртки колебаний, дающий достаточно полное представление о процессе колебательного движения. При небольшом сопротивлении затухание колебаний на протяжении нескольких периодов мало. Если же к нитям подвеса прикрепить лист плотной бумаги для увеличения силы сопротивления, то затухание станет значительным.

Вынужденные колебания. Большое значение имеют незатухающие колебания — те, которые могут длиться неограниченно долго.

Самый простой способ возбуждения незатухающих колебаний состоит в том, что на систему воздействуют внешней периодической силой.

Запомни **Вынужденными** называются колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

Работа внешней силы над системой обеспечивает приток энергии к системе извне, что не даёт колебаниям затухнуть, несмотря на действие сил трения.

Особый интерес представляют вынужденные колебания в системе, способной совершать почти свободные колебания. С этим случаем знакомы все, кому приходилось раскачивать ребёнка на качелях.

Качели — это маятник, т. е. колебательная система с определённой собственной частотой. Отклонить качели на большой угол от положения равновесия с помощью постоянной во времени небольшой силы невозможно. Не удаётся раскачать качели и в том случае, если их беспорядочно подталкивать в разные стороны. Однако если начать в правильном ритме подталкивать качели вперёд каждый раз, когда они поравняются с нами, то можно и без большого напряжения раскачать их очень сильно. Правда, для этого потребуется некоторое время. Каждый толчок сам по себе может

Почему постоянная сила не может поддерживать колебания?

быть незначительным. После первого толчка качели будут совершать лишь очень малые колебания. Но если темп этих колебаний и внешних толчков один и тот же, то второй толчок будет своевременным и усилит действие первого. Третий усилит колебания ещё больше и т. д. Эта возможность значительного увеличения амплитуды колебаний системы, способной совершать почти свободные колебания, при совпадении частоты внешней периодической силы с собственной частотой колебательной системы и представляет особый интерес.

Вынужденные колебания шарика, прикреплённого к пружине. Рассмотрим вынужденные колебания в системе, обладающей собственной частотой колебаний. Вместо маятника удобнее взять шарик, прикреплённый к пружине. Пусть конец одной из пружин будет прикреплён к нити, перекинутой через блок (рис. 3.10), а нить соединена со стерженьком на диске. Если вращать диск с помощью электродвигателя, то на пружину начнёт действовать периодическая внешняя сила.

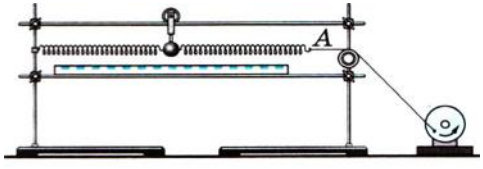


Рис. 3.10

Постепенно под действием пружины шарик начнёт раскачиваться. При этом амплитуда колебаний будет нарастать. Спустя некоторое время колебания приобретут *установившийся* характер: их амплитуда перестанет изменяться со временем. Причём можно обнаружить, что частота колебаний шарика (частоту вынужденных колебаний будем обозначать буквой ω в отличие от частоты собственных колебаний системы ω_0) равна частоте колебаний конца A пружины, т. е. частоте изменения внешней силы. (Эта частота равна числу оборотов диска в секунду.)

Важно При установившихся вынужденных колебаниях частота колебаний всегда равна частоте внешней периодически действующей силы.

Резонанс. Пользуясь установкой, изображённой на рисунке 3.10, выясним, как амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от частоты внешней силы. Плавно увеличивая частоту внешней силы, мы заметим, что амплитуда колебаний постепенно возрастает. Она достигает максимума, когда внешняя сила действует в такт со свободными колебаниями шарика.

При дальнейшем увеличении частоты амплитуда установившихся колебаний уменьшается. Зависимость амплитуды колебаний от частоты изображена на рисунке 3.11. При очень больших частотах внешней силы амплитуда вынужденных колебаний стремится к нулю с ростом частоты, так как тело вследствие своей инертности не успевает заметно смещаться за малые промежутки времени и «дрожит на месте».

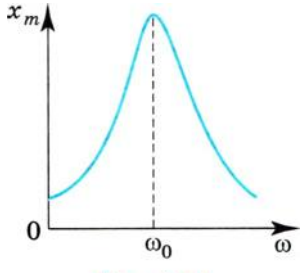


Рис. 3.11

Запомни Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы, действующей на систему, с частотой её свободных колебаний называется **резонансом** (от латинского слова *resonans* — дающий отзвук).

При резонансе амплитуда вынужденных колебаний максимальна из-за того, что на протяжении всего периода направление внешней силы совпадает с направлением скорости колеблющегося тела, поэтому эта сила совершает только положительную работу. При установившихся колебаниях положительная работа внешней силы равна по модулю отрицательной работе силы сопротивления.

Если частота внешней силы не равна собственной частоте ω_0 колебаний системы, то внешняя сила лишь в течение части периода совершает положительную работу. В течение же другой части периода направление силы противоположно направлению скорости и работа внешней силы будет отрицательной. В результате работа внешней силы за период невелика и соответственно невелика и амплитуда установившихся колебаний. Существенное влияние на резонанс оказывает трение в системе. Чем меньше коэффициент трения, тем больше амплитуда установившихся колебаний.

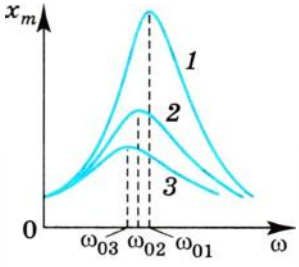


Рис. 3.12

Изменение амплитуды вынужденных колебаний в зависимости от частоты при различных коэффициентах трения и одной и той же амплитуде внешней силы изображено на рисунке 3.12. Кривой *1* соответствует минимальное трение, а кривой *3* — максимальное. На этом рисунке хорошо видно, что возрастание амплитуды вынужденных колебаний при резонансе выражено тем отчётливее, чем меньше трение в системе.

При малом трении резонанс «острый», а при большом — «тупой».

Важно Если частота ω колебаний далека от резонансной, то амплитуда колебаний мала и почти не зависит от силы сопротивления в системе.

В системе с малым трением амплитуда колебаний при резонансе может быть очень большой даже в том случае, когда внешняя сила мала. Но большая амплитуда устанавливается только спустя продолжительное время после начала действия внешней силы. В соответствии с законом сохранения энергии вызвать в системе колебания с большой амплитудой, а значит, сообщить системе большую энергию небольшой внешней силой можно только за продолжительное время. Если трение велико, то амплитуда колебаний будет небольшой и для установления колебаний не потребуется много времени.

Воздействие резонанса и борьба с ним. Любое упругое тело, будь то мост, станина машины, её вал, корпус корабля, представляет собой колебательную систему и характеризуется собственными частотами колебаний. При работе двигателей нередко возникают периодические дополнительные

Подумайте, почему изменяется резонансная частота при увеличении силы трения.

напряжения, связанные с движением частей двигателя (например, поршней) или с недостаточно точной центровкой их вращающихся деталей (например, валов). Если частота этих периодических напряжений совпадает с частотой свободных колебаний системы, то возникает резонанс. Амплитуда колебаний может возрасти настолько, что возможна поломка машин, хотя напряжение в материале и не превышает предела прочности при статических нагрузках.

Во всех этих случаях принимаются специальные меры, чтобы не допустить наступления резонанса или ослабить его действие. Известны случаи, когда приходилось перестраивать океанские лайнеры, чтобы уменьшить вибрацию.

При переходе через мост воинским частям запрещается идти в ногу. Строевой шаг приводит к периодическому воздействию на мост. Если случайно частота этого воздействия совпадёт с собственной частотой колебаний моста, то он может разрушиться.

Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс Найти

1. Два маятника представляют собой шарики одинакового радиуса, подвешенные на нитях равной длины. Массы шариков различны. Колебания какого из маятников прекратятся быстрее: лёгкого или тяжёлого?
2. Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры вынужденных колебаний.
3. Приходилось ли вам наблюдать явление резонанса дома или на улице?
4. Для того чтобы удержать открытую дверь в вестибюле метро (дверь открывается в обе стороны и возвращается в положение равновесия пружинами), нужно приложить к ручке двери силу около 50 Н. Можно ли открыть дверь, приложив к ручке силу 0,005 Н? (Трение в петлях двери не учитывайте.)
5. При каком условии резонансные свойства колебательной системы проявляются отчётливо?
6. Автомобиль движется по неровной дороге, на которой расстояние между буграми приблизительно равно 8 м. Период свободных колебаний автомобиля на рессорах 1,5 с. При какой скорости автомобиля его колебания в вертикальной плоскости станут особенно заметными?

Повторите материал главы 3 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

«Колебательные процессы в природе и технике»

1. Различные механические колебательные системы.
2. Эксперименты по исследованию колебательных систем.
3. Явление резонанса.
4. Сложение колебаний.

«Моделирование и экспериментальное исследование механических колебательных систем»

ГЛАВА 4 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В этой главе мы будем изучать электромагнитные колебания. Особо отметим единство колебательных процессов различной природы.

§ 17 СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Какое движение называется колебательным движением?
Как изменяются координаты при свободных колебаниях маятника?

Запомни

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

Простейшая система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания, состоит из конденсатора и катушки, присоединённой к его обкладкам (рис. 4.1), и называется **колебательным контуром.**

Интересно Электромагнитные колебания были открыты почти случайно. После того как изобрели лейденскую банку (первый конденсатор) и научились сообщать ей большой заряд с помощью электростатической машины, начали изучать электрический разряд банки. Замыкая обкладки лейденской банки с помощью проволочной катушки, обнаружили, что нельзя предсказать, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой — южным. Далеко не сразу поняли, что при разрядке конденсатора через катушку в электрической цепи возникают колебания, ток меняет направление много раз, в результате чего сердечник может намагничиваться различным образом.

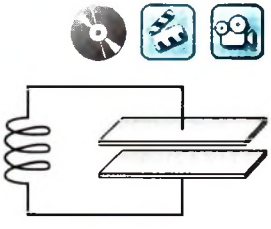


Рис. 4.1

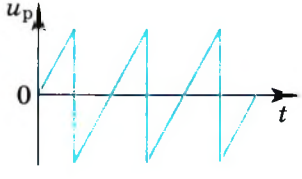


Рис. 4.2

Обычно эти колебания происходят с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний. Поэтому для их наблюдения и исследования очень удобен электронный осциллограф.

В электронно-лучевой трубке осциллографа узкий пучок электронов попадает на экран, способный светиться при его бомбардировке электронами. На горизонтально отклоняющие пластины трубки подаётся переменное напряжение развёртки $u_р$ пилообразной формы (рис. 4.2). Сравнительно медленно напряжение повышается, а потом очень резко понижается. Электрическое поле между пластинами заставляет электронный луч пробегать экран в горизонтальном направлении с постоянной скоростью и затем почти мгновенно возвращаться назад. После этого весь процесс повторяется. Если теперь присоединить вертикально отклоняющие пластины трубки к конденсатору, то колебания напряжения

при его разрядке вызовут колебания луча в вертикальном направлении. В результате на экране образуется временна́я развёртка колебаний (рис. 4.3), подобная той, которую вычерчивает маятник с песочницей над движущимся листом бумаги. Колебания затухают с течением времени. Эти колебания являются *свободными*.

Вспомните, какие колебания называют свободными.

Превращение энергии при электромагнитных колебаниях. Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое время к батарее с помощью переключателя (рис. 4.4, *а*). При этом конденсатор получит энергию

$$W_э = \frac{q_m^2}{2C}, \qquad (4.1)$$

где q_m — заряд конденсатора, C — его электроёмкость. Между обкладками конденсатора возникнет разность потенциалов U_m.

Переведём переключатель в положение *2* (рис. 4.4, *б*). Конденсатор начнёт разряжаться, и в цепи появится электрический ток. Благодаря явлению самоиндукции сила тока не сразу достигает максимального значения, а увеличивается постепенно.

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока, которая определяется формулой

$$W_м = \frac{Li^2}{2}, \qquad (4.2)$$

где i — сила переменного тока, L — индуктивность катушки.

Полная энергия W электромагнитного поля контура равна сумме энергий его магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \qquad (4.3)$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Энергия же магнитного поля тока согласно закону сохранения энергии будет максимальной. В этот момент сила тока также достигнет максимального значения I_m (рис. 4.4, *в*).

Несмотря на то что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает ЭДС самоиндукции, стремящаяся поддержать ток.



Рис. 4.3

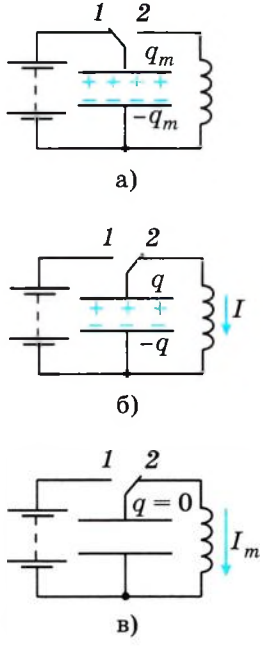


Рис. 4.4

В результате конденсатор будет перезаряжаться до тех пор, пока сила тока, постепенно уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

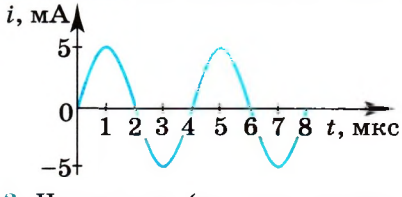
Какие преобразования энергии происходят в идеальном колебательном контуре?

После этого конденсатор вновь начнёт перезаряжаться, и система возвратится в исходное состояние. Если бы не было потерь энергии, то этот процесс продолжался бы сколь угодно долго. Колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состояние системы в точности повторялось бы. Полная энергия при этом сохранялась бы неизменной, и её значение в любой момент времени было бы равно максимальной энергии электрического поля или максимальной энергии магнитного поля:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \qquad (4.4)$$

Электромагнитные колебания. Колебательный контур. Энергия контура — Найти

1. Что называют электромагнитными колебаниями?
2. Чему равна энергия контура в произвольный момент времени?
3. Почему при подключении конденсатора к катушке он разряжается постепенно?



1. На рисунке приведён график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре. Сколько раз энергия катушки достигает максимального значения в течение первых 6 мкс после начала отсчёта?
1) 1 раз 3) 3 раза
2) 2 раза 4) 4 раза

2. На рисунке (см. рис. задания 1) приведён график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре. Какое утверждение о соотношении меняющихся в ходе колебаний величин верно для момента времени $t = 2$ с?
1) энергия катушки минимальна, энергия конденсатора максимальна
2) энергия катушки максимальна, энергия конденсатора минимальна
3) энергия катушки равна энергии конденсатора
4) сумма энергий катушки и конденсатора минимальна

3. Отношение максимальных значений силы тока и напряжения в колебательном контуре равно 10^2. Отношение индуктивности катушки к электроёмкости конденсатора в этом контуре равно
1) 10^4 2) 10^2 3) 10^{-4} 4) 10^{-2}

§ 18 АНАЛОГИЯ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

При каких начальных условиях возможны электрические колебания в колебательном контуре?
Какие физические процессы происходят в колебательном контуре?
Какие физические величины изменяются?

Электромагнитные колебания в контуре имеют сходство со свободными механическими колебаниями, например с колебаниями тела, закреплённого на пружине (пружинный маятник). Хотя причины, вызывающие колебания, имеют разную физическую природу, характер периодического изменения различных величин одинаков.

При механических колебаниях периодически изменяются координата тела x и проекция его скорости v_x, а при электромагнитных колебаниях изменяются заряд q конденсатора и сила тока i в цепи. Одинаковый характер изменения величин (механических и электрических) объясняется тем, что имеется аналогия в условиях, при которых возникают механические и электромагнитные колебания.

Возвращение к положению равновесия тела на пружине вызывается силой упругости $F_{x\ \text{упр}}$, пропорциональной смещению тела от положения равновесия. Коэффициентом пропорциональности является жёсткость пружины k.

Разрядка конденсатора (появление тока) обусловлена напряжением u между пластинами конденсатора, которое пропорционально заряду q. Коэффициентом пропорциональности является величина $\frac{1}{C}$, обратная ёмкости, так как $u = \frac{1}{C}q$.

Подобно тому как вследствие инертности тело лишь постепенно увеличивает скорость под действием силы и эта скорость после прекращения действия силы не становится сразу равной нулю, электрический ток в катушке за счёт явления самоиндукции увеличивается под действием напряжения постепенно и не исчезает сразу, когда это напряжение становится равным нулю. Индуктивность контура L выполняет ту же роль, что и масса тела при механических колебаниях. Соответственно кинетическая энергия тела $\frac{mv_x^2}{2}$ аналогична энергии магнитного поля тока $\frac{Li^2}{2}$.

Зарядка конденсатора от батареи аналогична сообщению телу, прикреплённому к пружине, потенциальной энергии $\frac{kx_m^2}{2}$ при смещении тела на расстояние x_m от положения равновесия (рис. 4.5, *а*). Сравнивая это выражение с энергией конденсатора $\frac{q_m^2}{2C}$, замечаем, что жёсткость k пружины играет при механических колебаниях ту же роль, что и величина $\frac{1}{C}$,

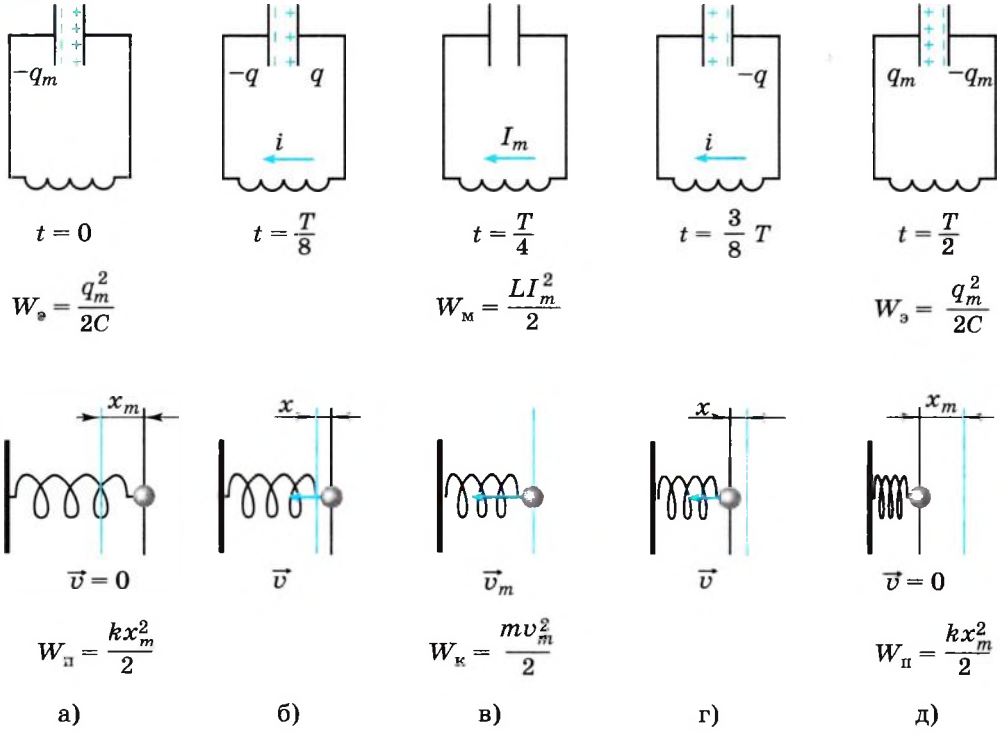


Рис. 4.5

обратная ёмкости, при электромагнитных колебаниях. При этом начальная координата x_m соответствует заряду q_m.

Возникновение в электрической цепи тока i соответствует появлению в механической колебательной системе скорости тела v_x под действием силы упругости пружины (рис. 4.5, *б*).

Момент времени, когда конденсатор полностью разрядится, а сила тока достигнет максимума, аналогичен тому моменту времени, когда тело будет проходить с максимальной скоростью (рис. 4.5, *в*) положение равновесия.

Далее конденсатор в ходе электромагнитных колебаний начнёт перезаряжаться, а тело в ходе механических колебаний — смещаться влево от положения равновесия (рис. 4.5, *г*). По прошествии половины периода T конденсатор полностью перезарядится и сила тока станет равной нулю.

При механических колебаниях этому соответствует отклонение тела в крайнее левое положение, когда его скорость равна нулю (рис. 4.5, *д*).

Нарисуйте аналогичные схемы состояний колебательных систем для моментов времени, равных $\frac{3}{4}T$ и T.

Обсудите с одноклассниками, можно ли провести аналогию между электрическими колебаниями в колебательном контуре и колебаниями математического маятника.

Соответствие между механическими и электрическими величинами при колебательных процессах приведено в таблице.

Механическая величина	Электрическая величина
Координата x	Заряд q
Скорость υ_x	Сила тока i
Масса m	Индуктивность L
Жёсткость пружины k	Величина, обратная ёмкости, $\frac{1}{C}$
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{m\upsilon_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

Важно Таким образом, электромагнитные и механические колебания имеют разную природу, но описываются одинаковыми уравнениями.

Колебательный контур. Маятник. Аналогия между колебаниями

1. В чём проявляется аналогия между электромагнитными колебаниями в контуре и колебаниями пружинного маятника?
2. За счёт какого явления электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю, а тело не останавливается, проходя положение равновесия?
3. Какие превращения энергии происходят при механических и электромагнитных колебаниях, если затухание мало?
4. Какая величина, характеризующая электромагнитные колебания, аналогична ускорению тела при механических колебаниях?
5. Можно ли говорить о том, что электромагнитные колебания происходят благодаря ЭДС самоиндукции подобно тому, как мы говорим, что механические колебания происходят благодаря действию силы упругости?

§ 19 ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ. ФОРМУЛА ТОМСОНА

В какой момент времени сила тока в колебательном контуре максимальна? В какой момент времени ток в контуре не идёт?

Рассмотрим уравнения, которые позволят рассчитать значения физических величин при колебаниях в контуре.

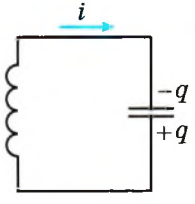


Рис. 4.6

Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре. Рассмотрим колебательный контур, сопротивлением R которого можно пренебречь (рис. 4.6).

Уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре, можно получить с помощью закона сохранения энергии. Полная электромагнитная энергия W контура в любой момент времени равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}.$$

Эта энергия не меняется с течением времени, если сопротивление R контура равно нулю. Значит, производная полной энергии по времени равна нулю. Следовательно, равна нулю сумма производных по времени от энергий магнитного и электрического полей:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0,$$

или

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'. \qquad (4.5)$$

Физический смысл уравнения (4.5) состоит в том, что скорость изменения энергии магнитного поля по модулю равна скорости изменения энергии электрического поля; знак «−» указывает на то, что, когда энергия электрического поля возрастает, энергия магнитного поля убывает (и наоборот).

Вычислив производные в уравнении (4.5), получим

$$\frac{L}{2} \cdot 2ii' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq'. \qquad (4.6)$$

Важно Мы вычисляем производные по времени. Поэтому производная $(i^2)'$ равна не просто $2i$, как было бы при вычислении производной по i. Нужно $2i$ умножить ещё на производную i' силы тока по времени, так как вычисляется производная от сложной функции. То же самое относится к производной $(q^2)'$.

Но производная заряда по времени представляет собой силу тока в данный момент времени:

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'. \qquad (4.7)$$

Поэтому уравнение (4.6) можно переписать в следующем виде:

$$Li'i = -\frac{qi}{C}, \quad \text{или} \quad Li' = -\frac{q}{C}. \tag{4.8}$$

Производная силы тока по времени есть не что иное, как вторая производная заряда по времени, подобно тому как производная скорости по времени (ускорение) есть вторая производная координаты по времени. Подставив в уравнение (4.8) $i' = q''$ и разделив левую и правую части этого уравнения на L, получим *основное уравнение, описывающее свободные гармонические электрические колебания в контуре*:

Выведите уравнение (4.9), приравнивая разность потенциалов между пластинами конденсатора к ЭДС самоиндукции.

$$q'' = -\frac{1}{LC}q. \tag{4.9}$$

Уравнение (4.9) аналогично уравнению (3.11), описывающему гармонические механические колебания.

Формула Томсона. В уравнении (3.11) коэффициент ω_0^2 представляет собой квадрат собственной частоты колебаний. Поэтому и коэффициент $\frac{1}{LC}$ в уравнении (4.9) также представляет собой квадрат циклической частоты для свободных электрических колебаний:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{4.10}$$

Период свободных колебаний в контуре, таким образом, равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \tag{4.11}$$

Запомни Формула (4.11) называется **формулой Томсона** в честь английского физика У. Томсона (Кельвина), который её впервые вывел.

Увеличение периода свободных колебаний с возрастанием L и C наглядно можно пояснить так. При увеличении индуктивности L ток медленнее нарастает со временем и медленнее падает до нуля. А чем больше ёмкость C, тем большее время требуется для перезарядки конденсатора.

Гармонические колебания заряда и тока. Подобно тому как координата при механических колебаниях (в случае, когда в начальный момент времени отклонение тела маятника от положения равновесия максимально) изменяется со временем по гармоническому закону:

$$x = x_m \cos \omega_0 t,$$

заряд конденсатора меняется с течением времени по такому же закону:

$$q = q_m \cos \omega_0 t, \tag{4.12}$$

где q_m — амплитуда колебаний заряда.

Сила тока также совершает гармонические колебания:

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin \omega_0 t = I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \qquad (4.13)$$

где $I_m = q_m \omega_0$ — амплитуда колебаний силы тока. Колебания силы тока опережают по фазе на $\frac{\pi}{2}$ колебания заряда (рис. 4.7).

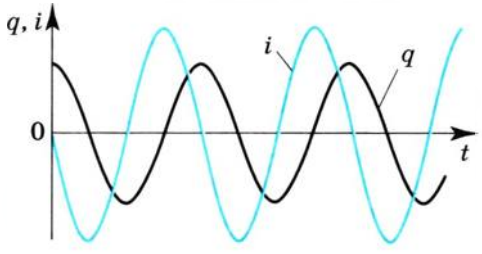


Рис. 4.7

Точно так же колебания скорости тела в случае пружинного или математического маятника опережают на $\frac{\pi}{2}$ колебания координаты (смещения) этого тела.

В действительности из-за неизбежного наличия сопротивления электрической цепи колебания будут затухающими. Сопротивление R также будет влиять и на период колебаний: чем больше сопротивление R, тем бóльшим будет период колебаний. При достаточно большом сопротивлении колебания совсем не возникнут. Конденсатор разрядится, но перезарядки его не произойдёт, энергия электрического и магнитного полей перейдёт в тепло.

Чему равны сила тока и напряжение при $t = 0$? Как записать закон изменения заряда, если в начальный момент времени $q = 0$, а сила тока максимальна?

Уравнение гармонических колебаний в контуре. Формула Томсона

1. В чём различие между свободными и вынужденными электрическими колебаниями?
2. Как изменится период свободных электрических колебаний в контуре, если ёмкость конденсатора в нём вдвое увеличить или же вдвое уменьшить?
3. Как связаны амплитуды колебаний заряда и тока при разрядке конденсатора через катушку?

1. Что из перечисленных предметов **обязательно** входит в состав цепи постоянного тока и колебательного контура? К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите выбранные цифры рядом с соответствующими буквами.

Физическое устройство	Его необходимый элемент
А) Цепь постоянного тока	1) Амперметр 2) Источник тока 3) Конденсатор 4) Постоянный магнит
Б) Колебательный контур	

§ 20 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ»

Для решения задач на данную тему, как правило, необходимо уметь составлять уравнения колебаний заряда на пластинах конденсатора и силы тока, идущего через катушку, учитывая начальные условия. Кроме этого, нужно знать выражения для энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки и понимать, за счёт чего происходят изменения этих энергий.

Задача 1. Максимальный заряд на обкладках конденсатора колебательного контура $q_m = 10^{-6}$ Кл. Амплитудное значение силы тока в контуре $I_m = 10^{-3}$ А. Определите период колебаний. (Потерями на нагревание проводников можно пренебречь.)

Р е ш е н и е. Амплитудные значения силы тока и заряда связаны соотношением $I_m = \omega_0 q_m$, откуда $\omega_0 = \dfrac{I_m}{q_m}$.

Следовательно, $T = \dfrac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \dfrac{q_m}{I_m} \approx 6{,}3 \cdot 10^{-3}$ (с).

Задача 2. В колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивностью $L = 2$ Гн и конденсатора ёмкостью $C = 4{,}5$ мкФ, максимальное значение заряда на пластинах конденсатора $q_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Определите максимальную силу тока, а также силу тока в тот момент, когда заряд на пластинах равен половине максимального.

Р е ш е н и е. В идеальном колебательном контуре энергия электрического поля полностью переходит в энергию магнитного поля и обратно. Поэтому $\dfrac{q_0^2}{2C} = \dfrac{LI_0^2}{2}$. Отсюда $I_0 = \dfrac{q_0}{\sqrt{LC}} \approx 6{,}7 \cdot 10^{-4}$ А.

Полная энергия электромагнитного поля при колебаниях в колебательном контуре остаётся постоянной и равной сумме энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки. Тогда $\dfrac{q_0^2}{2C} = \dfrac{LI^2}{2} + \dfrac{q^2}{2C}$.

Если в какой-то момент времени $q = q_0/2$, то $\dfrac{q_0^2}{2C} = \dfrac{LI^2}{2} + \dfrac{q_0^2}{8C}$ и $\dfrac{3q_0^2}{8C} = \dfrac{LI^2}{2}$.

Сила тока в этот момент $I = \dfrac{\sqrt{3}q_0}{2\sqrt{CL}} = 5{,}8 \cdot 10^{-4}$ А.

Задача 3. Как изменяется амплитуда колебаний силы тока в катушке колебательного контура, если в момент, когда заряд на пластинах конденсатора максимален, расстояние между ними увеличивается в 1,44 раза?

Р е ш е н и е. При увеличении расстояния между пластинами положительную работу совершают внешние силы и энергия увеличивается.

Энергия электрического поля конденсатора $W_э = \frac{q_0^2}{2C}$. При увеличении расстояния между пластинами в 1,44 раза электроёмкость уменьшается также в 1,44 раза, а энергия соответственно увеличивается.

Так как максимальная энергия электрического поля при колебаниях равна максимальной энергии магнитного поля, то и энергия магнитного поля увеличивается в 1,44 раза.

Индуктивность катушки не меняется, амплитуда колебаний силы тока $I_{02} = \sqrt{1{,}44}\ I_{01} = 1{,}2\, I_{01}$.

Задача 4. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0{,}2$ Гн и конденсатора ёмкостью $C = 2 \cdot 10^{-5}$ Ф. Конденсатор зарядили до напряжения 4 В, т. е. в момент времени $t = 0$ напряжение $U_0 = 4$ В. Какими будут сила тока в контуре, напряжение и заряд на пластинах конденсатора в момент времени, когда отношение энергий электрического и магнитного полей равно 0; 1/2?

Р е ш е н и е. Напряжение и заряд на обкладках конденсатора изменяются по закону $U = U_0 \cos \omega t$, $q = q_0 \cos \omega t$, где U_0 и q_0 — амплитудные значения напряжения и заряда, а $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Сила тока изменяется по формуле $I = -q_0\omega \sin \omega t = -I_0 \sin \omega t$.

Энергии электрического и магнитного полей равны $W_э = \frac{CU^2}{2}$, $W_м = \frac{LI^2}{2}$. Отношение энергий $\frac{W_э}{W_м} = \frac{CU^2}{LI^2}$.

1) При $\frac{W_э}{W_м} = 0$ $W_э = 0$. Это означает, что заряд и напряжение на обкладках конденсатора равны нулю: $q_1 = 0$, $U_1 = 0$. Энергия магнитного поля максимальна и равна $W_м = \frac{LI_0^2}{2}$, т. е. равна энергии электрического поля в начальный момент времени: $W_м = W_э = \frac{CU_0^2}{2}$, откуда амплитудное значение силы тока $I_0 = I_1 = U_0\sqrt{\frac{C}{L}} = 0{,}04$ А. Здесь q_1, U_1, I_1 – значения заряда, напряжения и силы тока в момент времени, когда отношение $\frac{W_э}{W_м} = 0$.

2) При $\frac{W_э}{W_м} = 1/2$ отношение напряжения к силе тока $\frac{U}{I} = \pm\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{L}{C}} =$ $= \pm\frac{U_0}{I_0}\operatorname{ctg}\ \omega t$.

В свою очередь, $\frac{U_0}{I_0} = \sqrt{\frac{L}{C}}$, тогда $\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{L}{C}} = \pm\sqrt{\frac{L}{C}}\operatorname{ctg}\omega t$, $\operatorname{ctg}\omega t = \pm\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Первый раз отношение энергий будет равно $\frac{1}{2}$ в момент времени t_1 при условии, что $0 < \omega t_1 < \frac{\pi}{2}$. Тогда $\omega t_1 = \operatorname{arcctg}\frac{1}{\sqrt{2}}$, и $\omega t_1 \approx 54{,}7°$.

Рассчитаем значения силы тока, напряжения и заряда при $\frac{W_э}{W_м} = \frac{1}{2}$:

$I_2 = -I_0 \sin\omega t_1 \approx -3{,}3 \cdot 10^{-2}$ А, $U_2 = U_0 \cos\omega t_1 \approx 2{,}3$ В,

$q_2 = q_0 \cos\omega t_1 = \frac{I_0}{\omega}\cos\omega t_1 \approx 4{,}7 \cdot 10^{-5}$ Кл.

Здесь q_2, U_2, I_2 – значения заряда, напряжения и силы тока в момент времени t_1, когда отношение $\frac{W_э}{W_м} = \frac{1}{2}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. После того как конденсатору колебательного контура был сообщён заряд $q = 10^{-5}$ Кл, в контуре возникли затухающие колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре к тому времени, когда колебания в нём полностью затухнут? Ёмкость конденсатора $C = 0{,}01$ мкФ.

2. В колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивностью $L = 2$ Гн и конденсатора ёмкостью $C = 4{,}5$ мкФ, максимальное значение заряда на обкладках конденсатора $q_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Запишите законы изменения напряжения на конденсаторе и силы тока в контуре от времени.

3. В колебательном контуре происходят колебания с амплитудой напряжения U_1. В момент времени, когда заряд на пластинах конденсатора максимален, их сдвигают, уменьшая расстояние между ними в $N = 2$ раза, при этом заряд на пластинах не успевает измениться. Определите амплитуду напряжения. Во сколько раз изменится частота колебаний после сдвига пластин?

4. Определите отношение энергий магнитного и электрического полей $W_м/W_э$ в колебательном контуре в момент времени $T/6$, где T — период колебаний контура. В начальный момент времени сила тока $I = 0$.

1. Энергия электромагнитного поля в колебательном контуре, содержащем катушку индуктивностью 0,1 Гн и конденсатор ёмкостью 0,9 мкФ, равна 1,8 мкДж. В момент, когда напряжение на конденсаторе максимально, подключают на короткое время источник напряжением 5 В. Определите изменение амплитудного значения силы тока, идущего через катушку.

2. Конденсатор контура с периодом колебаний 10^{-5} с заполнили диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1{,}6$. Индуктивность катушки увеличили в 1000 раз, вставив железный сердечник. Чему стал равен период колебаний энергии магнитного поля в контуре?

§ 21 ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Что происходит с амплитудой колебаний в колебательном контуре?



Рис. 4.8

Переменный ток в осветительной сети квартиры, применяемый на заводах и фабриках и т. д., представляет собой не что иное, как вынужденные электромагнитные колебания. Сила тока и напряжение меняются со временем по гармоническому закону, частота колебаний определяется частотой подключённого в цепь источника напряжения.

Колебания напряжения легко обнаружить с помощью осциллографа. Если на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение от сети, то временна́я развёртка на экране будет представлять собой синусоиду (рис. 4.8). Зная скорость движения луча по экрану в горизонтальном направлении (она определяется частотой пилообразного напряжения), можно вычислить частоту колебаний. Частота переменного тока — это число колебаний в 1 с.

Если напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону, то и напряжённость электрического поля внутри проводников будет также меняться гармонически. Эти гармонические изменения напряжённости поля, в свою очередь, вызывают гармонические колебания скорости упорядоченного движения заряженных частиц и, следовательно, гармонические колебания силы тока. Но при изменении напряжения на концах цепи электрическое поле не меняется мгновенно во всей цепи. Изменения поля распространяются хотя и с очень большой, но не с бесконечно большой скоростью.

Однако, если время распространения изменений поля в цепи много меньше периода колебаний напряжения, можно считать, что электрическое поле во всей цепи сразу же меняется при изменении напряжения на концах цепи. При этом сила тока в данный момент времени будет иметь практически одно и то же значение во всех сечениях неразветвлённой цепи.

Переменное напряжение в гнёздах розетки осветительной сети создаётся генераторами на электростанциях.

Интересно Стандартная частота промышленного переменного тока равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз идёт в одну сторону и 50 раз — в противоположную. Частота 50 Гц принята для промышленного тока во многих странах мира. В США принята частота 60 Гц.

На основании какой формулы мы можем доказать, что гармонические изменения напряжённости поля вызывают гармонические колебания средней скорости упорядоченного движения заряженных частиц и, следовательно, гармонические колебания силы тока?

Модель генератора переменного тока. Проволочную рамку, вращающуюся в постоянном однородном магнитном поле, можно рассматривать как простейшую модель генератора переменного тока. Поток магнитной индукции Ф, пронизывающий поверхность, ограниченную проволочной рамкой площадью S, пропорционален косинусу угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции (рис. 4.9): $\Phi = BS\cos\alpha$.

При равномерном вращении рамки угол α увеличивается прямо пропорционально времени: $\alpha = \omega t$, где ω — угловая скорость вращения рамки. Поток магнитной индукции меняется по гармоническому закону:

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

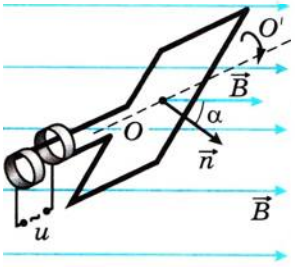


Рис. 4.9

Здесь величина ω играет уже роль циклической частоты.

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в рамке равна взятой со знаком «−» скорости изменения потока магнитной индукции, т. е. производной потока магнитной индукции по времени:

$$e = -\Phi' = -BS\,(\cos\omega t)' = BS\omega\sin\omega t = \mathscr{E}_m\sin\omega t,$$

где $\mathscr{E}_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции. Возникающее переменное напряжение снимается с помощью контактных колец.

Если к рамке подключить колебательный контур, то угловая скорость ω вращения рамки определит частоту ω колебаний значений ЭДС, напряжения на различных участках цепи и силы тока.

Мы будем изучать в дальнейшем вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, меняющегося с циклической частотой ω по формуле синуса или косинуса:

$$u = U_m\sin\omega t \text{ или } u = U_m\cos\omega t, \qquad (4.14)$$

где U_m — амплитуда напряжения, т. е. максимальное по модулю значение напряжения.

Если напряжение меняется с циклической частотой ω, то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Но колебания силы тока необязательно должны совпадать по фазе с колебаниями напряжения. Поэтому в общем случае сила тока i в любой момент времени (мгновенное значение силы тока) определяется по формуле

$$i = I_m\sin(\omega t + \varphi_c), \qquad (4.15)$$

где I_m — амплитуда силы тока, т. е. максимальное по модулю значение силы тока, а φ_c — разность (сдвиг) фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

Резистор в цепи переменного тока. Пусть цепь состоит из соединительных проводов и нагрузки с малой индуктивностью и большим сопротивлением R (рис. 4.10).

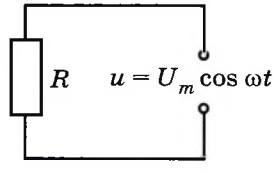


Рис. 4.10

Запомни Величину, которую мы до сих пор называли электрическим сопротивлением или просто сопротивлением, теперь будем называть **активным сопротивлением.**

Сопротивление R называется активным, потому что при наличии нагрузки, обладающей этим сопротивлением, цепь поглощает энергию, поступающую от генератора. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию проводников — они нагреваются. Будем считать, что напряжение на зажимах цепи меняется по гармоническому закону:

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

Подумайте: учитываем ли мы при написании формулы $u = U_m \cos \omega t$ сопротивление соединительных проводов?

Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения. Поэтому для нахождения мгновенного значения силы тока можно применить закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \qquad (4.16)$$

Важно В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения (рис. 4.11), а амплитуда силы тока определяется равенством

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \qquad (4.17)$$

Мощность в цепи с резистором. В цепи переменного тока промышленной частоты ($\nu = 50$ Гц) сила тока и напряжение изменяются сравнительно быстро. Поэтому при прохождении тока по проводнику, например по нити электрической лампочки, количество выделенной энергии также будет быстро меняться со временем.

Как правило, нас интересует значение *средней мощности* тока на участке цепи за большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно найти среднюю мощность за один период.

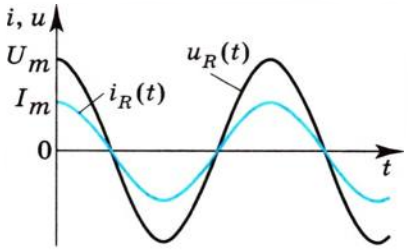


Рис. 4.11

Важно Под средней за период мощностью переменного тока понимают отношение суммарной энергии, поступающей в цепь за период, к периоду.

Мгновенная мощность в цепи переменного тока на участке, имеющем активное сопротивление R, определяется формулой

$$P_{\text{мгн}} = i^2_{\text{мгн}} R. \qquad (4.18)$$

Найдём среднее значение мощности за период. Для этого сначала преобразуем формулу (4.18), подставляя в неё выражение (4.16) для силы тока и используя известное тригонометрическое соотношение $\cos^2\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$:

$$P = \frac{I_m^2 R}{2}(1 + \cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2}\cos 2\omega t. \qquad (4.19)$$

Вспомните и запишите выражение для мощности постоянного тока.

График зависимости мгновенной мощности от времени изображён на рисунке 4.12, *а*. Согласно графику (рис. 4.12, *б*) на протяжении одной восьмой периода, когда $\cos 2\omega t > 0$, мощность в любой момент времени больше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Зато на протяжении следующей восьмой части периода, когда $\cos 2\omega t < 0$, мощность в любой момент времени меньше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Среднее за период значение $\cos 2\omega t$ равно нулю (см. рис. 4.12, *б*), а значит, равно нулю второе слагаемое в уравнении (4.19).

Средняя мощность $\bar{P}$ равна, таким образом, первому слагаемому в формуле (4.19):

$$\bar{P} = \overline{i^2} R = \frac{I_m^2 R}{2}. \qquad (4.20)$$

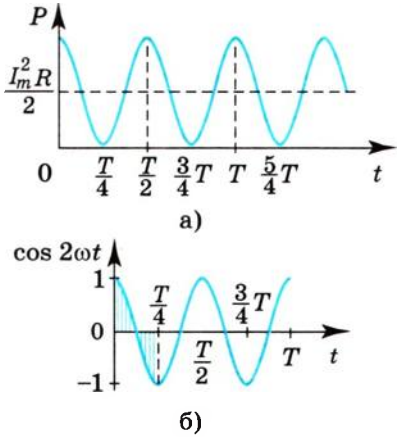


Рис. 4.12

Действующие значения силы тока и напряжения. Из формулы (4.20) видно, что величина $\frac{I_m^2}{2}$ есть среднее за период значение квадрата силы тока:

$$\overline{i^2} = \frac{I_m^2}{2}. \qquad (4.21)$$

Запомни

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется **действующим значением** силы переменного тока.

Действующее значение силы переменного тока обозначается через I:

$$I = \sqrt{\overline{i^2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.22)$$

Важно

Действующее значение силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, при котором в проводнике выделяется то же количество теплоты, что и при переменном токе за то же время.

Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично действующему значению силы тока:

$$U = \sqrt{u^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.23)$$

Почему удобнее пользоваться не мгновенными значениями силы тока и напряжения, а действующими значениями?

Заменяя в формуле (4.17) амплитудные значения силы тока и напряжения на их действующие значения, получаем

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (4.24)$$

Это закон Ома для участка цепи переменного тока с резистором.

Амперметры и вольтметры регистрируют именно действующие значения силы переменного тока и напряжения.

Среднее значение мощности P переменного тока

$$P = I^2R = UI.$$

Переменный ток. Действующие значения силы тока и напряжения

Найти

1. При каких условиях в электрической цепи возникают вынужденные электромагнитные колебания?
2. Одинаково ли мгновенное значение силы переменного тока в данный момент времени во всех участках неразветвлённой цепи?
3. Чему равна амплитуда напряжения в осветительных сетях переменного тока, рассчитанных на напряжение 220 В?
4. Что называют действующими значениями силы тока и напряжения?

1. Напряжение на выходных клеммах генератора меняется по закону $u = 280\cos(100t)$. Действующее значение напряжения в этом случае равно
1) 396 В 2) 280 В 3) 200 В 4) 100 В

2. По участку цепи сопротивлением R идёт переменный ток, меняющийся по гармоническому закону. В некоторый момент времени действующее значение напряжения на этом участке увеличили в 2 раза, а сопротивление участка уменьшили в 4 раза. При этом мощность тока
1) не изменилась
2) возросла в 16 раз
3) возросла в 4 раза
4) уменьшилась в 2 раза

§ 22 КОНДЕНСАТОР И КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как изменяется за период заряд на конденсаторе в колебательном контуре? Как изменяется за период сила тока в катушке индуктивности?

Конденсатор в цепи переменного тока. Постоянный ток, в отличие от переменного, не может идти по цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой. В этом можно убедиться с помощью простого опыта.

Пусть у нас имеются источники постоянного и переменного напряжений. Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания (рис. 4.13), соединённых последовательно. При включении постоянного напряжения (переключатель повёрнут влево, цепь подключена к точкам AA') лампа не светится. Но при включении переменного напряжения (переключатель повёрнут вправо, цепь подключена к точкам BB') лампа загорается, если ёмкость конденсатора и действующее напряжение источника достаточно велики. Как же переменный ток может идти по цепи, если она фактически разомкнута? Всё дело в том, что происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, идущий в цепи при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

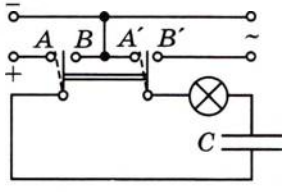


Рис. 4.13

Установим, как меняется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводов и обкладок конденсатора можно пренебречь (рис. 4.14).

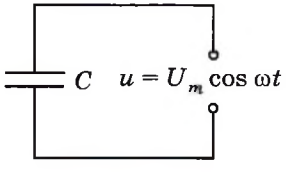


Рис. 4.14

Напряжение на конденсаторе $u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$ равно напряжению на концах цепи. Следовательно,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t. \qquad (4.25)$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = CU_m \cos \omega t. \qquad (4.26)$$

Сила тока, представляющая собой производную заряда по времени, равна:

$$i = q' = -U_m C\omega \sin \omega t = U_m C\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (4.27)$$

Важно Колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.15).

Амплитуда силы тока равна:

$$I_m = U_m C\omega. \qquad (4.28)$$

Если ввести обозначение

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \qquad (4.29)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим

$$I = \frac{U}{X_C}. \qquad (4.30)$$

Запомни Величину X_C, обратную произведению ωC циклической частоты на электрическую ёмкость конденсатора, называют **ёмкостным сопротивлением.**

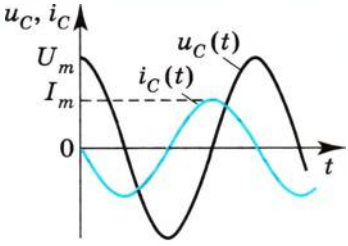


Рис. 4.15

Роль этой величины для амплитудных и действующих значений силы тока и напряжения аналогична роли активного сопротивления R в законе Ома (см. формулу (4.17)). Это позволяет рассматривать величину X_C как сопротивление конденсатора переменному току (ёмкостное сопротивление).

Чем больше ёмкость конденсатора, тем больше ток перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала лампы при увеличении ёмкости конденсатора. В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_C. С увеличением ёмкости оно уменьшается. Уменьшается оно и с увеличением частоты ω.

Следует отметить, что на протяжении четверти периода, когда конденсатор заряжается до максимального напряжения, энергия поступает в цепь и запасается в конденсаторе в форме энергии электрического поля. В следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

Предложите способы изменения ёмкостного сопротивления в электрической цепи.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока. Индуктивность в цепи, так же как и ёмкость, влияет на силу переменного тока. Это можно доказать с помощью простого опыта.

Соберём цепь из катушки с большой индуктивностью и электрической лампы накаливания (рис. 4.16). С помощью переключателя можно подключить эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть равны. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы переменного тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока.

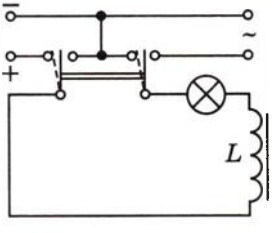


Рис. 4.16

Объясняется это различие явлением самоиндукции.

Вспомните, от чего зависит скорость установления постоянного тока в цепи, содержащей катушку индуктивности.

При подключении катушки индуктивности к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Возникающее при этом вихревое электрическое поле тормозит движение электронов. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает наибольшего (установившегося) значения, соответствующего данному постоянному напряжению.

Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигнуть тех значений, которые она приобрела бы с течением времени при постоянном напряжении.

Следовательно, максимальное значение силы переменного тока (его амплитуда) ограничивается индуктивностью цепи и будет тем меньше, чем больше индуктивность и чем больше частота приложенного напряжения.

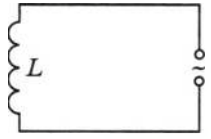


Рис. 4.17

Определим силу тока в цепи, содержащей катушку, активным сопротивлением которой можно пренебречь (рис. 4.17). Для этого предварительно найдём связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней.

Если сопротивление катушки равно нулю, то и напряжённость электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна быть равна нулю. Иначе сила тока согласно закону Ома была бы бесконечно большой. Равенство нулю напряжённости поля оказывается возможным потому, что напряжённость $\vec{E}_i$ вихревого электрического поля, порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению напряжённости $\vec{E}_к$ кулоновского поля, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

Из равенства $\vec{E}_i = -\vec{E}_к$ следует, что

Важно работа сил вихревого поля по перемещению единичного электрического заряда равна по модулю и противоположна по знаку удельной работе кулоновского поля.

Учитывая, что удельная работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, можно записать: $e_i = -u$.

Вспомните, чему равна работа кулоновских сил в замкнутом контуре.

При изменении силы тока по гармоническому закону $i = I_m \sin \omega t$ ЭДС самоиндукции равна:

$$e_i = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t. \qquad (4.31)$$

Так как $u = -e_i$, то напряжение на концах катушки оказывается равным:

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где $U_m = L\omega I_m$ — амплитуда напряжения.

Важно Колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.18).

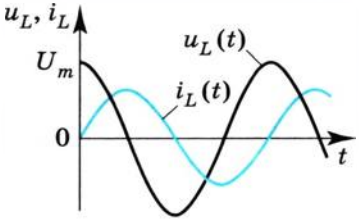


Рис. 4.18

Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \qquad (4.32)$$

Если ввести обозначение

$$\omega L = X_L \qquad (4.33)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим

$$I = \frac{U}{X_L}. \qquad (4.34)$$

Запомни Величину X_L, равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют **индуктивным сопротивлением.**

Согласно формуле (4.34) действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения и индуктивным сопротивлением соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты ω. Постоянный ток вообще «не замечает» индуктивности катушки. При ω = 0 индуктивное сопротивление равно нулю ($X_L = 0$).

Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ЭДС самоиндукции и тем меньше амплитуда силы тока.

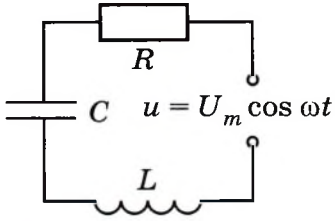


Рис. 4.19

Резистор, конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока. Рассмотрим цепь, содержащую все элементы: резистор сопротивлением R, катушку индуктивностью L, конденсатор ёмкостью C и источник переменного напряжения $u = U_m \cos \omega t$ (рис. 4.19). В любой момент времени ЭДС источника равна сумме напряжений на отдельных элементах цепи:

$$\mathscr{E} = u_R + u_L + u_C.$$

Важно Так как эти напряжения отличаются по фазе, то сумма амплитудных значений напряжений *не будет* равна амплитудному значению ЭДС источника.

Полное сопротивление цепи состоит из активного, ёмкостного и индуктивного сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Из этой формулы видно, что полное сопротивление цепи зависит от частоты подаваемого источником напряжения.

Для силы тока в цепи имеем выражение $i = I_m \cos(\omega t - \varphi_0)$, где $I_m = \frac{U_m}{Z}$, а φ_0 — разность фаз между током и напряжением — определяется равенством $\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{X_L - X_C}{R}$.

Подумайте, как объяснить, что при равенстве ёмкостного и индуктивного сопротивлений колебания тока и напряжения источника происходят в фазе.

Средняя мощность, выделяемая в цепи на активном сопротивлении R, равна:

$$P = i^2 Z \cos \varphi_0 = IU \cos \varphi_0, \qquad (4.35)$$

где $\cos \varphi_0$ называется коэффициентом мощности. Если $X_L - X_C = 0$, то $\varphi_0 = 0$ и выражение для мощности имеет вид

$$P = IU.$$

В этом случае в цепи выделяется максимальная мощность, наступает явление резонанса.

Ёмкостное и индуктивное сопротивления. Полное сопротивление

1. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?
2. Выделяется ли энергия в цепи, содержащей только конденсатор, если активным сопротивлением цепи можно пренебречь?
3. Выключатель цепи представляет собой своего рода конденсатор. Почему же выключатель надёжно размыкает цепь?
4. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на катушке индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь?

1. Ёмкость конденсатора, включённого в цепь переменного тока, равна 2 мкФ. Уравнение колебаний напряжения на конденсаторе $u = 75 \cos(2 \cdot 10^3 t)$, где все величины выражены в СИ. Определите амплитуду силы тока
1) 0,003 А 2) 0,3 А 3) 0,58 А 4) 50 А

2. Напряжение на конденсаторе в цепи переменного тока меняется с циклической частотой $\omega = 4000$ с$^{-1}$. Амплитуда колебаний напряжения и силы тока $U_m = 200$ В и $I_m = 4$ А. Определите ёмкость конденсатора.
1) 500 Ф 2) 0,5 мкФ 3) 5 мкФ 4) 2 мкФ

3. Индуктивность катушки равна 0,125 Гн. Уравнение колебаний силы тока в ней $i = 0{,}4 \cos(2 \cdot 10^3 t)$, где все величины выражены в СИ. Определите амплитуду напряжения на катушке.
1) 100 В 2) 50 В 3) 10 В 4) 0,1 В

§ 23 РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

При каких условиях происходит явление резонанса при вынужденных колебаниях математического маятника?
Что играет роль внешней силы при переменном электрическом токе на участке цепи?

В электрической цепи, так же как и в механической колебательной системе, наблюдается явление резонанса.

Вспомните, какие превращения энергии происходят в механической колебательной системе.

При механических колебаниях резонанс выражен отчётливо при малых силах сопротивления. В электрической цепи роль сил сопротивления играет её активное сопротивление R. Ведь именно наличие этого сопротивления в цепи приводит к превращению энергии тока во внутреннюю энергию проводника (проводник нагревается).

Поэтому резонанс в электрическом колебательном контуре (см. рис. 4.19) должен быть выражен отчётливо при малом активном сопротивлении R.

Сила тока при вынужденных колебаниях должна достигать максимальных значений, когда частота переменного напряжения, приложенного к контуру, равна собственной частоте ω_0 колебательного контура:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (4.36)$$

Запомни **Резонансом в электрическом колебательном контуре** называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока или напряжения при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура.

Амплитуда силы тока при резонансе. Как и в случае механического резонанса, при резонансе в колебательном контуре создаются оптимальные условия для поступления энергии от внешнего источника в контур. Мощность в контуре максимальна в том случае, когда сила тока совпадает по фазе с напряжением ($\varphi_0 = 0$).

Интересно Здесь наблюдается полная аналогия с механическими колебаниями: при резонансе в механической колебательной системе внешняя сила (аналог напряжения в цепи) совпадает по фазе со скоростью (аналог силы тока).

Не сразу после включения внешнего переменного напряжения в цепи устанавливается резонансное значение силы тока. Амплитуда колебаний силы тока нарастает постепенно — до тех пор, пока энергия, выделяющаяся за период на резисторе, не сравняется с энергией, поступающей в контур за это же время:

$$\frac{I_m^2 R}{2} T = \frac{U_m I_m}{2} T. \qquad (4.37)$$

Отсюда амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе определяется уравнением

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \qquad (4.38)$$

При $R \to 0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $(I_m)_{\text{рез}} \to \infty$. С увеличением R максимальное значение силы тока уменьшается. Зависимости амплитуды силы тока от частоты при различных сопротивлениях ($R_1 < R_2 < R_3$) показаны на рисунке 4.20.

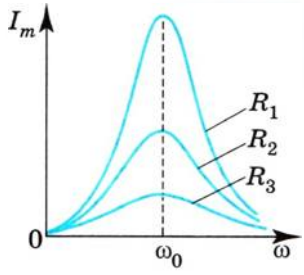
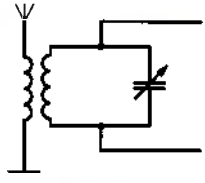


Рис. 4.20

Одновременно с увеличением силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения при малом активном сопротивлении во много раз превышают внешнее напряжение.


Рис. 4.21

Использование резонанса в радиосвязи. Явление электрического резонанса широко используется при осуществлении радиосвязи. Радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприёмника переменные токи различных частот, так как каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной индуктивно связан колебательный контур (рис. 4.21), в катушке которого возникают вынужденные колебания силы тока и напряжения. Но только при резонансе колебания силы тока в контуре и напряжения в нём будут значительными, т. е. из колебаний различных частот, возбуждаемых в антенне, контур выделяет только те, частота которых равна его собственной частоте. Настройка контура на нужную частоту ω_0 обычно осуществляется путём изменения ёмкости конденсатора. В этом обычно состоит настройка радиоприёмника на определённую радиостанцию.

Интересно

В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может принести большой вред. Если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса, то его возникновение может привести к аварии. Чрезмерно большие токи могут перегреть провода. Большие напряжения приводят к пробою изоляции.

Резонанс в электрической цепи

Найти

1. Может ли амплитуда силы тока при резонансе превысить силу постоянного тока в цепи с таким же активным сопротивлением и постоянным напряжением, равным амплитуде переменного напряжения?
2. Чему равна разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения при резонансе?
3. При каком условии резонансные свойства контура выражены наиболее отчётливо?

§ 24 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК»

Задачи на переменный ток очень разнообразны, однако для их решения достаточно знать закон Ома и то, как вычисляется полное сопротивление цепи переменного тока, а также разность фаз между током и напряжением. Также следует обращать внимание на то, что иногда в условии задачи даются амплитудные значения, а иногда действующие значения силы тока и напряжения.

Задача 1. Проволочная рамка площадью $S = 3000$ см^2 имеет $N = 200$ витков и вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Максимальная ЭДС в рамке $\mathscr{E}_m = 1{,}5$ В. Определите период вращения рамки.

Р е ш е н и е. Магнитный поток, пронизывающий поверхность, ограниченную рамкой, $\Phi = BSN \cos \omega t$.

Согласно закону электромагнитной индукции $e = -\Phi' = BSN\,\omega \sin \omega t$.

Амплитуда ЭДС индукции $\mathscr{E}_m = BSN\,\omega$. Отсюда $\omega = \dfrac{\mathscr{E}_m}{BSN}$.

Время одного оборота рамки $T = \dfrac{2\pi}{\omega} = \dfrac{2\pi BSN}{\mathscr{E}_m} \approx 3{,}8$ с.

Задача 2. В цепь переменного тока с частотой $\nu = 500$ Гц включена катушка индуктивностью $L = 10$ мГн. Определите ёмкость конденсатора, который надо включить в эту цепь, чтобы наступил резонанс.

Р е ш е н и е. Электрическая цепь согласно условию задачи представляет собой колебательный контур. Резонанс в этой цепи наступит, когда частота переменного тока будет равна собственной частоте колебательного контура ($\nu = \nu_0$). Но собственная частота $\nu_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Отсюда $C = \dfrac{1}{4\pi^2 L\nu^2} \approx$ $\approx 10^{-5}$ Ф $= 10$ мкФ.

Задача 3. В схеме на рисунке 4.19 (см. с. 94) сопротивление $R = 25$ Ом, индуктивность $L = 30$ мГн и ёмкость $C = 12$ мкФ, амплитуда переменного напряжения $U_m = 90$ В, его частота $\nu = 500$ Гц. Определите: 1) сопротивления каждого из участков цепи; 2) действующее значение силы тока в цепи; 3) действующее значение напряжения на каждом из участков цепи; 4) сдвиг фаз между током и напряжением; 5) мощность, выделяемую в цепи.

Р е ш е н и е. 1) Индуктивное и ёмкостное сопротивления равны соответственно: $X_L = 2\pi\nu L \approx 94$ Ом, $X_C = \dfrac{1}{2\pi\nu C} \approx 27$ Ом.

2) Полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \approx 72$ Ом. Действующее значение силы тока $I = \dfrac{U_m}{\sqrt{2}Z} \approx 0{,}88$ А.

3) Действующие значения напряжения $U_R = IR \approx 22$ В, $U_L = IX_L \approx 83$ В, $U_C = IX_C \approx 23$ В.

Обратите внимание на то, что сумма действующих напряжений в случае переменного тока не равна действующему напряжению источника.

4) Сдвиг фаз между током и напряжением $\cos\varphi = R/Z = 0{,}37$, $\varphi \approx 70°$.

5) Мощность, выделяемая в цепи, $P = IU\cos\varphi = 19$ Вт.

Задача 4. Определите силу тока в соленоиде, индуктивность и сопротивление которого равны соответственно $L = 0{,}6$ Гн, $R = 4$ Ом, если к нему приложено:

1) постоянное напряжение $U = 60$ В;

2) переменное напряжение $u = U_m \sin\omega t$, $U_m = 60$ В, частота $\nu = 20$ Гц.

Р е ш е н и е. 1) При постоянном напряжении значение силы тока определяем по закону Ома: $I = \dfrac{U}{R} = 15$ А.

Мощность $P_{\text{пост}} = IU = 900$ Вт.

2) При переменном напряжении суммарное сопротивление $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ и амплитуда силы тока $I_m = \dfrac{U_m}{Z}$.

Силу тока определяем из выражения $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, где начальная фаза $\varphi = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{\omega L}{R}\right)$, $\omega = 2\pi\nu$, $\varphi = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{2\pi\nu L}{R}\right) = 87° = 0{,}48\pi$, $I_m = \dfrac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = 0{,}8$ А. Тогда $i = 0{,}8\sin(40\pi t - 0{,}48\pi)$ А.

Задача 5. В цепи (см. рис. 4.19, с. 94) сопротивление $R = 20$ Ом, индуктивность $L = 0{,}2$ Гн, ёмкость $C = 100$ мкФ, действующее напряжение $U = 75$ В и частота $\nu = 50$ Гц. Определите действующее значение силы тока и разность фаз между напряжением и током.

Р е ш е н и е. Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi\nu L$, ёмкостное сопротивление $X_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{2\pi\nu C}$.

Полное сопротивление участка цепи определим по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 37 \text{ Ом}.$$

Тогда действующее значение силы тока $I = \dfrac{U}{Z} = 2$ А.

Сдвиг фаз между напряжением и током определим по формуле

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = 1{,}55;\ \varphi = 57°.$$

Задача 6. Электрическая цепь состоит из резистора сопротивлением $R = 10$ Ом, катушки индуктивностью $L = 2$ Гн, конденсатора ёмкостью $C_1 = 3$ мкФ и источника с действующим напряжением $U = 200$ В и частотой $\nu = 50$ Гц. Чему равна электроёмкость C_2 конденсатора, который при

параллельном подключении к конденсатору электроёмкостью C_1 обеспечит резонанс в электрической цепи? Чему при этом будет равно действующее значение силы тока?

Р е ш е н и е. Действующее значение силы тока

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2}}.$$

Сила тока в цепи максимальна при условии $2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C} = 0$.

При собственной частоте

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (1)$$

в цепи наблюдается резонанс, при котором сила тока максимальна и её действующее значение равно $I = \frac{U}{R} = \frac{200}{10} = 20$ А.

Из соотношения (1) следует, что ёмкость системы конденсаторов должна быть равна $C = \frac{1}{4\pi^2\nu_0^2 L} = 5 \cdot 10^{-6}$ Ф $= 5$ мкФ.

При параллельном подключении конденсаторов $C = C_1 + C_2$, откуда $C_2 = C - C_1 = 2$ мкФ.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите амплитуду ЭДС, наводимой в рамке, вращающейся в однородном магнитном поле, если частота вращения составляет 50 об/с, площадь рамки 100 см^2 и магнитная индукция 0,2 Тл.

2. Катушка индуктивностью $L = 0{,}08$ Гн присоединена к источнику переменного напряжения с частотой $\nu = 1000$ Гц. Действующее значение напряжения $U = 100$ В. Определите амплитуду силы тока I_m в цепи.

3. Катушка индуктивностью 0,1 Гн и активным сопротивлением 25 Ом включена в сеть переменного тока частотой 50 Гц. Определите действующее значение силы тока в катушке, если амплитуда напряжения на её вводах 120 В.

4. К источнику переменного напряжения, изменяющегося по формуле $u = 2\sin 200\pi t$ (В), подключили последовательно катушку индуктивностью 86 мГн, конденсатор ёмкостью 160 мкФ и резистор сопротивлением 100 Ом. Определите полное сопротивление цепи, частоту переменного тока, амплитудное значение силы тока.

1. При подключении к колебательному контуру источника переменной ЭДС $e = 100 \sin (800\pi t)$, где все величины выражены в СИ, наблюдается резонанс токов. Определите частоту собственных колебаний в данном контуре.

2. Резистор сопротивлением $R = 100$ Ом и два параллельно подключённых конденсатора ёмкостью $C = 40$ мкФ соединены последовательно и подключены к источнику с максимальным напряжением $U_m = 220$ В и частотой $\nu = 50$ Гц. Определите тепловую мощность, выделяемую в резисторе.

§ 25 АВТОКОЛЕБАНИЯ

Что необходимо для того, чтобы колебания не затухали?
В каких случаях возникают вынужденные механические и электромагнитные колебания?

Мы знаем, что во всех реальных колебательных системах колебания затухают. Если в систему включён периодически действующий источник, то колебания не затухают, происходят вынужденные колебания. В этом параграфе мы познакомимся с ещё одним видом незатухающих колебаний — автоколебаниями.

Запомни

Автоколебания — незатухающие колебания в системе, поддерживаемые за счёт постоянного источника энергии.

Системы, в которых генерируются незатухающие колебания за счёт поступления энергии от источника внутри самой системы, называются **автоколебательными**.

Механические автоколебания. Примерами автоколебаний в механических системах являются незатухающие колебания маятника часов, струн при равномерном движении смычка, воздуха в органных трубах и т. д.

Рассмотрим механические автоколебания на примере маятниковых часов (рис. 4.22). На рисунке видно, что подвешенная гиря стремится вращать зубчатое колесо. К маятнику прикреплён анкер — перекладина с изогнутыми пластинами. При колебаниях анкер зацепляет зубец колеса, и маятник получает толчок. При этом энергия, сообщаемая маятнику, равна изменению потенциальной энергии гири и компенсирует потери энергии при колебаниях за счёт сил сопротивления.

Почему амплитуда колебаний маятника часов не увеличивается, даже если вы вначале отклоняете его на большой угол?

Автоколебательные системы в электрической цепи. Генератор на транзисторе также пример автоколебательной системы, в которой происходят электромагнитные колебания. Он состоит из колебательного контура с конденсатором ёмкостью C и катушкой индуктивностью L, источника энергии и транзистора.

Пусть в системе, в которой могут существовать свободные электромагнитные колебания, имеется источник энергии. Если сама система будет регулировать поступление энергии в колебательный контур для компенсации потерь энергии на резисторе, то в ней могут возникнуть незатухающие колебания.

Известно, что если конденсатор колебательного контура зарядить, то в контуре возникнут затухающие колебания. В конце каждого периода колебаний заряд



Рис. 4.22

на пластинах конденсатора имеет меньшее значение, чем в начале периода. В результате энергия колебаний уменьшается, так как она согласно формуле (4.1) (см. с. 75), пропорциональна квадрату заряда одной из пластин конденсатора. Чтобы колебания не затухали, нужно компенсировать потери энергии за каждый период.

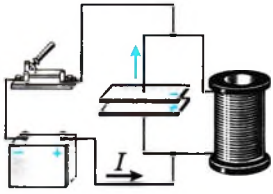


Рис. 4.23

Пополнять энергию в контуре можно, например, подзаряжая конденсатор. Для этого надо периодически подключать контур к источнику постоянного напряжения. Конденсатор должен подключаться к источнику только в те интервалы времени, когда присоединённая к положительному полюсу источника пластина заряжена положительно, а присоединённая к отрицательному полюсу — отрицательно (рис. 4.23). Только в этом случае источник будет подзаряжать конденсатор, пополняя его энергию.

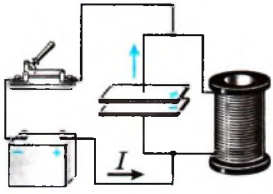


Рис. 4.24

Если же ключ замкнуть в момент, когда присоединённая к положительному полюсу источника пластина имеет отрицательный заряд, а присоединённая к отрицательно му полюсу — положительный, то конденсатор будет разряжаться через источник (рис. 4.24). Энергия конденсатора при этом будет убывать.

Следовательно, необходимо обеспечить автоматическую работу ключа (или *клапана*, как его часто называют). При высокой частоте колебаний ключ должен обладать надёжным быстродействием. В качестве такого практически безынерционного ключа и используется транзистор.

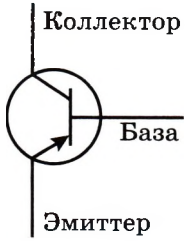


Рис. 4.25

Транзистор, напомним, состоит из трёх различных полупроводников: эмиттера, базы и коллектора. Эмиттер и коллектор имеют одинаковые основные носители заряда, например дырки (это полупроводник p-типа), а база имеет основные носители противоположного знака, например электроны (полупроводник n-типа). Схематическое изображение транзистора показано на рисунке 4.25.

Работа генератора на транзисторе. Упрощённая схема генератора на транзисторе показана на рисунке 4.26. Колебательный контур соединён последовательно с источником напряжения и транзистором таким образом, что на эмиттер подаётся положительный потенциал, а на коллектор — отрицательный. При этом переход эмиттер — база (эмиттерный переход) является прямым, а переход база — коллектор (коллекторный переход) оказывается обратным, и ток в цепи не идёт. Это соответствует разомкнутому ключу на рисунке 4.24.

Чтобы в цепи контура возникал ток и подзаряжал конденсатор контура в ходе колебаний, нужно сообщать базе отрицательный относительно эмиттера потенциал, причём в те интервалы времени, когда верхняя (см. рис. 4.26) пластина конденсатора заряжена положительно, а нижняя — отрицательно. Это соответствует замкнутому ключу на рисунке 4.23.

В те интервалы времени, когда верхняя пластина конденсатора заряжена отрицательно, а нижняя — положительно, ток в цепи контура должен отсутствовать. Для этого база должна иметь положительный потенциал относительно эмиттера.

Таким образом, для компенсации потерь энергии колебаний в контуре напряжение на эмиттерном переходе должно периодически менять знак в строгом соответствии с колебаниями напряжения в контуре. Необходима, как говорят, *обратная связь*, состоящая в том, что колебания в контуре влияют на транзистор.

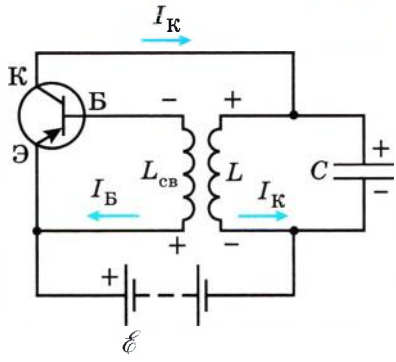


Рис. 4.26

В рассматриваемом генераторе обратная связь — индуктивная. К эмиттерному переходу подключена катушка индуктивностью $L_{св}$, индуктивно связанная с катушкой индуктивностью L контура. Колебания в контуре вследствие электромагнитной индукции возбуждают колебания напряжения на концах катушки, а тем самым и на эмиттерном переходе. Если фаза колебаний напряжения на эмиттерном переходе подобрана правильно, то «толчки» тока в цепи контура действуют на контур в нужные интервалы времени и колебания не затухают. Напротив, амплитуда колебаний в контуре возрастает до тех пор, пока потери энергии в контуре не станут точно компенсироваться поступлением энергии от источника. Эта амплитуда тем больше, чем больше напряжение источника. Увеличение напряжения приводит к усилению «толчков» тока, подзаряжающего конденсатор.

Подумайте, чем определяется частота автоколебаний, от чего зависит амплитуда автоколебаний.

Основные элементы любой автоколебательной системы. На примере генератора на транзисторе можно выделить основные элементы, характерные для многих автоколебательных систем (рис. 4.27).

1. Источник энергии, за счёт которого поддерживаются незатухающие колебания (в генераторе на транзисторе это источник постоянного напряжения).

2. Колебательная система — та часть автоколебательной системы, непосредственно в которой происходят колебания (в генераторе на транзисторе это колебательный контур).

3. Устройство, регулирующее поступление энергии от источника в колебательную систему, — клапан (в рассмотренном генераторе роль клапана выполняет транзистор).



Рис. 4.27

4. Устройство, обеспечивающее обратную связь, с помощью которой колебательная система управляет клапаном (в генераторе на транзисторе предусмотрена индуктивная связь катушки контура с катушкой в цепи эмиттер — база).

Вынужденные колебания возникают под действием переменного напряжения, вырабатываемого генераторами на электростанциях. Такие генераторы не могут создавать колебания высокой частоты, необходимые для радиосвязи. Потребовалась бы чрезмерно большая скорость вращения ротора. Генераторы на транзисторе позволяют получить колебания высокой частоты.

Интересно Генераторы на транзисторах широко применяются не только во многих радиотехнических устройствах: радиоприёмниках, передающих радиостанциях, усилителях и т. д., но и в современных электронно-вычислительных машинах.

Обсудите с одноклассниками, какие элементы маятниковых часов соответствуют элементам генератора на транзисторе.

Автоколебания. Маятниковые часы. Транзистор. Обратная связь — Найти

1. Что такое автоколебательная система?
2. В чём отличие автоколебаний от вынужденных и свободных колебаний?
3. Опишите свойства p—n-перехода в полупроводниках.
4. Как устроен транзистор?
5. Какова роль транзистора в генерации автоколебаний?
6. Что такое обратная связь?
7. Как осуществляется обратная связь в генераторе на транзисторе?
8. Укажите основные элементы автоколебательной системы.
9. Приведите примеры автоколебательных систем, не рассмотренные в тексте.
10. Почему колебания струны при равномерном движении смычка можно считать автоколебаниями?
11. Изменится ли работа генератора, если база будет иметь в качестве основных носителей тока дырки, а коллектор и эмиттер — электроны?

§ 26 ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОР

Что является основным источником электроэнергии?
В какие формы энергии переходит энергия электрического тока?

Электрический ток вырабатывается в генераторах — устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию.

Основную роль в наше время выполняют *электромеханические индукционные генераторы переменного тока*. В этих генераторах механическая энергия превращается в электрическую. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции. Такие генераторы имеют сравнительно простое устройство и позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

В дальнейшем, говоря о генераторах, мы будем иметь в виду именно индукционные электромеханические генераторы.

Генератор переменного тока. Принцип действия генератора переменного тока уже был рассмотрен в § 21.

В настоящее время имеется много различных типов индукционных генераторов. Но все они состоят из одних и тех же основных частей. Это, во-первых, электромагнит или постоянный магнит, создающий магнитное поле, и, во-вторых, обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС (в рассмотренной модели генератора это вращающаяся рамка). Так как ЭДС, наводимые в последовательно соединённых витках, складываются, то амплитуда ЭДС индукции в рамке пропорциональна числу её витков. Она пропорциональна также амплитуде переменного магнитного потока ($\Phi_m = BS$) через каждый виток, а также угловой скорости вращения (см. § 21).

Какие законы изменения магнитного потока и ЭДС индукции справедливы при вращении рамки? Запишите формулу зависимости ЭДС индукции от времени, если рамка имеет несколько витков.

Интересно

К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, термобатареи, солнечные батареи и т. п. В термобатареях используется свойство двух контактов разнородных материалов создавать ЭДС за счёт разности температур контактов. Исследуются возможности создания принципиально новых типов генераторов. Например, разрабатываются так называемые топливные элементы, в которых энергия, освобождающаяся в результате реакции водорода с кислородом, непосредственно превращается в электрическую.

В больших промышленных генераторах вращается электромагнит, создающий магнитное поле и называемый *ротором*, а обмотки, в которых наводится ЭДС, называемые *статором*, остаются неподвижными. Дело в том, что сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие

Вспомните устройство генератора постоянного тока.

Интересно Современный генератор электрического тока — это внушительное сооружение из медных проводов, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготовляются с точностью до миллиметра. Нигде в природе нет такого сочетания движущихся частей, которые могли бы порождать электрическую энергию столь же непрерывно и экономично.

контакты с помощью контактных колец и щёток подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем), расположенным на том же валу.

В маломощных генераторах магнитное поле создаётся вращающимся постоянным магнитом. В таком случае кольца и щётки вообще не нужны.

Появление ЭДС в неподвижных обмотках статора объясняется возникновением в них вихревого электрического поля, порождённого изменением магнитного потока при вращении ротора.

Трансформатор. ЭДС генераторов электростанций, как правило, не очень велика (около 10—20 кВ) по причине опасности пробоя обмоток генератора. Однако при передаче электроэнергии необходимо увеличивать напряжение для уменьшения потерь в линии электропередачи. Между тем для практических нужд потребителей обычно необходимо напряжение 220 или 380 В.

Важно Преобразование переменного тока, при котором напряжение увеличивается или уменьшается в несколько раз практически без потери мощности, осуществляется с помощью *трансформаторов.*

Устройство трансформатора. Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из пластин, на который надеты две (иногда и более) катушки с проволочными обмотками (рис. 4.28).

Запомни Одна из обмоток трансформатора, называемая **первичной,** подключается к источнику переменного напряжения. Другая обмотка, к которой присоединяют нагрузку, т. е. приборы и устройства, потребляющие электроэнергию, называется **вторичной.**

Интересно Впервые трансформаторы были использованы в 1878 г. русским учёным П. Н. Яблочковым для питания изобретённых им электрических свечей — нового в то время источника света.

Условное обозначение трансформатора приведено на рисунке 4.29.

Трансформатор на холостом ходу. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока по первичной обмотке в ней возникает ЭДС самоиндукции. В сердечнике появляется переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в витках вторичной обмотки. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле так, что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

При изменении со временем магнитного потока в каждом витке первичной обмотки возникает ЭДС самоиндукции

$$e = -\Phi', \qquad (4.39)$$

где Φ' — производная потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную одним витком, по времени. Если число витков в первичной обмотке равно N_1, то мгновенное значение ЭДС самоиндукции в этой обмотке $e_1 = N_1 e$. Так как магнитный поток через первичную и вторичную обмотки одинаков, то во вторичной обмотке полная ЭДС индукции e_2 равна $N_2 e$ (N_2 — число витков этой обмотки). Отсюда следует, что

Подумайте, почему сердечник делают не сплошным, а состоящим из отдельных пластин.

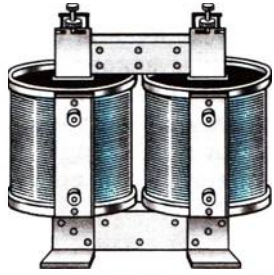


Рис. 4.28

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \qquad (4.40)$$

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало, и им можно пренебречь. В этом случае напряжение на первичной обмотке равно ЭДС самоиндукции, взятой с обратным знаком. Тогда

$$|u_1| \approx |e_1|. \qquad (4.41)$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не идёт и напряжение на ней равно ЭДС индукции, взятой с обратным знаком, соответственно имеет место соотношение

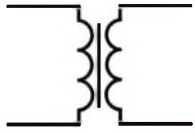


Рис. 4.29

$$|u_2| \approx |e_2|. \qquad (4.42)$$

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно (одновременно достигают максимума и одновременно проходят через нуль). Поэтому их отношение в формуле (4.40) можно заменить отношением действующих значений $\mathscr{E}_1$ и $\mathscr{E}_2$ этих ЭДС или, учитывая равенства (4.41) и (4.42), отношением действующих значений напряжений U_1 и U_2:

$$\frac{\mathscr{E}_2}{\mathscr{E}_1} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{N_2}{N_1} = K. \qquad (4.43)$$

Запомни Величина K называется **коэффициентом трансформации.** Он равен отношению напряжений во вторичной и первичной обмотках трансформатора.

При $K < 1$ ($N_2 < N_1$) $U_2 < U_1$ и трансформатор является понижающим, а при $K > 1$ ($N_2 > N_1$) $U_2 > U_1$ и трансформатор является повышающим.

Работа нагруженного трансформатора. Если к концам вторичной обмотки присоединить цепь, потребляющую электроэнергию, или, как говорят, нагрузить трансформатор, то сила тока во вторичной обмотке уже не будет равна нулю. Появившийся ток создаст в сердечнике свой переменный магнитный поток, который будет уменьшать изменения магнитного потока в сердечнике.

Уменьшение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока, казалось бы, должно, в свою очередь, уменьшить ЭДС самоиндукции

в первичной обмотке. Этого, однако, не произойдёт, так как согласно формуле (4.41) $|u_1| \approx |e_1|$. Поэтому при замыкании цепи вторичной обмотки автоматически увеличится сила тока в первичной обмотке. Его амплитуда возрастёт таким образом, что восстановится прежнее значение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока.

Увеличение силы тока в цепи первичной обмотки происходит в соответствии с законом сохранения энергии: отдача электроэнергии в цепь, присоединённую к вторичной обмотке трансформатора, сопровождается потреблением от сети такой же энергии первичной обмоткой. Мощность в первичной цепи при нагрузке трансформатора, близкой к номинальной, примерно равна мощности во вторичной цепи:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \qquad (4.44)$$

отсюда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \qquad (4.45)$$

Это означает, что, повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот).

Вспомните закон, который устанавливает связь количества теплоты, выделяемой в проводнике, с силой тока и сопротивлением проводника.

Мощности в первичной и вторичной обмотках одинаковы, если пренебречь потерями, причиной которых является неизбежное нагревание проводов и сердечника. Нагревание сердечника происходит за счёт токов, идущих по нему, а также за счёт его непрерывного перемагничивания. Для уменьшения нагревания сердечника за счёт силы тока его изготавливают из отдельных пластин, что увеличивает его сопротивление и уменьшает силу тока.

КПД трансформатора равен отношению мощности в нагрузке к мощности, подаваемой из сети на первичную обмотку:

Что может произойти, если случайно подключить трансформатор к источнику постоянного тока?

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\%.$$

КПД зависит от нагрузки. При больших нагрузках КПД практически постоянен и, как правило, достаточно велик (98—99 %), при малых нагрузках КПД уменьшается.

Индукционный генератор переменного тока. Трансформатор — Найти

1. Какими преимуществами обладает переменный ток по сравнению с постоянным?
2. На каком принципе основана работа генераторов переменного тока?
3. Что такое коэффициент трансформации?
4. Что понижает или повышает трансформатор?

§ 27 ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Как устроен генератор переменного тока?
Какие функции выполняют ротор и статор генератора?
Каков принцип действия трансформатора?

Производство электроэнергии. Рассмотрим два основных типа электростанций: тепловые и гидроэлектрические. Различаются эти электростанции двигателями, вращающими роторы генераторов.

На *тепловых электростанциях* источником энергии является топливо: уголь, газ, нефть, мазут, горючие сланцы. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. Наиболее экономичны крупные тепловые паротурбинные электростанции (сокращённо: ТЭС). Большинство ТЭС нашей страны использует в качестве топлива угольную пыль. Для выработки 1 кВт · ч электроэнергии затрачивается несколько сот граммов угля. В паровом котле свыше 90 % выделяемой топливом энергии передаётся пару. В турбине кинетическая энергия струй пара передаётся ротору. Вал турбины жёстко соединён с валом генератора. Паровые турбогенераторы весьма быстроходны: число оборотов ротора составляет несколько тысяч в минуту.

Известно, что КПД тепловых двигателей увеличивается с повышением температуры нагревателя и соответственно начальной температуры рабочего тела (пара, газа). Поэтому поступающий в турбину пар доводят до высоких параметров: температуру — почти до 550 °С и давление — до 25 МПа. Коэффициент полезного действия ТЭС достигает 40 %. Бóльшая часть энергии теряется вместе с горячим отработанным паром. Превращения энергии показаны на схеме, приведённой на рисунке 4.30.

Тепловые электростанции — так называемые теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) — позволяют значительную часть энергии отработанного пара использовать на промышленных предприятиях и для бытовых нужд. В результате КПД ТЭЦ достигает 60—70 %.

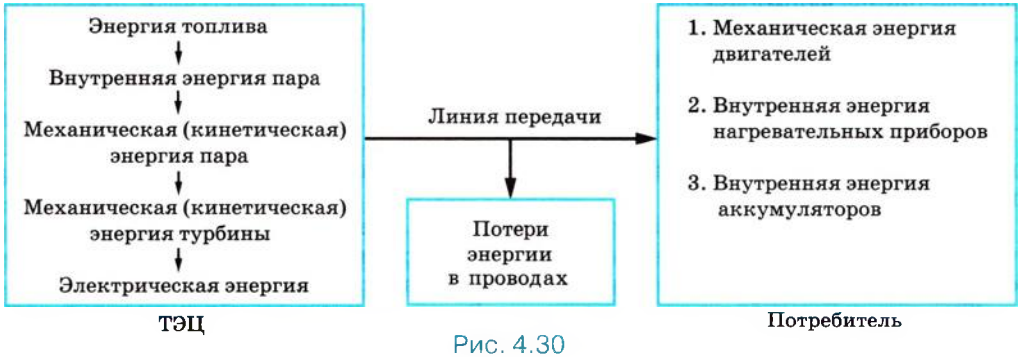


Рис. 4.30

На *гидроэлектростанциях* (ГЭС) для вращения роторов генераторов используется потенциальная энергия воды. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение гидравлическими турбинами. Мощность такой станции зависит от создаваемой плотиной разности уровней воды (напор) и от массы воды, проходящей через турбину в каждую секунду (расход воды). Превращения энергии показаны на схеме, приведённой на рисунке 4.31.

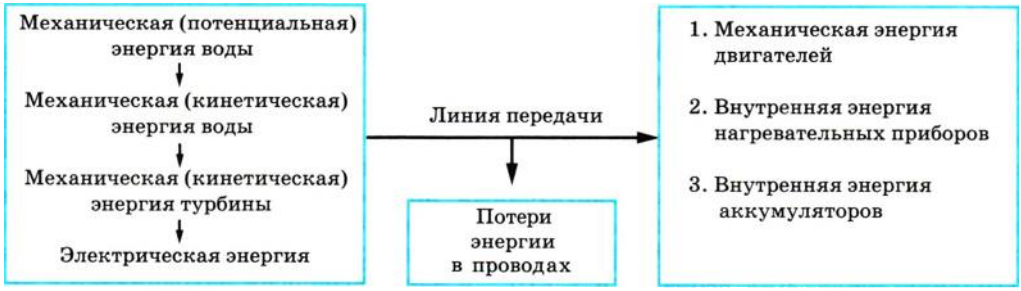


Рис. 4.31

Гидроэлектростанции дают около 20 % всей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии.

Значительную роль в энергетике играют атомные электростанции (АЭС). О них вы прочитаете в главе 12. В настоящее время АЭС в России дают около 10 % электроэнергии.

Передача электроэнергии. Потребители электроэнергии имеются повсюду. Производится же она в сравнительно немногих местах, близких к источникам топливо- и гидроресурсов. Электроэнергию не удаётся консервировать в больших масштабах. Она должна быть потреблена сразу же после получения. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния.

Передача электроэнергии связана с заметными потерями, так как электрический ток нагревает провода линий электропередачи. В соответствии с законом Джоуля—Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов линии, определяется формулой

Выведите формулу расчёта потерь энергии в зависимости от расстояния, на которое она передаётся.

$$Q = I^2Rt = \frac{P^2}{U^2}Rt,$$

где R — сопротивление линии, U — передаваемое напряжение, P — мощность источника тока.

При очень большой длине линии передача энергии может стать экономически невыгодной. Значительно снизить сопротивление R линии практически весьма трудно. Поэтому приходится уменьшать силу тока I.

Так как мощность источника тока P равна произведению силы тока I на напряжение U, то для уменьшения передаваемой мощности нужно

повысить передаваемое напряжение в линии передачи. Поэтому на крупных электростанциях устанавливают *повышающие трансформаторы*. Трансформатор увеличивает напряжение в линии во столько же раз, во сколько раз уменьшает силу тока.

Чем длиннее линия передачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение. Так, в высоковольтной линии передачи Волжская ГЭС — Москва и некоторых других используют напряжение 500 кВ. Между тем генераторы переменного тока настраивают на напряжения, не превышающие 16—20 кВ. Более высокое напряжение потребовало бы принятия сложных специальных мер для изоляции обмоток и других частей генераторов.

Для непосредственного использования электроэнергии в двигателях электропривода станков, в осветительной сети и для других целей напряжение на концах линии нужно понизить. Это достигается с помощью *понижающих трансформаторов*. Общая схема передачи энергии и её распределения показана на рисунке 4.32.

Электрические станции ряда районов страны объединены высоковольтными линиями электропередачи, образуя общую электрическую сеть, к которой подключены потребители. Такое объединение, называемое *энергосистемой*, даёт возможность сгладить пиковые нагрузки потребления энергии в утренние и вечерние часы.

Потребление электроэнергии. Главным потребителем электроэнергии является промышленность, на долю которой приходится около 70 % производимой электроэнергии. Крупным потребителем является также транспорт. Все большее количество железнодорожных линий переводится на электрическую тягу. Почти все деревни и сёла получают электроэнергию от электростанций для производственных и бытовых нужд.

Бóльшая часть используемой электроэнергии сейчас превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электрическими двигателями. Они удобны, компактны, допускают возможность автоматизации производства.

Около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью,

Интересно

Энергосистема обеспечивает бесперебойность подачи энергии потребителям вне зависимости от места их расположения. Сейчас почти вся территория нашей страны обеспечивается электроэнергией объединёнными энергетическими системами. Действует Единая энергетическая система европейской части страны.

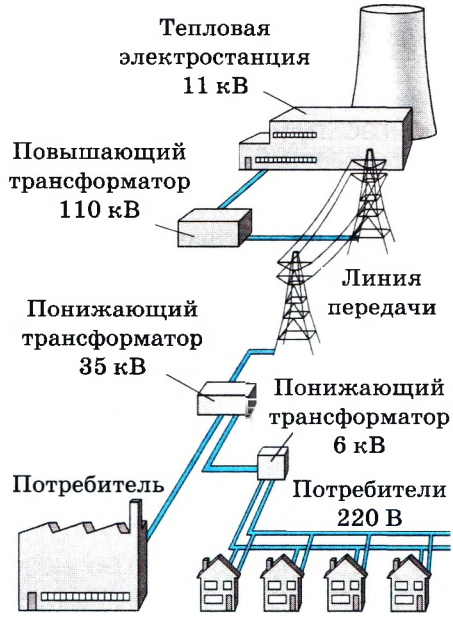


Рис. 4.32

используется для технологических целей (электросварка, электрический нагрев и плавление металлов, электролиз и т. п.).

Потребность в электроэнергии постоянно увеличивается как в промышленности, на транспорте, в научных учреждениях, так и в быту.

Возможности для более эффективного использования электроэнергии имеются, и немалые. Одна из них связана с освещением, на которое расходуется около 25 % всей производимой электроэнергии. В настоящее время в нашей стране используются компактные люминесцентные лампы, которые потребляют на 80 % меньше электроэнергии, чем лампы накаливания. Стоимость таких ламп значительно превышает стоимость обычных, но окупаются они быстро. Наряду с этим и самые простые меры по экономному применению освещения в домах и производственных помещениях способны дать немалый эффект. Не надо оставлять напрасно включёнными лампы, необходимо позаботиться о том, чтобы освещались лишь рабочие участки, и т. д.

Имеется и множество других возможностей повышения эффективности использования электроэнергии в быту: в холодильных установках, телевизорах, компьютерах и т. д. Сэкономленные средства можно использовать для разработки, например, устройств, преобразующих солнечную энергию в электрическую. Большие надежды возлагаются сейчас на получение энергии с помощью управляемых термоядерных реакций. Электростанции, в которых будет использоваться огромная энергия, высвобождающаяся при ядерном синтезе, не будут представлять столь большой опасности, как обычные атомные электростанции.

Важно Приоритет должен быть отдан увеличению эффективности использования электроэнергии, а не повышению мощности электростанций.

ТЭС. ГЭС. Пути экономии электрической энергии

Найти

1. Приведите примеры машин и механизмов, в которых совершенно не использовался бы электрический ток.
2. Чего лишились бы жители большого города при аварии электрической сети?
3. Как осуществляется передача электроэнергии на большие расстояния?
4. В чём преимущества передачи энергии на большие расстояния при использовании постоянного тока?

§ 28 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ТРАНСФОРМАТОР. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ»

При решении задач по данной теме нужно прежде всего понимать, в каких условиях работает трансформатор: при наличии нагрузки или на холостом ходу. Необходимо знать две характеристики трансформатора: коэффициент трансформации, который может быть больше или меньше единицы, и коэффициент полезного действия, который всегда меньше единицы.

Задача 1. Первичная обмотка трансформатора в радиоприёмнике имеет $N_1 = 2000$ витков, напряжение на первичной обмотке (напряжение от сети) $U_1 = 220$ В. Определите число витков N_2 во вторичной обмотке, необходимое для нормального нагревания спирали лампы, рассчитанной на напряжение $U_л = 10$ В и силу тока $I_л = 0{,}5$ А. Сопротивление вторичной обмотки $R = 2$ Ом.

Р е ш е н и е. Индуцируемая в первичной обмотке ЭДС приблизительно равна подаваемому на трансформатор напряжению: $\mathscr{E}_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \approx U_1$. Отсюда скорость изменения магнитного потока в витке данного трансформатора

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{U_1}{N_1}. \qquad (1)$$

Сопротивление лампы $R_л = \frac{U_л}{I_л}$. Тогда ЭДС, индуцируемая во вторичной обмотке,

$$\mathscr{E}_2 = I_л (R_л + R) = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2)$$

Подставив в формулу (2) выражение (1) для скорости изменения магнитного потока, найдём число витков во вторичной обмотке:

$$N_2 = \frac{\mathscr{E}_2}{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} = \frac{I_л\left(\frac{U_л}{I_л} + R\right)}{U_1} N_1 = 100 \text{ витков}.$$

Задача 2. Трансформатор, повышающий напряжение с $U_1 = 120$ В до $U_2 = 360$ В, имеет замкнутый сердечник в виде кольца (рис. 4.33). Через кольцо пропущен провод, к которому присоединён вольтметр, показывающий напряжение $U_0 = 0{,}5$ В. Определите, сколько витков имеют первичная и вторичная обмотки трансформатора.

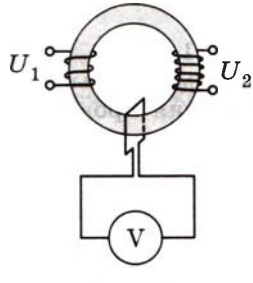


Рис. 4.33

Р е ш е н и е. Показания вольтметра определяют скорость изменения магнитного потока через один виток: $U_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Как мы знаем, действующие значения ЭДС индукции, равные действующим значениям напряжения, $\mathscr{E}_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \approx U_1$; $\mathscr{E}_2 = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \approx U_2$.

Отсюда $N_1 = \frac{U_1}{U_0} = 240$ витков, $N_2 = \frac{U_2}{U_0} = 720$ витков.

Задача 3. Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть с напряжением $U_1 = 380$ В, напряжение на зажимах вторичной обмотки, сопротивление которой равно $R_2 = 2$ Ом, $U_2 = 25$ В, а сила тока, идущего через неё, $I_2 = 1{,}5$ А.

Определите коэффициент трансформации и КПД трансформатора. Потери энергии в первичной обмотке не учитывайте.

Р е ш е н и е. Коэффициент трансформации K равен отношению напряжения на вторичной обмотке трансформатора к напряжению на первичной обмотке (напряжение на вторичной обмотке равно сумме напряжений на её зажимах и на её активном сопротивлении):

$$\frac{U_2 + I_2 R_2}{U_1} = K \approx 0{,}07.$$

КПД трансформатора в данном случае равен отношению мощности, снимаемой с зажимов вторичной обмотки, к полной мощности, выделяющейся в ней:

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_2 (U_2 + I_2 R)} \cdot 100\ \% \approx 89\ \%.$$

Задача 4. Определите мощность, теряемую в линии электропередачи под напряжением 35 кВ при передаче мощности 1 МВт на расстояние $l = 80$ км по медным проводам площадью поперечного сечения 15 мм^2. Сдвиг фаз между током и напряжением в нагрузке φ, $\cos\varphi = 0{,}7$.

Р е ш е н и е. Мощность, теряемая в проводах,

$$P_{\text{тер}} = I^2 R. \qquad (1)$$

Действующее значение силы тока $I = \frac{P}{U \cos\varphi}$, сопротивление проводов $R = \rho \frac{2l}{S}$. По таблице найдём удельное сопротивление меди: $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-2}$ Ом · мм^2/м. Обратим внимание на то, что в данном случае не имеет смысла переводить единицы в СИ, так как площадь поперечного сечения проводов дана в квадратных миллиметрах (мм^2).

Подставив эти выражения в формулу (1), получим

$$P_{\text{тер}} = \frac{2\rho l P^2}{S U^2 \cos^2\varphi} = 3 \cdot 10^5 \text{ Вт}.$$

Потери достаточно большие: теряется около 30 % передаваемой мощности.

Задачи для самостоятельного решения

1. На сколько больше должно быть число витков во вторичной обмотке трансформатора с коэффициентом трансформации, равным 4, если число витков в первичной обмотке равно 1000?

2. Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть переменного тока с напряжением $U_1 = 220$ В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки, сопротивление которой $R_2 = 1$ Ом, $U_2 = 20$ В. Сила тока во вторичной обмотке 2 А. Определите КПД трансформатора и коэффициент трансформации.

3. Определите, на какое расстояние можно передать электроэнергию мощностью 100 кВт по медным проводам площадью поперечного сечения 25 мм^2 при эффективном напряжении 20 кВ, при этом потери не должны превышать 10 % ($\cos\varphi = 0{,}8$).

4. По двухпроводной линии передаётся мощность 80 кВт. Сопротивление каждой линии $5{,}5 \cdot 10^{-2}$ Ом. На сколько можно снизить потери мощности, если в начале линии повысить напряжение в 10 раз, а в конце понизить в 10 раз с помощью трансформаторов, КПД которых 99 %? Вырабатываемое и потребляемое напряжение равно 120 В.

5. Сопротивление двухпроводной линии 0,92 Ом, действующие значения силы тока, идущего по линии, 580 А, а напряжения — 18 кВ. Определите подводимую мощность и потери мощности в проводах.

Повторите материал главы 4 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

«Успехи и проблемы электроэнергетики»

1. Характеристики источников электрической энергии (ветряные, солнечные, термальные, приливные, тепловые и др.).
2. Современные электрогенераторы (технические решения, параметры, тенденции совершенствования).
3. Современные системы передачи электроэнергии. Неравномерность нагрузки и пути её сглаживания. Энергосети.
4. Схема распределения энергии в современной квартире.
5. Экологические проблемы, связанные с современной энергетикой.

«Моделирование гидро- или тепловой электростанции. Расчёт её КПД»

ГЛАВА 5 МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

В этой главе рассмотрим свойства механических волн.

§ 29 ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЫ

Вспомните основные характеристики механических колебаний.

Отдельные частицы любого тела — твёрдого, жидкого или газообразного — взаимодействуют друг с другом. Поэтому если какая-либо частица тела начинает совершать колебательные движения, то в результате взаимодействия между частицами это движение начинает с некоторой скоростью распространяться во все стороны.

Запомни Процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени называется **волновым процессом**.

Последовательное возникновение колебаний в точках, удалённых от источника, называется **волной**.

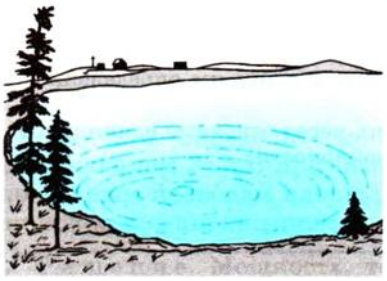


Рис. 5.1

Наиболее отчётливо главные особенности волнового движения можно увидеть, если рассматривать волны на поверхности воды (рис. 5.1). Это могут быть, например, волны, которые представляют собой бегущие вперёд округлые валы. Расстояния между валами, или гребнями, примерно одинаковы. Однако если на поверхности воды, по которой бежит волна, находится лёгкий предмет, например лист с дерева, то он не будет увлекаться вперёд волной, а начнёт совершать колебания вверх и вниз, оставаясь почти на одном месте.

Важно При возбуждении волны происходит процесс распространения колебаний, но не перенос вещества.

Скорость волны. Важнейшей характеристикой волны является скорость её распространения. Волны любой природы распространяются в пространстве не мгновенно. Их скорость *конечна*. Если, например, представить, что над морем летит чайка, причём так, что она всё время оказывается над только что возникшим (передним) гребнем волны, то скорость волны в этом случае равна скорости чайки.

Поперечные волны. Если один конец шнура закрепить и, слегка натянув шнур рукой, привести другой его конец в колебательное движение, то по шнуру побежит волна (рис. 5.2). Каждый

участок шнура обладает массой и упругостью. При *деформации сдвига* в любом сечении шнура появляются силы упругости. Эти силы стремятся возвратить шнур в исходное положение. За счёт инертности участок колеблющегося шнура не останавливается в положении равновесия, а проходит его, продолжая двигаться до тех пор, пока силы упругости не остановят этот участок. Это будет в момент максимального отклонения от положения равновесия.

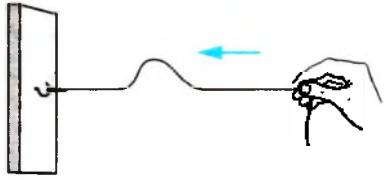


Рис. 5.2

Подумайте, почему механические волны называют упругими волнами.

Запомни Волны, у которых колебания частиц совершаются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, называются **поперечными** (рис. 5.3).

Важно Когда мы говорим о колебаниях частиц среды, то имеем в виду колебания малых объёмов среды, а не колебания молекул.

Скорость волны будет тем больше, чем сильнее натянут шнур.

Рассмотрим теперь процесс распространения поперечной волны на модели — цепочке одинаковых металлических шаров, подвешенных на нитях. Шары связаны между собой пружинками (рис. 5.4). Масса пружинок много меньше массы шаров. В этой модели инертные и упругие свойства разделены: масса сосредоточена в основном в шарах, а упругость — в пружинках. Это разделение несущественно при рассмотрении волнового движения.

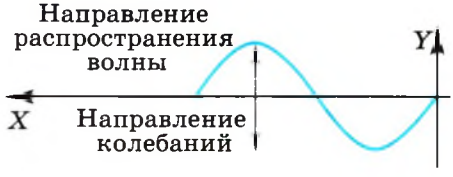


Рис. 5.3

Если отклонить левый крайний шар в горизонтальной плоскости, например вдоль оси Y, перпендикулярно всей цепочке шаров, то прикреплённая к нему пружинка будет деформирована и на 2-й шар начнёт действовать сила, заставляя его отклоняться в ту же сторону, куда отклонён 1-й шар. Вследствие инертности движение 2-го шара не будет происходить синхронно с 1-м. Его движение, повторяющее движение 1-го шара, будет запаздывать по времени.

Если 1-й шар заставить колебаться с периодом T (рукой или с помощью какого-либо механизма), то 2-й шар тоже придёт в колебательное движение вслед за 1-м, причём с той же частотой, но с некоторым отставанием по фазе. Шар 3-й под действием силы упругости, вызванной смещением 2-го шара, тоже начнёт колебаться, ещё более отставая по фазе от 1-го и т. д. Наконец все шары станут совершать колебания с одной и той же частотой, но с различными фазами. Таким образом распространяется поперечная волна.

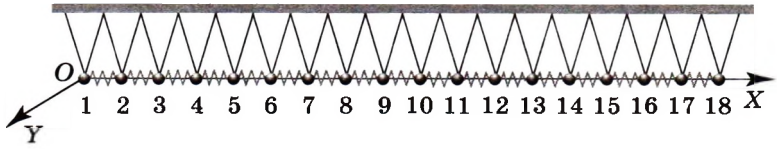

O
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
X
Y

Рис. 5.4

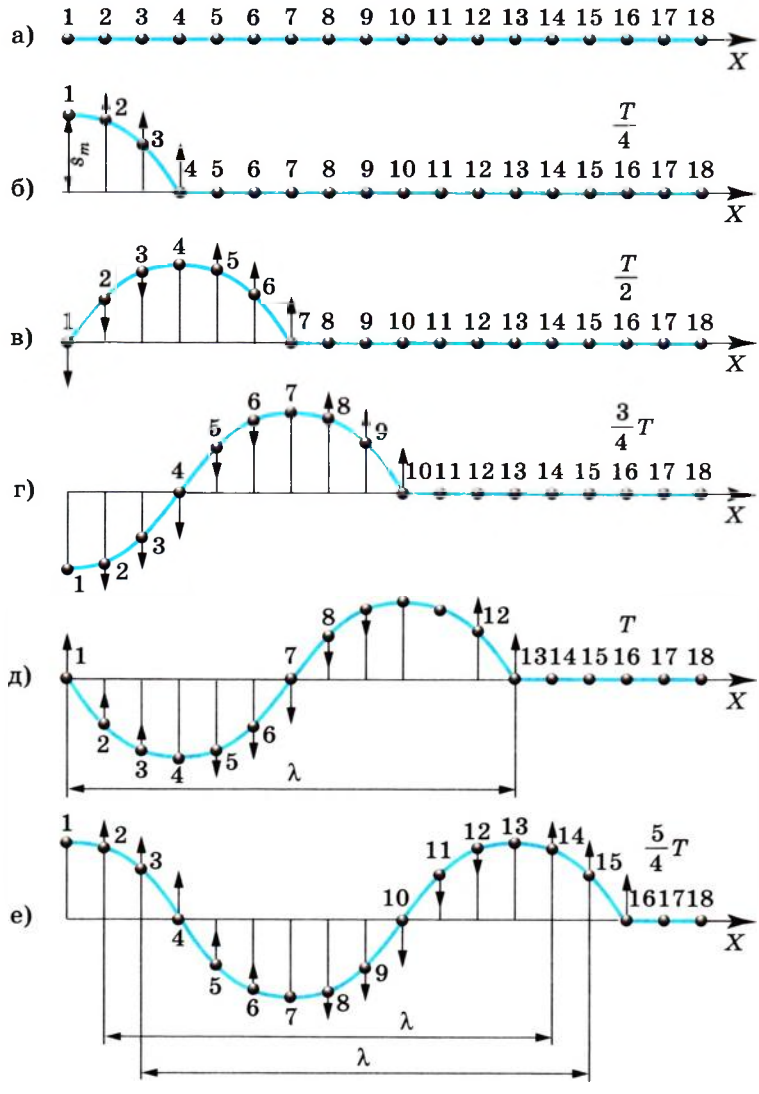

а)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
X
б)
s_m
$\frac{T}{4}$
в)
$\frac{T}{2}$
г)
$\frac{3}{4}T$
д)
T
λ
е)
$\frac{5}{4}T$
λ
λ

Рис. 5.5

На рисунке 5.5, *а*—*е* изображён процесс распространения волны. Показаны положения шаров в последовательные моменты времени, отстоящие друг от друга на четверть периода колебаний (вид сверху). Стрелки у шаров — это векторы скоростей их движения в соответствующие моменты времени.

Чему равна разность фаз колебаний 1-го и 4-го, 4-го и 10-го, 7-го и 10-го шаров?

Интересно

На *поверхности жидкости*, например воды, могут существовать поверхностные волны, при распространении которых колебания частиц определяются действием сил тяжести и сил поверхностного натяжения, а не сил упругости.

Сдвиг слоёв относительно друг друга в газах и жидкостях не приводит к появлению сил упругости. Поэтому в газах и жидкостях, в отличие от твёрдых тел, не могут существовать поперечные волны.

Важно Поперечные волны возникают в твёрдых телах.

Продольные волны. Но колебания частиц среды могут происходить и вдоль направления распространения волны (рис. 5.6).

Запомни Волны, у которых колебания частиц совершаются вдоль направления распространения волны, называются **продольными**.

Продольную волну удобно наблюдать на длинной мягкой пружине большого диаметра. Ударив ладонью по одному из концов пружины (рис. 5.7, *а*), можно заметить, как сжатие (упругий импульс) бежит по пружине. С помощью серии последовательных ударов можно возбудить в пружине волну, представляющую собой последовательные сжатия и растяжения пружины, бегущие друг за другом (рис. 5.7, *б*).

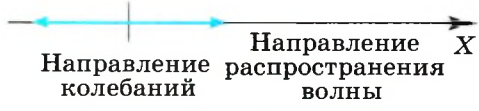


Рис. 5.6

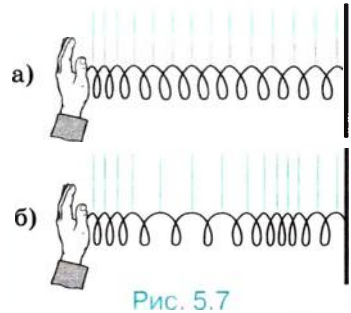


Рис. 5.7

Итак, в продольной волне происходит *деформация сжатия* и *растяжения*. Силы упругости, связанные с этой деформацией, возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях и газах. Эти силы вызывают колебания отдельных участков среды.

Важно Продольные волны могут распространяться во всех упругих средах, т. е. в твёрдых телах, жидкостях и газах.

На модели упругого тела в виде цепочки массивных шаров, связанных пружинками (рис. 5.8, *а*), можно наблюдать также и процесс

распространения продольных волн. Шары подвешены в этот раз так, чтобы они могли колебаться только *вдоль цепочки*. Если 1-й шар привести в колебательное движение с периодом T, то вдоль цепочки побежит продольная волна, состоящая из чередующихся уплотнений и разрежений шаров (рис. 5.8, *б*). Этот рисунок соответствует рисунку 5.5, *е* для случая распространения поперечной волны.

Важно В твёрдых телах скорость продольных волн больше скорости поперечных.

Выведите формулу для определения расстояния от данной точки до очага землетрясения.

Различие этих скоростей учитывается при определении расстояния от очага землетрясения до сейсмической станции. Вначале на станции регистрируется продольная волна. Спустя некоторое время регистрируется поперечная волна, возбуждаемая при землетрясении одновременно с продольной. Зная время запаздывания поперечной волны, можно определить расстояние до очага землетрясения.

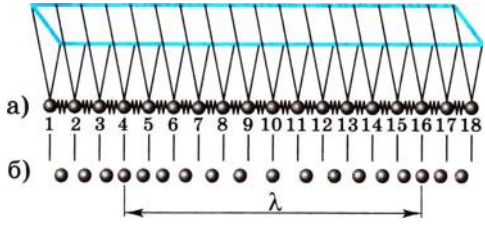


Рис. 5.8

Энергия волны. При распространении механической волны движение передаётся от одних частиц среды к другим. С передачей движения связана передача *энергии*. Основное свойство всех волн независимо от их природы состоит в переносе ими энергии без переноса вещества. Энергия поступает от источника, возбуждающего колебания начала шнура, струны и т. д., и распространяется вместе с волной. Через любое поперечное сечение, например шнура, передаётся энергия. Эта энергия слагается из кинетической энергии движения частиц среды и потенциальной энергии их упругой деформации. Постепенное уменьшение амплитуды колебаний частиц при распространении волны связано с превращением части механической энергии во внутреннюю.

Рассмотрим физические характеристики волны — *длину волны* и *скорость волны*.

Длина волны. После того как колебания при распространении поперечной волны достигнут 13-го шара, 1-й и 13-й шары будут колебаться совершенно одинаково. Когда 1-й шар находится в положении равновесия и движется влево (если смотреть вдоль цепочки шаров; см. рис. 5.5, *д*), то и 13-й шар находится в положении равновесия и тоже движется влево. Колебания этих шаров происходят в одинаковых фазах.

Запомни **Длиной волны** называется кратчайшее расстояние между точками, колеблющимися в одинаковых фазах.

Длина продольной волны согласно рисунку 5.8, *б* равна расстоянию между 4-м и 16-м шарами или между 2-м и 14-м шарами.

При распространении волны частицы среды (шары в рассматриваемой модели) колеблются в одинаковых фазах, если расстояние между ними равно $n\lambda$ (где n — целое число). Между этими частицами фазы колебаний частиц различны.

За один период волна распространяется на расстояние λ (см. рис. 5.5, *д*), следовательно,

$$\lambda = \upsilon T. \qquad (5.1)$$

Дадим ещё одно определение длины волны.

Запомни

Длина волны — это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное одному периоду колебаний.

Так как период T и частота ν связаны соотношением $T = \frac{1}{\nu}$, то $\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}$ и соответственно

$$\upsilon = \lambda\nu. \qquad (5.2)$$

При распространении волны вдоль шнура мы наблюдаем два вида периодичности.

Во-первых, каждая частица шнура совершает периодические колебания во времени. В случае гармонических колебаний (эти колебания происходят по формуле синуса или косинуса) частота и амплитуда колебаний частиц одинаковы во всех точках шнура. Эти колебания различаются только фазами.

Во-вторых, в каждый момент времени форма волны (т. е. профиль шнура) повторяется на протяжении шнура через отрезки длиной λ. На рисунке 5.9 чёрной линией показан профиль шнура в определённый момент времени t (мгновенный снимок волны). С течением времени этот профиль перемещается.

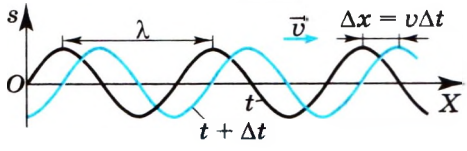


Рис. 5.9

Продольная и поперечная волны. Длина волны. Скорость

1. Какие волны называются поперечными, а какие продольными?
2. Может ли в воде распространяться поперечная волна?
3. На какое расстояние распространяется волна за время $t = T/4$ (см. рис. 5.5)?
4. Что определяет амплитуду колебаний шаров в рассмотренной модели?
5. Что называют длиной волны?
6. Как связаны скорость волны и длина волны?
7. Определите по рисунку 5.8, чему равна разность фаз колебаний двух соседних шаров; двух шаров, находящихся на расстоянии, равном длине волны.

§ 30 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В УПРУГИХ СРЕДАХ. УРАВНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Почему возникают волны?
Можно ли волновой процесс отнести к механическим явлениям? Почему?

На резиновом шнуре, по струне или в тонком стержне волны могут распространяться только по одному направлению — вдоль шнура, струны или стержня. Если же газ, жидкость или твёрдое тело сплошь заполняют некоторую область пространства (сплошная среда), то возникшие в одном месте колебания распространяются по всем направлениям.

Волна при распространении от какого-либо источника в сплошной среде постепенно захватывает всё более обширные области пространства.

Энергия, которую несут с собой волны, с течением времени распределяется по всё большей и большей поверхности. Следовательно, уменьшается и амплитуда колебаний частиц среды по мере удаления от источника. Ведь энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний: $W \sim s_m^2$.

Амплитуда волны в среде по мере удаления волны от источника обязательно уменьшается, даже если механическая энергия не превращается во внутреннюю за счёт действия в среде сил трения.

Уравнение бегущей волны. Выведем уравнение волны, бегущей по длинному тонкому резиновому шнуру, т. е. уравнение, позволяющее определить смещение от положения равновесия любой точки шнура в любой момент времени. При этом не будем учитывать потери механической энергии.

Ось OX направим вдоль шнура, а начало отсчёта свяжем с левым концом шнура. Смещение колеблющейся точки шнура от положения равновесия обозначим буквой s. Выведем уравнение $s = s(x, t)$.

Заставим конец шнура (точка O с координатой $x = 0$) совершать гармонические колебания с циклической частотой ω:

$$s_O = s_m \sin \omega t, \tag{5.3}$$

если начальную фазу колебаний считать равной нулю. Здесь s_m — амплитуда колебаний (рис. 5.10, *а*).

Колебания распространяются вдоль шнура (оси OX) со скоростью υ и в произвольную точку шнура с координатой x придут спустя время

$$\tau = \frac{x}{\upsilon}. \tag{5.4}$$

Эта точка также начнёт совершать гармонические колебания с частотой ω, но с запаздыванием на время τ (рис. 5.10, *б*). Колебания в точке x будут происходить с той же амплитудой s_m, но с другой фазой:

$$s = s_m \sin(\omega(t - \tau)) = s_m \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)\right). \tag{5.5}$$

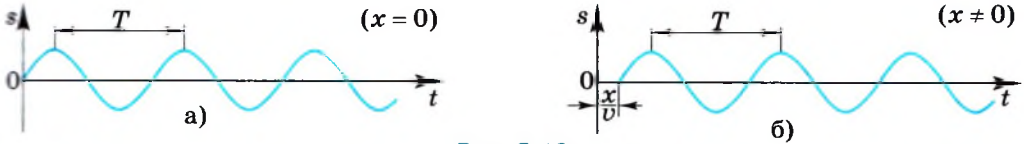


Рис. 5.10

Запомни Формула (5.5) и есть **уравнение гармонической бегущей волны**, распространяющейся в положительном направлении оси *OX*.

Так как длина волны $\lambda = \upsilon T$, то уравнение (5.5) можно записать в виде

$$s = s_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right).$$

Плоская волна. Волновая поверхность и луч. Плоскую волну можно получить, если поместить в упругую среду большую пластину и заставить её колебаться в направлении нормали к пластине. Все точки среды, примыкающие к пластине с одной стороны, будут совершать колебания с одинаковыми амплитудами и фазами. Эти колебания будут распространяться в виде волн в направлении нормали к пластине, причём все частицы среды, лежащие в плоскости, параллельной пластине, будут колебаться в одной фазе.

Как, зная уравнение волны, записать уравнение колебаний разных точек среды? Выведите выражение для разности фаз колебаний в точках, находящихся друг от друга на расстоянии l.

Запомни Поверхность равной фазы называется **волновой поверхностью**.

Плоской волной называется волна, у которой волновая поверхность — плоскость (рис. 5.11).

Так как все точки, принадлежащие одной волновой поверхности, колеблются одинаково, то уравнение плоской бегущей волны будет иметь вид

$$s = s_m \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)\right),$$

где s — смещение всех точек волновой поверхности в данный момент времени, а ось X совпадает с направлением распространения волны и соответственно перпендикулярна волновой поверхности.

Обсудите с одноклассниками, как определить фазу колебаний в данной точке пространства. От чего зависит фаза колебаний?

Запомни Линия, нормальная к волновой поверхности, называется **лучом**.

Под направлением распространения волн (вектора скорости волны) понимают направление именно лучей. Лучи для плоских волн представляют собой параллельные прямые (см. рис. 5.11).

Важно Луч указывает направление, в котором волна переносит энергию.

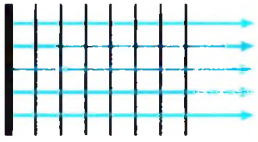


Рис. 5.11

При распространении плоской волны размеры волновых поверхностей по мере удаления от пластины не меняются, поэтому энергия волны не рассеивается в пространстве и амплитуда колебаний частиц среды уменьшается только за счёт действия сил трения.

На поверхности воды легко получить *линейные волны*, которые дают наглядное представление о плоских волнах в пространстве. Для этого нужно длинный стержень, слегка касающийся поверхности воды, заставить колебаться в направлении, перпендикулярном поверхности воды. Все частицы воды, находящиеся на прямой, параллельной стержню, будут колебаться в одинаковой фазе (рис. 5.12).



Рис. 5.12

Запомни **Фронтом волны** называется геометрическое место точек, до которых дошли возмущения в данный момент времени.

Важно Волновых поверхностей существует сколь угодно много, фронт волны один.

Налейте в таз воду и возбудите на поверхности воды различного вида волны. Понаблюдайте за скоростью перемещения фронта волны при разных видах волн. От чего она зависит?

Фронт волны отделяет часть пространства, в которой возникли колебания, от той части пространства, в которой колебаний нет.

Очевидно, что фронт волны — волновая поверхность, на которой фаза колебаний равна нулю.

Сферическая волна. Другой пример волны в сплошной среде — это *сферическая волна*. Она возникает, если поместить в среду пульсирующую сферу (рис. 5.13). Тогда волновые поверхности являются сферами. Лучи направлены вдоль продолжений радиусов пульсирующей сферы.

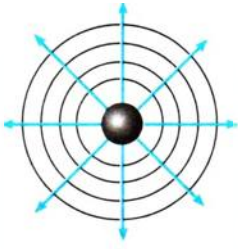


Рис. 5.13

Амплитуда колебаний частиц в сферической волне обязательно убывает по мере удаления от источника. Энергия, излучаемая источником, в этом случае равномерно распределяется по поверхности сферы, радиус которой непрерывно увеличивается по мере распространения волны.

§ 31 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Какие волны, продольные или поперечные, могут распространяться в воздухе? Что вы понимаете под скоростью волны?

Волны на поверхности воды или на резиновом шнуре можно непосредственно увидеть. В прозрачной среде — воздухе или жидкости — волны невидимы. Но при определённых условиях их можно слышать.

Возбуждение звуковых волн. Если длинную стальную линейку зажать в тисках или плотно прижать к краю стола, то, отклонив конец линейки от положения равновесия, мы возбудим её колебания (рис. 5.14, *а*). Но эти колебания не будут восприниматься нашим ухом. Если, однако, укоротить выступающий конец линейки (рис. 5.14, *б*), то мы обнаружим, что линейка начнёт звучать. Дело здесь вот в чём.

Пластина в ходе колебаний вдоль нормали к ней сжимает прилегающий к одной из её сторон слой воздуха и одновременно создаёт разрежение с другой стороны. Эти сжатия и разрежения чередуются во времени и распространяются в обе стороны в виде упругих продольных волн. Одна из них достигает нашего уха и вызывает вблизи него периодические колебания давления, которые воздействуют на слуховой аппарат.

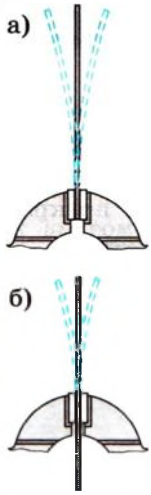


Рис. 5.14

Запомни Колебания, воспринимаемые ухом человека в виде звука, называются **акустическими**. Частота звуковых колебаний лежит в пределах от 17 до 20 000 Гц.

Акустика — это учение о звуке.

Чем короче выступающий конец линейки, тем больше частота его колебаний. Поэтому мы и начинаем слышать звук, когда выступающий конец стальной линейки становится достаточно коротким.

Интересно Механические колебания с частотами, меньшими 17 Гц, называются *инфразвуковыми*, а бо́льшими 20 000 Гц — *ультразвуковыми*. Такие колебания мы не слышим.

Важно Любое тело (твёрдое, жидкое или газообразное), колеблющееся со звуковой частотой, создаёт в окружающей среде звуковую волну.

Звуковые волны в различных средах. Чаще всего звуковые волны достигают наших ушей по воздуху. Довольно редко мы оказываемся погружёнными целиком, вместе с ушами, в воду. Но, конечно, воздух не имеет каких-либо особых преимуществ по сравнению с другими средами относительно

Подумайте, какие волны, продольные или поперечные, распространяются в воздухе, а какие — в линейке.



Рис. 5.15

распространения в нём звуковых волн. Звук распространяется в воде и твёрдых телах. Нырнув с головой во время купания, вы можете услышать звук, например, от удара двух камней, производимого в воде на большом расстоянии (рис. 5.15).

В вакууме звуковые волны распространяться не могут. Для доказательства этого можно, например, электрический звонок поместить под колокол воздушного насоса (рис. 5.16). По мере того как давление воздуха под колоколом уменьшается, звук будет ослабевать до тех пор, пока не прекратится совсем.

Интересно Хорошо проводит звук земля. Русский историк Н. М. Карамзин сообщает, что Дмитрий Донской перед Куликовской битвой, приложив ухо к земле, услышал топот копыт конницы противника, когда она ещё не была видна.

Плохо проводят звук такие материалы, как войлок, пористые панели, прессованная пробка и т. д. Эти материалы используют для звукоизоляции.



Рис. 5.16

Плоская звуковая волна также описывается уравнением (5.5). Амплитуда связана с такой известной характеристикой, как *громкость* звука, а частота определяет *высоту тона*. Чем меньше частота, тем звук ниже, и наоборот: чем больше частота, тем звук выше. Обычно в звуке присутствует одновременно несколько частот, что определяет *окраску* звука. Если в звуке присутствуют случайно возникающие волны разных частот и амплитуд, то такой звук является *шумом*.

Скорость звука. Звуковые волны, подобно всем другим волнам, распространяются с конечной скоростью. Обнаружить это можно так. Свет распространяется с огромной скоростью — 300 000 км/с. Поэтому вспышка от выстрела почти мгновенно достигает глаз. Звук же выстрела приходит с заметным запаздыванием. Все, вероятно, замечали, что вспышка молнии предшествует раскату грома. Если гроза далеко, то время запаздывания грома достигает нескольких десятков секунд. Наконец из-за конечной скорости звука появляется эхо. Эхо — это звуковая волна, отражённая от опушки леса, крутого берега, здания и т. д.

Почему звук не распространяется в вакууме? Почему пористые материалы плохо проводят звук?

Скорость звука в воздухе при 0 °С равна 331 м/с и не зависит от его плотности. Она примерно равна средней скорости теплового движения молекул и, подобно ей, пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры.

Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нём. Так, при 0 °С скорость звука в водороде 1270 м/с, а в углекислом газе 258 м/с.

В жидкости скорость звука больше, чем в газе.
При температуре 8 °С скорость звука в воде равна 1435 м/с.

Интересно

Впервые скорость звука в воде была измерена в 1827 г. на Женевском озере в Швейцарии. На одной лодке поджигали порох и одновременно ударяли в подводный колокол. На другой лодке, которая находилась на расстоянии 14 км от первой, отмечали время наблюдения вспышки света и время улавливания звука (рис. 5.17). Звук колокола улавливался с помощью рупора, опущенного в воду. По разности времени между вспышкой света и приходом звукового сигнала определили скорость звука.

В твёрдых телах скорость звука ещё больше, чем в жидкостях. Например, в стали скорость звука при 15 °С равна 4980 м/с. То, что скорость звука в твёрдом теле больше, чем в воздухе, можно обнаружить так. Если ваш товарищ ударит по одному концу рельса, а вы приложите ухо к другому концу, то будут слышны два удара. Сначала звук достигает уха по рельсам, а затем по воздуху.



Рис. 5.17

По известной частоте колебаний и скорости звука в воздухе можно вычислить длину звуковой волны (см. § 29). Самые длинные волны, воспринимаемые ухом человека, имеют длину волны $\lambda \approx 19$ м, а самые короткие — длину волны $\lambda \approx 17$ мм.

Значение звука. Конечно, наибольшее количество информации мы получаем с помощью света. Испущенный источниками (солнцем, лампой и т. д.) свет отражается от окружающих предметов и, попадая в глаз, позволяет нам судить об их положении и движении. Многие предметы светятся сами.

Отражённые от предметов звуковые волны или волны, испускаемые звучащими предметами, также дают нам сведения об окружающем мире. Но главное — это речь. Мы создаём и воспринимаем звуковые волны и тем самым общаемся друг с другом.

Прослушивая с помощью специальных устройств, например медицинского фонендоскопа, звуки в организме, можно получать важные сведения о работе сердца и других внутренних органов.

Звуковые волны. Частота звука. Скорость звука

Найти

1. Какую звуковую волну называют плоской? сферической?
2. Почему в газах и жидкостях не существует поперечных волн?
3. Какие колебания называют акустическими?
4. От чего зависит скорость звука в воздухе?

§ 32 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ»

Уравнение волны позволяет определить смещение в любой точке среды, в которой распространяется волна, в любой момент времени. При решении задач мы обычно считаем, что затуханием волны можно пренебречь, поэтому амплитуда колебаний во всех точках одинакова. Важно знать, что при переходе волны в среду с другими физическими свойствами не изменяется частота, а изменяется только скорость её распространения.

Задача 1. Лодка качается на волнах, при этом расстояние между ближайшими гребнями волн равно 6 м. Определите скорость распространения волн, если период колебаний лодки равен 4 с.

Решение. Расстояние между двумя ближайшими гребнями — длина волны $\lambda = vT$. Отсюда $v = \frac{\lambda}{T} = 1{,}5$ м.

Задача 2. Приёмник, находящийся на расстоянии $L = 900$ м от источника, улавливает испущенный источником звук через промежуток времени $t_1 = 3$ с. Колебания в точке O, где находится источник, описываются уравнением $s_O = 0{,}02\sin 40\pi t$ (м). Определите разность фаз колебаний в точках M и N, находящихся на расстоянии 7,5 м друг от друга, и запишите уравнения колебаний в этих точках. Считайте, что звуковая волна плоская.

Решение. Уравнение плоской волны на расстоянии x от источника имеет вид $s = s_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$.

Согласно условию частота $\omega = 40\pi$. Так как известно время, за которое звук проходит расстояние от источника до приёмника, определим скорость распространения волны: $v = \frac{L}{t_1} = 300$ м/с. При распространении от источника до приёмника плоской бегущей волны колебания в некоторой точке M согласно условию задачи имеют вид $s_M = 0{,}02 \sin 40\pi\left(t - \frac{x_M}{300}\right)$ (м), где t — время, отсчитываемое с момента начала колебаний в точке, где находится источник.

Колебания в точке N описываются уравнением

$$s_N = 0{,}02 \sin 40\pi\left(t - \frac{x_M \pm 7{,}5}{300}\right) = 0{,}02 \sin\left(40\pi\left(t - \frac{x_M}{300}\right) \pm \pi\right).$$

По условию задачи неизвестно, где находится точка N — ближе к источнику или дальше от него, чем точка M, поэтому в уравнении стоит знак «±». Мы видим, что вне зависимости от положения точки N разность фаз равна π, колебания происходят в противофазе.

Задача 3. Звук распространяется в воде со скоростью 1450 м/с. Расстояние между ближайшими точками, в которых колебания происходят в противофазе, $\Delta l = 0{,}1$ м. Определите частоту звуковой волны.

Р е ш е н и е. Кратчайшее расстояние между точками, в которых колебания происходят в противофазе, равно половине длины волны. Следовательно, $\lambda = 2\Delta l$. Частота определяется по формуле $\nu = \upsilon/\lambda = \upsilon/2\Delta l = 7250$ Гц.

Задача 4. На рисунке 5.18, *а* показан мгновенный снимок волны. Как будет выглядеть мгновенный снимок этой волны в среде, в которой скорость распространения волн в 2 раза больше?

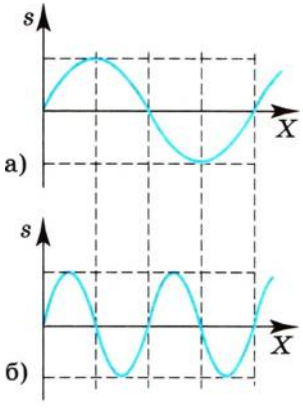


Рис. 5.18

Р е ш е н и е. При переходе в среду с другими физическими свойствами (плотностью, упругостью) частота волны не изменяется, а изменяется скорость распространения и, следовательно, длина волны, так как $\lambda = \upsilon T$. Следовательно, на том расстоянии, на котором укладывалась одна длина волны, уложится две длины волны, что показано на рисунке 5.18, *б*.

Задача 5. Можно ли определить скорость колебаний частицы в среде, в которой распространяется волна, если известна скорость распространения волны?

Р е ш е н и е. При распространении волн в среде надо различать две разные скорости — скорость колебаний частиц среды и скорость распространения волн.

Скорость колебаний — переменная величина и зависит от частоты колебаний, амплитуды, времени и начальной фазы: $\upsilon_s = s' = s_m\omega\cos\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)$.

Скорость распространения волны в однородной среде — постоянная величина и определяется только свойствами данной среды.

Поэтому определить скорость колебаний, зная скорость распространения волны, невозможно.

Задача 6. Звук от всплеска при попадании камня в воду колодца наблюдатель слышит через 2,1 с после того, как он отпустил камень. Определите расстояние до воды в колодце, если известно, что скорость звука в воздухе 340 м/с.

Р е ш е н и е. Время падения камня $t_1 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

Время, за которое звуковая волна дойдёт до наблюдателя, $t_2 = \frac{h}{\upsilon_{зв}}$. Тогда $t = t_1 + t_2 = \sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{h}{\upsilon_{зв}}$. Преобразуем уравнение и возведём в квадрат левую и правую части равенства: $\left(t - \frac{h}{\upsilon_{зв}}\right)^2 = \frac{2h}{g}$. Получим квадратное уравнение, решением которого является искомое расстояние $h \approx 20{,}5$ м.

Задачи для самостоятельного решения

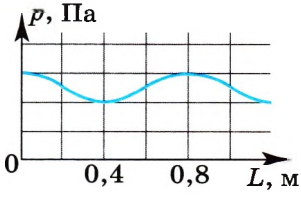
1. На расстоянии $s = 1060$ м от наблюдателя ударяют молотком по железнодорожному рельсу. Наблюдатель, приложив ухо к рельсу, услышал звук на $\tau = 3$ с раньше, чем звук дошёл до него по воздуху. Чему равна скорость звука в стали? (Скорость звука в воздухе примите равной 330 м/с.)

2. Определите разность фаз между двумя точками звуковой волны в воздухе, если разность их расстояний от источника составляет 25 см, а частота колебаний равна $\nu = 680$ Гц. (Скорость звука примите равной 340 м/с.)

3. Во сколько раз изменится длина звуковой волны при переходе звука из воздуха в воду? Скорость звука в воде 1435 м/с, в воздухе 340 м/с.

1. На расстоянии 400 м от наблюдателя рабочие вбивают сваи с помощью копра. Чему равен промежуток времени между видимым ударом молота о сваю и звуком удара, услышанным наблюдателем? Скорость звука в воздухе 340 м/с.

1) 1,4 с 2) 1,2 с 3) 0,9 с 4) 0,6 с



2. На рисунке показан график зависимости давления воздуха в некоторый момент времени от расстояния до источника звука при распространении звуковой волны. Из этого графика следует, что длина звуковой волны равна

1) 0,2 м 3) 0,8 м
2) 0,4 м 4) 1,6 м

3. Динамик подключён к выходу генератора электрических колебаний звуковой частоты. Частота колебаний 6800 Гц. Определите длину звуковой волны, зная, что скорость звука в воздухе 340 м/с.

4. В одном направлении в разных средах бегут со скоростями v_1 и v_2 ($v_1 > v_2$) две плоские волны одинаковой частоты ν. Определите расстояние между точками, расположенными в этих двух средах вдоль направления распространения волн, колебания в которых происходят в фазе.

5. При возбуждении колебаний одного конца шнура с частотой 20 Гц вдоль него распространяется волна со скоростью 250 м/с. На сколько различаются длины волн в шнуре и в воздухе, в котором колебания шнура возбуждают волны? Скорость звука в воздухе 330 м/с.

6. Провод массой 1,5 кг и длиной 30 м натянут между двумя опорами. Сила натяжения 2000 Н. Скорость распространения волны в проводе определяется формулой $v = \sqrt{\dfrac{F_н}{\Delta m/\Delta l}}$, где $F_н$ — сила натяжения провода, $\Delta m/\Delta l$ — масса на единицу длины. Определите время, за которое волна дойдёт от одной опоры до другой.

§ 33 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, ДИФРАКЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Вспомните уравнение волны.
Что является источником волн?

Сложение волн. Проще всего проследить за сложением механических волн, наблюдая волны на поверхности воды. Если мы бросим в воду два камня, то образуются две круговые волны и можно заметить, что каждая волна проходит сквозь другую и ведёт себя в дальнейшем так, как будто другой волны совсем не существовало.

Теперь посмотрим более внимательно, что происходит в местах, где волны накладываются одна на другую. Если две волны встречаются в одном месте своими гребнями, то в этом месте возмущение поверхности воды усиливается. Если же, напротив, гребень одной волны встречается с впадиной другой, то поверхность воды не будет возмущена.

В каждой точке среды колебания, вызванные двумя волнами, просто складываются.

Интересно

Множество музыкальных инструментов в оркестре или голосов в хоре создаёт звуковые волны, одновременно улавливаемые нашим ухом. Причём ухо может отличить один звук от другого.

Интерференция.

Запомни

Интерференцией называется явление наложения в пространстве волн с образованием устойчивой во времени картины максимумов и минимумов амплитуды колебаний частиц среды.

Выясним, при каких условиях наблюдается интерференция волн. Для этого рассмотрим более подробно сложение волн, образующихся на поверхности воды.

Интересно

Слово «интерференция» происходит от латинских слов inter — взаимно, между собой и ferio — ударяю, поражаю.

Можно одновременно возбудить две круговые волны в ванне с помощью двух шариков, укреплённых на стержне, которые совершают гармонические колебания (рис. 5.19).

В любой точке M на поверхности воды (рис. 5.20) будут складываться колебания, вызванные двумя волнами (от источников O_1 и O_2). Амплитуды колебаний, вызванных в точке M обеими волнами, будут, вообще говоря, различаться, так как волны проходят различные пути d_1 и d_2. Но если расстояние l между источниками много меньше этих путей ($l << d_1$ и $l << d_2$), то обе амплитуды можно считать практически одинаковыми.



Рис. 5.19

Результат сложения волн, приходящих в точку M, зависит от разности фаз колебаний, возбуждённых этими волнами в данной

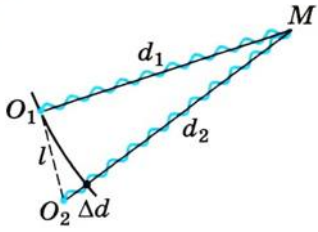


Рис. 5.20

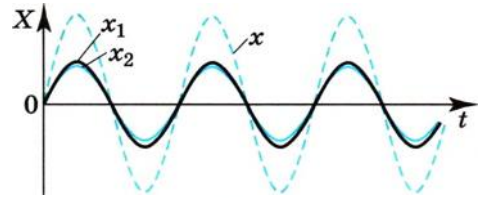


Рис. 5.21

точке. Пройдя различные расстояния d_1 и d_2, волны имеют разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$. Если разность хода равна длине волны λ, то вторая волна запаздывает по сравнению с первой на один период (именно за период волна проходит путь, равный её длине волны λ). Следовательно, в этом случае гребни (как и впадины) обеих волн совпадают.

Проведите дома описанный в тексте эксперимент. Понаблюдайте за волнами на поверхности воды.

Условие максимумов. На рисунке 5.21 изображена зависимость от времени смещений x_1 и x_2, вызванных двумя волнами при $\Delta d = \lambda$. Разность фаз колебаний равна нулю (или, что то же самое, 2π, так как период синуса равен 2π). В результате сложения этих колебаний возникают результирующие колебания с удвоенной амплитудой. Колебания результирующего смещения x показаны на рисунке цветной штриховой линией. То же самое будет происходить, если на отрезке Δd укладывается не одна, а любое целое число длин волн.

Важно

Амплитуда колебаний частиц среды в данной точке максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн:

$$\Delta d = \pm k\lambda, \qquad (5.6)$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Условие минимумов. Пусть теперь на отрезке Δd укладывается половина длины волны. Очевидно, что при этом вторая волна отстаёт от первой на половину периода. Разность фаз оказывается равной π, т. е. колебания будут происходить в противофазе. В результате сложения этих колебаний амплитуда результирующих колебаний равна нулю, т. е. в рассматриваемой точке колебаний нет (рис. 5.22). То же самое произойдёт, если на отрезке укладывается любое нечётное число полуволн.

Важно

Амплитуда колебаний частиц среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечётному числу полуволн:

$$\Delta d = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (5.7)$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Если разность хода $d_2 - d_1$ принимает промежуточное значение между λ и $\frac{\lambda}{2}$, то и амплитуда результирующих колебаний принимает некоторое постоянное промежуточное значение между удвоенной амплитудой и нулём.

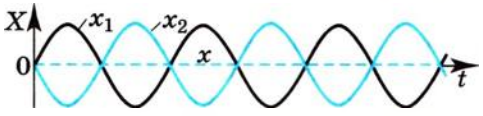


Рис. 5.22

Важно Амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени.

Запомни На поверхности воды возникает определённое, неизменное во времени распределение амплитуд колебаний, которое называют **интерференционной картиной.**

На рисунке 5.23 показана фотография интерференционной картины для двух круговых волн от двух источников. Белые участки в средней части фотографии соответствуют максимумам колебаний, а тёмные — минимумам.

Когерентные волны.

Запомни Источники, которые имеют одинаковую частоту и колебания которых имеют постоянную во времени разность фаз, называются **когерентными.**

Важно Для образования устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы источники волн были когерентными.

Когерентными называют и созданные этими источниками волны. Только при сложении когерентных волн образуется устойчивая интерференционная картина.

Интересно Слово «когерентный» происходит от латинского слова cohaereus — взаимосвязанный.

Если же разность фаз колебаний источников не остаётся постоянной, то в любой точке среды разность фаз колебаний, возбуждаемых двумя волнами, будет меняться с течением времени. Поэтому амплитуда результирующих колебаний с течением времени будет непрерывно изменяться. В результате максимумы и минимумы перемещаются в пространстве, и интерференционная картина размывается.

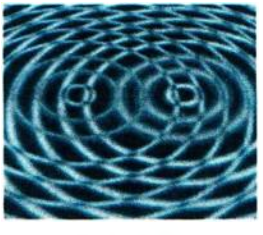


Рис. 5.23

Распределение энергии при интерференции. Волны несут энергию. Что же происходит с этой энергией в точках интерференционного минимума? Куда она исчезает?

Наличие минимума в данной точке интерференционной картины означает, что энергия сюда не поступает совсем. Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве. Она не распределяется равномерно по всем частицам среды, а концентрируется в максимумах за счёт того, что в минимумы не поступает вовсе.

Стоячая волна*. Ярким примером интерференции волн служит *стоячая волна*.

Запомни

Стоячая волна — вид волнового движения без переноса энергии. Она образуется при наложении двух волн, прямой и обратной, распространяющихся навстречу друг другу.

Обратная волна может возникнуть в результате отражения прямой волны. Уравнения этих волн запишем в виде

$$s_{\text{пр}} = s_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right), \quad s_{\text{обр}} = s_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right).$$

Можно показать, что это уравнение отражённой волны справедливо в том случае, если расстояние от источника до препятствия равно целому числу полуволн. При наложении этих волн

$$s_{\text{ст}} = s_{\text{пр}} + s_{\text{обр}} = 2s_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\sin \omega t. \qquad (5.8)$$

Важно

Уравнение (5.8) представляет собой **уравнение стоячей волны**.

Из этого уравнения следует, что амплитуда колебаний при возбуждении стоячей волны, равная $A_{\text{ст}} = 2s_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$, зависит от положения колеблющейся точки, т. е. определяет амплитуду колебаний в точке с координатой x. В точках, для которых

$$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pi n, \quad \text{т. е.} \quad x = n\frac{\lambda}{2},$$

колебания происходят с удвоенной амплитудой: $A_{\text{ст}} = 2s_m$ (интерференционные максимумы, или *пучности, стоячей волны*).

В точках, для которых

$$2\pi\frac{x}{\lambda} = (2n+1)\frac{\pi}{2}, \quad \text{т. е.} \quad x = (2n+1)\frac{\lambda}{4},$$

колебания не происходят, $A_{\text{ст}} = 0$ (интерференционные минимумы, или *узлы, стоячей волны*).

Расстояние между двумя соседними пучностями или двумя соседними узлами равно $\frac{\lambda}{2}$.

На рисунке 5.24 изображены мгновенные снимки стоячей волны в моменты времени $t = 0$, $t_1 = \frac{T}{4}$, $t_2 = \frac{T}{2}$, $t_3 = \frac{3}{4}T$, $t_4 = T$.

В таблице проведено сравнение стоячей и бегущей волн.

	Бегущая волна	Стоячая волна
Уравнение	$s = s_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$	$s = 2s_m \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin 2\pi \frac{t}{T}$
Амплитуда	Одинакова во всех точках и равна s_m	Зависит от положения колеблющейся точки: $0 \leqslant A_{ст} \leqslant 2s_m$
Фаза	Зависит от положения колеблющейся точки	Одинакова между двумя соседними узлами
Энергия	Переносит энергию	Не переносит энергию, так как в прямом и обратном направлениях за один и тот же промежуток времени переносятся равные порции энергии

Стоячие волны возбуждаются, например, в струнах музыкальных инструментов. Образование стоячей волны — частный случай интерференции волн.

Рассмотрим возбуждение стоячей волны в струне, закреплённой с двух концов (рис. 5.25). Очевидно, что точки закрепления будут являться узлами стоячей волны. Самая большая длина волны, возбуждаемая в струне длиной L, будет при условии $L = \frac{\lambda}{2}$, $\lambda = 2L$. Такая длина волны соответствует самой низкой частоте ν_1. На рисунке 5.26 показаны возможные волны в струне. Частоты колебаний, возбуждённых этими волнами, кратны ν_1:

$\nu_n = n\nu_1$, где $n = 1, 2, 3, \ldots$.

Подумайте, будет ли образовываться стоячая волна в трубе, наполненной воздухом. Если да, то где будут находиться узлы стоячей волны в закрытой с двух сторон трубе?

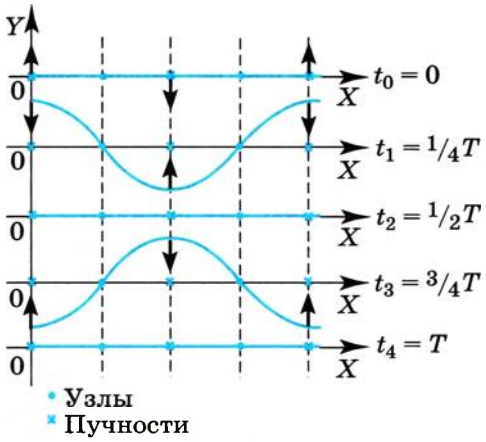


Рис. 5.24

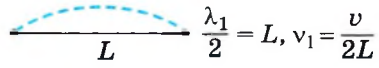


Рис. 5.25

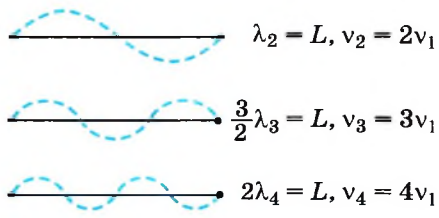


Рис. 5.26

Запомни Частоты, при которых возникают стоячие волны, называются **собственными** или **резонансными частотами**.

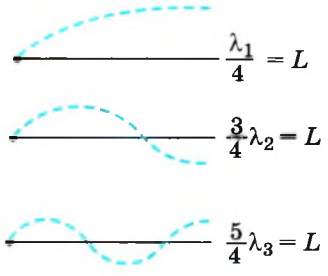


Рис. 5.27

Если оттянуть и отпустить струну или дотронуться до неё смычком, то в ней возникают волны с различными частотами, которые определяются параметрами струны (собственные, или резонансные, частоты). Если нет затухания, то эти волны могут существовать бесконечно долго.

Если один из концов струны сделать свободным (рис. 5. 27), то на свободном конце будет пучность стоячей волны, а на закреплённом – узел. Тогда наибольшая длина волны $\lambda = 4L$, а наименьшая частота $\nu_1 = \frac{v}{4L}$, соответственно резонансные частоты равны:

$$\nu_n = n\frac{v}{4L}, \text{ где } n = 1, 3, 5, 7, \ldots .$$

Привяжите верёвку к столу или к стенке и, меняя частоту колебаний, возбудите стоячую волну. Определите длину волны и сравните её с расстоянием от источника (вашей руки) до препятствия.

Если поместить рядом две одинаковые струны и в одной из них возбудить колебания, то вторая струна начинает звучать. Это явление получило название *акустического резонанса*.

Запомни **Акустическим резонансом** называется явление возрастания амплитуды звуковой волны в системе при приближении частоты источника, возбуждающего в ней колебания, к собственной частоте колебаний системы.

Дифракция. Нередко волна встречает на своём пути небольшие (по сравнению с длиной волны) препятствия, которые она способна огибать. Когда размеры препятствий малы, волны, огибая края препятствий, смыкаются за ними. Так, морские волны свободно огибают выступающий из воды камень, если его размеры меньше длины волны или сравнимы с ней. За камнем волны распространяются так, как если бы его не было совсем. Только за препятствием большого по сравнению с длиной волны размера образуется тень: волны за него не проникают.

Интересно Слово «дифракция» происходит от латинского слова difractus — разломанный.

Способностью огибать препятствия обладают и звуковые волны. Вы можете слышать сигнал машины за углом дома, когда самой машины не видно.

Запомни Отклонение от прямолинейного распространения волн, или огибание волнами препятствий, называется **дифракцией.**

Дифракция присуща любому волновому процессу, так же как и интерференция. При дифракции происходит искривление волновых поверхностей у краёв препятствий.



Рис. 5.28

Явление дифракции волн на поверхности воды можно наблюдать, если, например, поставить на пути волн экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны (рис. 5.28). В этом опыте хорошо видно, что за экраном распространяется круговая волна, как если бы в отверстии экрана находилось колеблющееся тело — источник волн. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн. Огибающая фронт волн от вторичных источников поверхность даёт положение нового фронта волны (рис. 5.29). Луч, определяющий направление распространения волны, перпендикулярен фронту. Мы видим, что волна огибает препятствие.

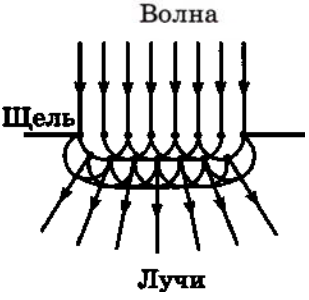


Рис. 5.29

Важно Необходимым условием наблюдения дифракции является соизмеримость препятствия с длиной волны.

Если же размеры щели велики по сравнению с длиной волны, то картина распространения волн за экраном совершенно иная (рис. 5.30). Волна проходит сквозь щель, почти не меняя своей формы.



Рис. 5.30

Поляризация волн.

Запомни **Плоскополяризованной волной** называется волна, при распространении которой колебания частиц происходят в одной плоскости.

Если на пути волны поставить преграду в виде пластины с вертикальной прорезью, то поперечная волна будет распространяться и за пластиной, однако колебания в этой волне будут происходить только в вертикальной плоскости. Эта волна будет плоскополяризованной. Если в шнуре возбудить колебания в горизонтальной плоскости, то волна дойдёт только до пластины и дальше распространяться не будет. Очевидно, что поляризация может происходить только в случае поперечных волн. Продольная волна не поляризуется.

Интерференция. Дифракция. Поляризация. Стоячая волна — Найти

1. Какие волны называют когерентными?
2. Что называют интерференцией?
3. Приведите примеры дифракции волн, не упомянутые в тексте.
4. При каких условиях дифракция волн проявляется особенно отчётливо?

§ 34 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН»

При решении задач на явление интерференции надо сначала убедиться в том, что источники волн когерентны, сравнить моменты времени начала работы источников. Разность фаз колебаний, вызываемых этими источниками в определённой точке пространства, определяется не только разностью хода волн, но и разностью начальных фаз колебаний источников.

Задача 1. Два когерентных источника, одновременно излучающие звук на частоте 51 Гц, расположены на расстоянии 50 м друг от друга. Человек находится на расстоянии 30 м от одного источника и на расстоянии 40 м от другого. Услышит ли он звук? Скорость звука 340 м/с. Поглощением энергии звуковых волн можно пренебречь.

Р е ш е н и е. Так как источники когерентны, то при наложении испускаемых ими волн образуется интерференционная картина. Интерференционный максимум наблюдается в точках, для которых разность хода $x_1 - x_2 = \pm k\lambda$, минимумы в точках $x_1 - x_2 = \pm (2k + 1)\lambda/2$. Определим разность хода волн до места, где стоит человек: $x_1 - x_2 = n\lambda = n\,v/\nu$. Отсюда $n = \dfrac{(x_1 - x_2)\nu}{v} = 1{,}5$. Таким образом, на разности хода укладывается нечётное число половин длин волн ($k = 1$). Это означает, что при равных амплитудах излучаемых источниками волн человек не услышит никакого звука, несмотря на то что оба источника работают. (Напомним, что чем больше амплитуда колебаний в звуковой волне, тем громче звук.)

Задача 2. Труба длиной 1 м открыта с обоих концов. Определите самую низкую резонансную частоту в трубе. Скорость звука равна 330 м/с.

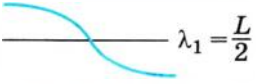


Рис. 5.31

Р е ш е н и е. На концах открытой трубы будут пучности стоячей волны. Самая низкая частота $\nu = \dfrac{v_{зв}}{\lambda}$ соответствует максимальной длине волны. Очевидно, что длина волны при этом равна двум длинам трубы (рис. 5.31): $\lambda = 2L$.

Зная скорость звука, получим $\nu_1 = \dfrac{v_{зв}}{\lambda} = \dfrac{v_{зв}}{2L} = 165\ \text{с}^{-1} = 165$ Гц.

Задача 3. Частота колебаний камертона равна 440 Гц. Чему должна быть равна длина закреплённой с двух сторон струны, чтобы она и камертон звучали в унисон? Скорость звука равна 750 м/с.

Р е ш е н и е. Камертон и струна звучат в унисон, если частота колебаний струны совпадает с частотой колебаний камертона.

Длина струны $L = \dfrac{\lambda}{2}$, в свою очередь, длина волны $\lambda = \dfrac{v}{\nu}$.

Окончательно имеем $L = \dfrac{v}{2\nu} = 85$ см.

Задача 4. На поверхности воды плавает бревно. Проходящий катер возбуждает волны, при этом за бревном колебания поверхности воды не наблюдаются (область тени). Всегда ли при данном препятствии это будет так?

Р е ш е н и е. Проявление дифракции зависит от соотношения между длиной волны и размерами препятствия. В приведённом случае очевидно, что длина волны, возбуждаемой катером на поверхности воды, меньше размеров препятствия, в данном случае бревна. Если на поверхности воды возбудить волны большей длины, то будет наблюдаться дифракция волн. Заметим, что дифракция волн наблюдается и заход волн в область тени будет существен, если длина волны порядка размеров препятствия.

В случае очень маленьких препятствий, когда длина волны существенно больше размеров препятствия, например стеблей водных растений, волны распространяются по поверхности воды, не замечая этих препятствий.

Задачи для самостоятельного решения

1. Шнур длиной 2,6 м одним концом привязан к стене, а другой конец колеблется с частотой 10 Гц. В шнуре возбуждаются стоячие волны. Между источником и стеной 12 узлов. Определите скорость распространения волны в шнуре.

2. Две последовательные резонансные частоты равны 320 и 360 Гц. Определите частоту основного тона и самую низкую резонансную частоту.

3. Два когерентных источника излучают волны длиной 40 Гц с амплитудой A, при этом второй источник начинает излучать волны на 0,0375 с позже. Чему равна амплитуда колебаний в точке, находящейся на равных расстояниях от источников?

4. Свободная скрипичная струна колеблется с частотой 180 Гц. С какой частотой будет звучать струна, если её уменьшить на четверть длины?

5. Два когерентных источника звука одновременно возбуждают в среде колебания. В точке, отстоящей от первого источника на 2 м, а от второго на 2,5 м, звук не слышен. Определите частоту этого звука. Скорость звука примите равной 340 м/с.

ЕГЭ

Повторите материал главы 5 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

«Мир звуков»

1. Звуковые волны — механические волны.
2. Источники звука в живой природе.
3. Шумы, создаваемые различными механизмами.
4. Музыкальные инструменты. Особенности их звучания. Скрипки Страдивари.
5. Субъективные и объективные характеристики звука.

«Изучение интерференции и дифракции волн на примере волн на поверхности жидкости».

ГЛАВА 6 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Механические волны распространяются только в упругих средах: газе, жидкости или твёрдом теле. Существуют, однако, волны, которые не нуждаются в каком-либо веществе для своего распространения. Это электромагнитные волны. К ним, в частности, относятся радиоволны и свет. Несмотря на существенное отличие электромагнитных волн от механических, электромагнитные волны при распространении ведут себя подобно механическим.

§ 35 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Сформулируйте закон электромагнитной индукции.

Вихревое электрическое поле. При изменении со временем магнитного потока через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в нём возникает, как вы уже знаете, электрический ток (явление электромагнитной индукции). Можно предположить, что электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается меняющимся магнитным полем. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство поля:

Важно изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле.

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую природу, чем электростатическое.

Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряжённости не могут на них начинаться и кончаться.

Запомни **Вихревым электрическим полем** называется поле, силовые линии которого нигде не начинаются и не заканчиваются, а представляют собой замкнутые линии (рис. 6.1), подобные линиям индукции магнитного поля.

Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряжённость электрического поля. Согласно правилу Ленца при *возрастании* магнитной индукции $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0\right)$ направление силовых линий вектора напряжённости $\vec{E}$ возникающего электрического поля совпадает с направлением вращения ручки буравчика (винта), движущегося поступательно в направлении, *противоположном* вектору индукции $\vec{B}$ магнитного поля. Напротив, при *убывании* магнитной индукции $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0\right)$ буравчик должен поступательно двигаться по направлению вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля, и направление вращения ручки буравчика укажет направление силовых линий напряжённости возникающего электрического поля.

В свою очередь, направление силовых линий напряжённости $\vec{E}$ совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд q (сторонняя сила), по-прежнему равна $\vec{F} = q\vec{E}$. Но в отличие от случая стационарного электрического поля работа вихревого поля по перемещению заряда q на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряжённости электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению.

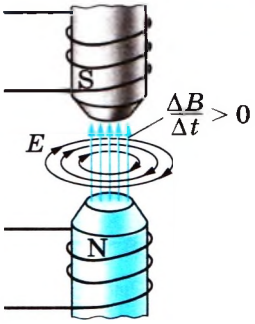


Рис. 6.1

Важно *Работа вихревого электрического поля* при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

Итак, согласно гипотезе Максвелла переменное магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля.

Назовите, в чём сходство, а в чём различия электростатического и вихревого электрического полей.

Изучая свойства электромагнитного поля, Дж. К. Максвелл задался вопросом: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то не существует ли в природе обратного процесса? Не порождает ли переменное электрическое поле, в свою очередь, магнитное? Это соображение, диктуемое уверенностью в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии её законов, составляет основу гипотезы Максвелла.

Возникновение магнитного поля при изменении электрического поля. Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе.

Важно Во всех случаях, когда электрическое поле изменяется со временем, оно порождает магнитное поле.

Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряжённости электрического поля (рис. 6.2), подобно тому как они охватывают проводник с током. При возрастании напряжённости электрического поля вектор индукции $\vec{B}$ возникающего магнитного поля направлен в сторону вращения ручки буравчика, поступательно движущегося *в направлении* вектора $\vec{E}$, а при убывании напряжённости электрического поля направление вектора $\vec{B}$ изменяется на противоположное.

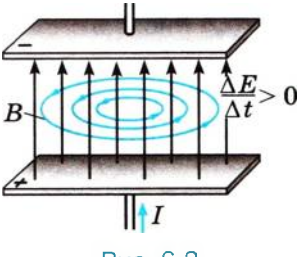


Рис. 6.2

Согласно гипотезе Максвелла магнитное поле, например, при зарядке конденсатора после замыкания ключа создаётся изменяющимся во времени

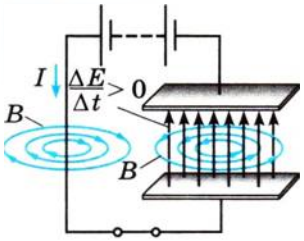


Рис. 6.3

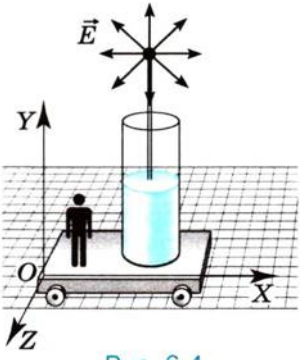


Рис. 6.4

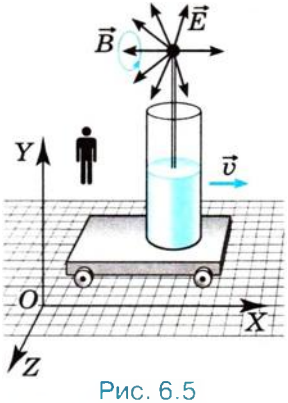


Рис. 6.5

электрическим полем, существующим в пространстве между обкладками конденсатора (рис. 6.3). Причём магнитное поле направлено так, как если бы между обкладками существовал электрический ток, такой же, как в проводнике. Справедливость гипотезы Максвелла была доказана экспериментальным обнаружением электромагнитных волн.

Электромагнитное поле. После открытия взаимосвязи между изменяющимися электрическим и магнитным полями стало ясно, что эти поля не существуют обособленно, независимо одно от другого. Нельзя создать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло и электрическое поле. И наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного.

Не менее важно и то, что электрическое поле без магнитного или магнитное без электрического может существовать лишь по отношению к определённой системе отсчёта. Так, покоящийся заряд создаёт только электрическое поле (рис. 6.4). Но ведь заряд покоится лишь относительно определённой системы отсчёта. Относительно других систем отсчёта он может двигаться и, следовательно, создавать и магнитное поле (рис. 6.5).

Точно так же в системе отсчёта, связанной с магнитом, обнаруживается лишь магнитное поле. Но движущийся относительно магнита наблюдатель обнаружит и электрическое поле. Ведь в системе отсчёта, движущейся относительно магнита, магнитное поле будет меняться с течением времени по мере приближения наблюдателя к магниту или удаления от него. Переменное же во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Значит, утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, бессмысленно, если не указать, по отношению к какой системе отсчёта эти поля рассматриваются.

Важно Электрические и магнитные поля — проявление единого целого — электромагнитного поля.

Запомни **Электромагнитное поле** — особая форма материи, осуществляющая электромагнитное взаимодействие.

В зависимости от того, в какой системе отсчёта рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны единого целого — электромагнитного поля. Все инерциальные системы отсчёта равноправны. Поэтому ни одному из обнаруживаемых проявлений электромагнитного поля не может быть отдано предпочтение.

Рассмотрим взаимодействие двух зарядов. Сместим один из зарядов. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное же магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле и т. д.

Перемещение заряда вызывает, таким образом, электромагнитное поле, которое, распространяясь, охватывает всё большие и большие области окружающего пространства, изменяя электростатическое поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, это электромагнитное поле достигает другого заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы.

Важно

Процесс распространения электромагнитного поля, механизм которого был открыт Максвеллом, происходит с конечной, хотя и очень большой, скоростью, равной скорости света.

В этом и состоит фундаментальное свойство поля, которое не оставляет сомнений в его реальности.

Электромагнитная волна. Представьте себе, что электрический заряд был приведён в быстрые колебания вдоль некоторой прямой. Заряд движется подобно телу, подвешенному на пружине, но только колебания его происходят со значительно большей частотой. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнёт периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а оно, в свою очередь, вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

Интересно

Теория, основанная на представлениях о существовании электромагнитного поля и конечной скорости передачи взаимодействий, называется *теорией близкодействия*.

В окружающем заряд пространстве, захватывая всё большие и большие области, возникает система взаимно перпендикулярных, периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рисунке 6.6 изображён мгновенный снимок такой системы полей на большом расстоянии от колеблющегося заряда.

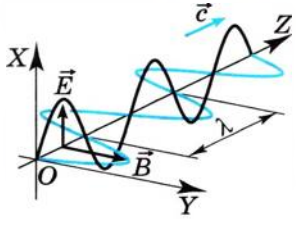


Рис. 6.6

На этом рисунке показаны векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в различных точках пространства. Направление Z — одно из направлений распространения электромагнитных возмущений. Образуется так называемая *электромагнитная волна*, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

Начертите мгновенный снимок электромагнитной волны через половину периода ($T/2$).

В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут её колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания каждого из этих векторов происходят с различными фазами.

Колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в любой точке совпадают по фазе. Кратчайшее расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания происходят в одинаковых фазах, есть длина волны λ. В данный момент времени векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ меняются в пространстве по оси Z по формуле синуса с периодом λ.

Важно Направления двух колеблющихся векторов — напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля — перпендикулярны направлению распространения волны. Электромагнитная волна является *поперечной*.

Запишите уравнение электромагнитной волны, т. е. уравнения $E(z, t)$ и $B(z, t)$.

Таким образом, векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения волны. Если вращать буравчик от вектора $\vec{E}$ к вектору $\vec{B}$, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с направлением вектора скорости волны $\vec{c}$ (см. рис. 6.6).

Излучение электромагнитных волн. Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т. е. что они движутся с ускорением.

Важно Наличие ускорения у движущихся зарядов — главное условие излучения ими электромагнитных волн.

Интересно Максвелл был глубоко убеждён в реальности электромагнитных волн. Но он не дожил до того времени, когда они были экспериментально обнаружены. Лишь через 10 лет после его смерти электромагнитные волны были экспериментально получены Г. Герцем.

Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом достаточно быстром изменении его скорости. Интенсивность излучаемой волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Наглядно это можно представить себе так. При движении заряженной частицы с постоянной скоростью созданные ею электрическое и магнитное поля, подобно развевающемуся шлейфу, сопровождают частицу. При ускорении частицы обнаруживается присущая электромагнитному полю инертность. Поле «отрывается» от частицы и начинает самостоятельное существование в форме электромагнитных волн.

Энергия электромагнитного поля волны в любой фиксированный момент времени меняется периодически в пространстве вместе с изменением векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Бегущая волна несёт с собой энергию, перемещающуюся со скоростью $\vec{c}$ вдоль направления распространения волны. В результате этого энергия, переносимая электромагнитной волной в любой точке пространства, меняется периодически со временем.

Электромагнитное поле. Электромагнитная волна

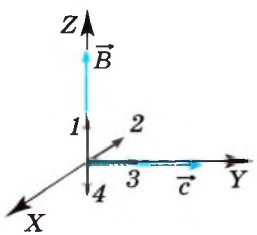
1. Вследствие каких процессов возникает магнитное поле?
2. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое поле или только магнитное поле, не является точным?
3. Как ориентированы векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{c}$ по отношению друг к другу в электромагнитной волне?
4. Как должна двигаться частица, чтобы она излучала электромагнитные волны?

1. Какое из природных явлений **не может** служить примером излучения электромагнитных волн?
1) молния
2) полярное сияние
3) излучение звёзд
4) гром

2. Согласно теории Максвелла заряженная частица излучает электромагнитные волны в вакууме
1) только при равномерном движении по прямой в инерциальной системе отсчёта (ИСО)
2) только при гармонических колебаниях в ИСО
3) только при равномерном движении по окружности в ИСО
4) при любом ускоренном движении в ИСО

3. В электромагнитной волне, распространяющейся в вакууме со скоростью $\vec{v}$, происходят колебания векторов напряжённости электрического поля $\vec{E}$ и индукции магнитного поля $\vec{B}$. При этих колебаниях векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$ имеют взаимную ориентацию
1) $\vec{E} \perp \vec{B}$, $\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{v}$, $\vec{B} \uparrow\uparrow \vec{v}$
2) $\vec{E} \perp \vec{B}$, $\vec{E} \perp \vec{v}$, $\vec{B} \perp \vec{v}$
3) $\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{B}$, $\vec{E} \perp \vec{v}$, $\vec{B} \perp \vec{v}$
4) $\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{B}$, $\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{v}$, $\vec{B} \uparrow\uparrow \vec{v}$

4. На рисунке в декартовой системе координат представлены вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля в электромагнитной волне и вектор скорости $\vec{c}$ её распространения. Направление вектора напряжённости электрического поля $\vec{E}$ в волне совпадает со стрелкой
1) *1* 2) *2* 3) *3* 4) *4*



§ 36 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существует ли взаимосвязь электрических и магнитных полей?
В чём состоит фундаментальное свойство электромагнитного поля?

В предыдущем параграфе говорилось, что чем быстрее меняется со временем магнитная индукция, тем больше напряжённость возникающего электрического поля. И в свою очередь, чем быстрее меняется напряжённость электрического поля, тем больше магнитная индукция.

Следовательно,

Важно для образования интенсивных электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты.

Колебания высокой частоты, значительно превышающей частоту промышленного тока (50 Гц), можно получить с помощью колебательного контура. Циклическая частота колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ будет тем больше, чем меньше индуктивность L и ёмкость C контура.

Открытый колебательный контур. Однако большая частота электромагнитных колебаний ещё не гарантирует интенсивного излучения электромагнитных волн. В обычном контуре, какой изображён на рисунке 4.1 (его можно назвать закрытым), почти всё магнитное поле сосредоточено внутри катушки, а электрическое — внутри конденсатора.

Вдали от контура электромагнитного поля практически нет. Такой контур очень слабо излучает электромагнитные волны.



Г. Герц
(1857—1894)

Для получения электромагнитных волн Г. Герц использовал простое устройство, которое в его честь было названо *вибратором Герца*. Это устройство представляет собой *открытый колебательный контур*.

К открытому контуру можно перейти от закрытого, если постепенно раздвигать пластины конденсатора (рис. 6.7), уменьшая их площадь и одновременно уменьшая число витков в катушке. В конце концов получится просто прямой провод. Это и есть открытый колебательный контур. Ёмкость и индуктивность вибратора Герца малы, поэтому соответствующая им частота колебаний весьма велика.

В открытом контуре заряды не сосредоточены на его концах, а распределены по всему проводнику. Ток в данный момент времени во всех сечениях проводника направлен в одну и ту же сторону, но сила тока неодинакова в различных сечениях проводника. На концах она равна нулю, а посредине достигает максимума. (Напомним, что в обычных цепях переменного тока сила тока во всех сечениях в данный

момент времени одинакова.) Электромагнитное поле охватывает всё пространство вблизи контура.

Для возбуждения колебаний в таком контуре во времена Герца поступали так. Провод разрезали посредине с таким расчётом, чтобы оставался небольшой воздушный промежуток, называемый искровым (рис. 6.8). На разрезанные концы надевали небольшие шарики. Обе части проводника заряжали до высокой разности потенциалов. Когда разность потенциалов превышала некоторое предельное значение, между шариками проскакивала искра (рис. 6.9), цепь замыкалась, и в открытом контуре возникали колебания.

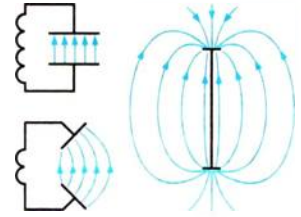


Рис. 6.7

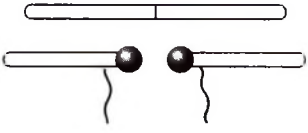


Рис. 6.8

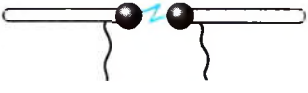


Рис. 6.9

Колебания в открытом контуре затухают по двум причинам: во-первых, вследствие наличия у контура активного сопротивления; во-вторых, из-за того, что вибратор излучает электромагнитные волны и теряет при этом энергию. После того как колебания прекращаются, оба проводника вновь заряжают от источника до наступления пробоя искрового промежутка, и всё повторяется сначала.

Опыты Герца. Герц получал электромагнитные волны, возбуждая в вибраторе с помощью источника высокого напряжения серию импульсов быстропеременного тока. Колебания электрических зарядов в вибраторе создают электромагнитную волну. Только колебания в вибраторе совершает не одна заряженная частица, а огромное число электронов, движущихся согласованно. В электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу. В данном случае вектор $\vec{E}$ лежит в плоскости, проходящей через вибратор, а вектор $\vec{B}$ перпендикулярен этой плоскости. Излучение волн происходит с максимальной интенсивностью в направлении, перпендикулярном оси вибратора. Вдоль этой оси излучения не происходит.

Электромагнитные волны регистрировались Герцем с помощью приёмного вибратора (резонатора), представляющего собой такое же устройство, как и излучающий вибратор. Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны в приёмном вибраторе возбуждаются колебания тока. Если собственная частота приёмного вибратора совпадает с частотой электромагнитной волны, наблюдается резонанс. Колебания в резонаторе происходят с большей амплитудой при расположении его параллельно излучающему вибратору. Герц обнаружил эти колебания, наблюдая искорки в очень маленьком промежутке между проводниками приёмного вибратора.

Учёный не только получил электромагнитные волны, но и открыл, что они ведут себя подобно другим видам волн. В частности, он наблюдал отражение электромагнитных волн от металлического листа и интерференцию волн.



Укажите несколько возможных направлений векторов $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$ в электромагнитных волнах, излучаемых вибратором, показанным на рисунке 6.8.

При сложении волны, идущей от вибратора, с волной, отражённой от металлического листа, образуются максимумы и минимумы амплитуды колебаний — *интерференционная картина.* Если перемещать резонатор, можно найти положения максимумов и определить длину волны.

Скорость электромагнитных волн. В опытах Герца длина волны составляла несколько десятков сантиметров. Вычислив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора, Герц смог определить скорость электромагнитной волны по формуле $v = \lambda\nu$. Она оказалась приближённо равной скорости света: $c \approx 300\ 000$ км/с.

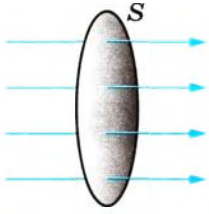


Рис. 6.10

Опытами Герца были блестяще подтверждены предсказания Максвелла.

Плотность потока излучения. Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, скорость которой перпендикулярна поверхности площадью S. На рисунке 6.10 изображена такая поверхность.

Прямые линии — лучи — указывают направления распространения электромагнитных волн.

Запомни

Лучи — линии, перпендикулярные поверхностям, во всех точках которых колебания происходят в одинаковых фазах, — **волновым поверхностям** (см. § 30).

Волна переносит энергию.

Запомни

Плотностью потока электромагнитного излучения I называют отношение электромагнитной энергии ΔW, переносимой волной за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S, к произведению площади S на время Δt:

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}. \qquad (6.1)$$

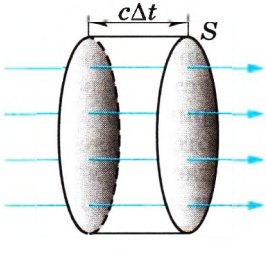


Рис. 6.11

Фактически это мощность электромагнитного излучения (энергия в единицу времени), проходящего через единицу площади поверхности. Плотность потока излучения в СИ выражают в *ваттах на квадратный метр* (Вт/м^2). Иногда эту величину называют *интенсивностью волны.*

Выразим интенсивность I через плотность электромагнитной энергии и скорость c её распространения. Выберем поверхность площадью S, перпендикулярную лучам, и построим на ней как на основании цилиндр с образующей $c\Delta t$ (рис. 6.11). Объём цилиндра $\Delta V = Sc\Delta t$. Энергия электромагнитного поля внутри цилиндра равна произведению плотности энергии на объём: $\Delta W = wc\Delta tS$. Вся эта энергия за время Δt пройдёт через правое основание цилиндра. Поэтому из формулы (6.1) получаем

$$I = \frac{wc\Delta tS}{S\Delta t} = wc. \qquad (6.2)$$

Важно Плотность потока излучения равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость её распространения.

Точечный источник излучения. Источники излучения электромагнитных волн могут быть весьма разнообразными. Простейшим является *точечный источник*.

Запомни Источник излучения считается **точечным**, если его размеры много меньше расстояния, на котором оценивается его действие, и он посылает электромагнитные волны по всем направлениям с одинаковой интенсивностью.

Точечный источник — такая же идеализация реальных источников, как и другие модели, принятые в физике: материальная точка, идеальный газ и т. д. Звёзды излучают свет, т. е. электромагнитные волны. Так как расстояния до звёзд в огромное число раз превышают их размеры, то именно звёзды представляют собой лучшее реальное воплощение точечных источников.

Зависимость плотности потока излучения от расстояния до точечного источника. Окружив точечный источник сферической поверхностью, мы видим, что при удалении от источника волна переносит ту же энергию через поверхность всё большей площади. Поэтому энергия, передаваемая через поверхность единичной площадки за единицу времени, т. е. плотность потока излучения, уменьшается по мере удаления от источника.

Поместим точечный источник в центр сферы радиусом R. Площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2$. Если считать, что источник по всем направлениям за время t излучает суммарную энергию ΔW, то

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t}\,\frac{1}{R^2}. \qquad (6.3)$$

Вспомните, какие ещё физические величины изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния.

Важно Плотность потока излучения от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.

Зависимость плотности потока излучения от частоты. Излучение электромагнитных волн происходит при ускоренном движении заряженных частиц. Напряжённость $\vec{E}$ электрического поля и магнитная индукция $\vec{B}$ электромагнитной волны пропорциональны ускорению $\vec{a}$ излучающих частиц. Ускорение при гармонических колебаниях пропорционально квадрату частоты. Поэтому напряжённость электрического поля и магнитная индукция также пропорциональны квадрату частоты колебаний:

$$E \sim a \sim \omega^2, \quad B \sim a \sim \omega^2. \qquad (6.4)$$

Плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряжённости поля. Энергия магнитного поля, как это можно показать, пропорциональна квадрату магнитной индукции. Полная плотность энергии

электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей. С учётом формулы (6.2) плотность потока излучения

$$I \sim w \sim (E^2 + B^2). \qquad (6.5)$$

Так как согласно выражениям (6.4) $E \sim \omega^2$ и $B \sim \omega^2$, то

$$I \sim \omega^4. \qquad (6.6)$$

Важно Плотность потока излучения пропорциональна четвёртой степени частоты.

При увеличении частоты колебаний заряженных частиц в 2 раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз! В антеннах радиостанций поэтому возбуждают колебания больших частот: от десятков тысяч до десятков миллионов герц.

Опыты Герца. Плотность потока электромагнитного излучения — Найти

1. Почему обычный (закрытый) колебательный контур нельзя использовать для излучения и регистрации электромагнитных волн?
2. Чему равна скорость распространения электромагнитных взаимодействий?
3. Передающий и приёмный вибраторы расположены взаимно перпендикулярно. Возникнут ли колебания в приёмном вибраторе?
4. Какую величину называют плотностью потока электромагнитного излучения?
5. Какой источник излучения называется точечным?
6. Почему переменный ток в осветительной сети практически не излучает электромагнитных волн?

1. Известно, что при раздвигании пластин конденсатора в колебательном контуре происходит излучение электромагнитных волн. В ходе излучения амплитудное значение напряжения на конденсаторе
1) возрастает
2) не изменяется
3) убывает
4) зависит от начального заряда на конденсаторе

2. Радиостанция работает на частоте $4 \cdot 10^8$ Гц. Чему равна длина волны, излучаемой антенной радиостанции? Скорость распространения электромагнитных волн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.
1) 1,33 м
2) 0,75 м
3) 1,2 м
4) $1{,}2 \cdot 10^{16}$ м

3. В первых экспериментах по изучению распространения электромагнитных волн в воздухе были измерены длина волны $\lambda = 50$ см и частота излучения $\nu = 500$ МГц. На основе этих неточных значений скорость света примерно равна
1) 100 000 км/с
2) 200 000 км/с
3) 250 000 км/с
4) 300 000 км/с

4. Колебательный контур радиоприёмника настроен на радиостанцию, работающую на волне 100 м. Как нужно изменить ёмкость конденсатора колебательного контура, чтобы он был настроен на волну 25 м? Индуктивность катушки считайте неизменной.
1) увеличить в 4 раза
2) уменьшить в 4 раза
3) увеличить в 16 раз
4) уменьшить в 16 раз

§ 37 ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Какова принципиальная схема опытов Герца?
В чём научное и практическое значение этих опытов?

Изобретение радио. В 1890 г. появилось сообщение французского физика Эдуарда Бранли о том, что при облучении металлического порошка электромагнитными волнами его сопротивление резко уменьшалось. Следовательно, трубка, наполненная таким порошком, предположительно может показать наличие электромагнитных волн. В 1894 г. английский физик О. Лодж изготовил и применил прибор, состоящий из стеклянной трубки с двумя электродами, наполненной порошком, для обнаружения электромагнитных волн. Он назвал этот прибор *когерером*.

В России одним из первых изучением электромагнитных волн занялся преподаватель офицерских курсов в Кронштадте А. С. Попов. Появление когерера вдохновило его на создание первого в мире приёмника волн.

Приёмник Попова устроен следующим образом (рис. 6.12). Трубка с металлическими опилками (когерер) подвешена горизонтально между зажимами M и N на лёгкой часовой пружине, которая для большей эластичности согнута со стороны одного зажима зигзагом. Над трубкой расположен звонок так, чтобы при своём движении молоточек мог легко ударять посередине трубки, защищённой от разбивания резиновым кольцом. Трубка и звонок закреплены на общей вертикальной дощечке. Последовательно с когерером включены реле и источник постоянного напряжения.



А. С. Попов
(1859—1906)

Действует прибор следующим образом. Ток батареи постоянно циркулирует от зажима P к платиновой пластинке A, далее через порошок, содержащийся в трубке, к другой пластинке B и по обмотке электромагнита реле обратно к батарее. Сила этого тока недостаточна для притягивания якоря реле. Но если трубка AB подвергается действию электромагнитных волн, между опилками проскакивают искорки, и сопротивление мгновенно уменьшается в 100—200 раз, благодаря этому сила тока увеличивается настолько, что якорь реле притягивается. В этот момент цепь, идущая от батареи к звонку, прерванная в точке C, замыкается.

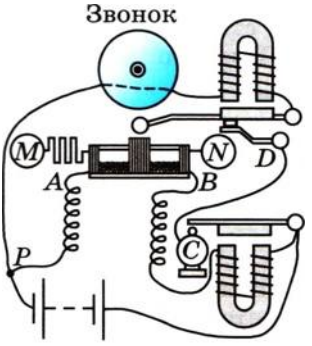


Рис. 6.12

Электромагнит притягивает пластинку с прикреплённым к ней молоточком, и он ударяет по чаше звонка. Двигаясь назад, молоточек, ударяя по когереру, встряхивает его, и реле размыкает цепь звонка. Аппарат снова готов к приёму.

Интересно Слово «когерер» происходит от английского слова coherer, что в переводе означает «связывающий».

Обсудите устройство реле. На каком физическом явлении основана его работа?

Чтобы повысить чувствительность аппарата, А. С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки, создав тем самым первую в мире приёмную антенну для беспроволочной связи. Заземление превращает проводящую поверхность Земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приёма.

Хотя современные радиоприёмники очень мало напоминают приёмник А. С. Попова, основные принципы их действия те же, что и в его приборе. Современный приёмник также имеет антенну, в которой приходящая волна вызывает очень слабые электромагнитные колебания. Как и в приёмнике А. С. Попова, энергия этих колебаний не используется непосредственно для приёма. Слабые сигналы лишь управляют источниками энергии, питающими последующие цепи. Сейчас такое управление осуществляется с помощью полупроводниковых приборов.

Интересно Первая радиограмма, переданная на расстояние 250 м, состояла из двух слов: «Генрих Герц».

Вначале радиосвязь была установлена на расстоянии 250 м.

Неустанно работая над своим изобретением, А. С. Попов вскоре добился дальности связи более 600 м. Затем на манёврах Черноморского флота в 1899 г. учёный установил радиосвязь на расстоянии свыше 20 км, а в 1901 г. дальность радиосвязи была уже 150 км. Важную роль в этом сыграла новая конструкция передатчика. Искровой промежуток был размещён в колебательном контуре, индуктивно связанном с передающей антенной и настроенном с ней в резонанс. Существенно изменились и способы регистрации сигнала. Параллельно звонку был подключён телеграфный аппарат, позволивший вести автоматическую запись сигналов. В 1899 г. была обнаружена возможность приёма сигналов с помощью телефона. В начале 1900 г. радиосвязь успешно использовали в ходе спасательных работ в Финском заливе. При участии А. С. Попова радиосвязь начали применять на флоте и в армии России.

7 мая, день, когда А. С. Попов продемонстрировал работу своего приёмника, стал днём рождения радио. Ныне он ежегодно отмечается в нашей стране.

Принцип радиосвязи.

Важно Принцип радиосвязи заключается в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстро меняющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приёмной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. генератора незатухающих электромагнитных колебаний. Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов («точки» и «тире») электромагнитных волн, стала возможной

надёжная и высококачественная *радиотелефонная связь* — передача речи и музыки с помощью электромагнитных волн.

Интересно

За границей усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили осуществить радиотелеграфную передачу через Атлантический океан.

Радиотелефонная связь. При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн.

Однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что частота звуковых колебаний мала, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты имеют малую интенсивность.

Для осуществления радиотелефонной связи необходимо использовать высокочастотные колебания, интенсивно излучаемые антенной. Незатухающие гармонические колебания высокой частоты вырабатывает генератор, например генератор на транзисторе.

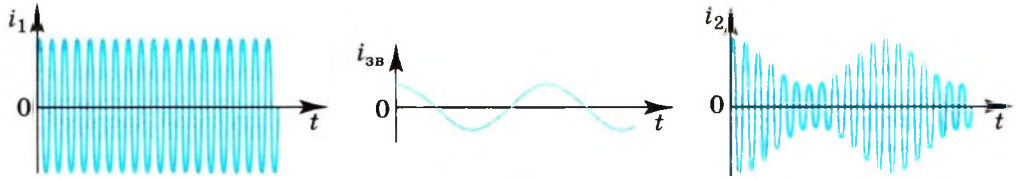
Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют, или, как говорят, *модулируют*, с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты.

Вспомните, как зависит от частоты интенсивность электромагнитной волны.

Запомни

Способ изменения со звуковой частотой амплитуды высокочастотных колебаний называют **амплитудной модуляцией**.

На рисунке 6.13 приведены три графика: а) график колебаний высокой частоты, которую называют несущей частотой; б) график колебаний звуковой частоты, т. е. модулирующих колебаний; в) график модулированных по амплитуде колебаний.



а) б) в)

Рис. 6.13

Наряду с амплитудной модуляцией для передачи информации используется и *частотная модуляция*, при которой амплитуда несущей волны остаётся постоянной, а частота модулируется.

Без модуляции мы в лучшем случае можем только контролировать, работает станция или молчит. Без модуляции нет ни телеграфной, ни телефонной, ни телевизионной передачи.

Запомни Процесс выделения в приёмнике низкочастотных колебаний из модулированных колебаний высокой частоты называют **детектированием**.

Полученный в результате детектирования сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления колебания низкой частоты могут быть превращены в звук.

Основные принципы радиосвязи представлены в виде блок-схемы на рисунке 6.14.



Рис. 6.14

Принцип радиосвязи Найти

1. Для чего нужна модуляция колебаний?
2. Что называют детектированием колебаний?

1. При передаче электрических колебаний звуковой частоты ν_1 от радиостанции до приёмника с использованием амплитудной модуляции необходимо, чтобы частота несущей волны ν_2 была
1) равна ν_1
2) много меньше ν_1
3) меньше ν_1
4) много больше ν_1

2. Амплитудная модуляция высокочастотных электромагнитных колебаний в радиопередатчике используется для
1) увеличения мощности радиостанции
2) изменения амплитуды высокочастотных колебаний со звуковой частотой
3) изменения амплитуды колебаний звуковой частоты
4) задания определённой частоты излучения данной радиостанции

§ 38 МОДУЛЯЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Какой процесс называется модуляцией высокочастотных колебаний, а какой детектированием?

Амплитудная модуляция высокочастотных колебаний достигается специальным воздействием на генератор высокочастотных незатухающих колебаний. В цепь генератора включают вторичную обмотку трансформатора (рис. 6.15). При отсутствии звукового сигнала в генераторе вырабатываются колебания высокой частоты (см. рис. 6.13, *а*). При подаче на первичную обмотку переменного напряжения звуковой частоты (см. рис. 6.13, *б*) амплитуда колебаний силы тока в колебательном контуре генератора будет изменяться в такт с изменениями напряжения на транзисторе (см. рис. 6.13, *в*). Это и означает, что высокочастотные колебания модулируются по амплитуде низкочастотным сигналом.

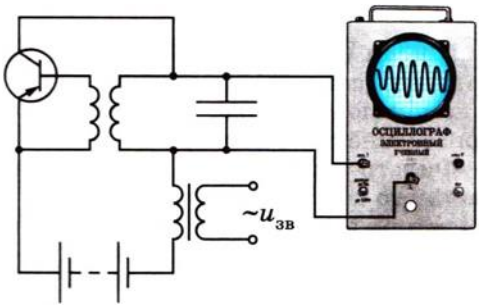


Рис. 6.15

Временну́ю развёртку модулированных колебаний можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа, если подать на него напряжение с колебательного контура.

Кроме *амплитудной модуляции*, в некоторых случаях применяют *частотную модуляцию* — изменение частоты колебаний в соответствии с управляющим сигналом. Её преимуществом является бóльшая устойчивость по отношению к помехам.

Детектирование. Принятый приёмником модулированный высокочастотный сигнал может вызвать только высокочастотные колебания, не воспринимаемые нашим ухом. Поэтому в приёмнике необходимо сначала из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты — провести процесс *детектирования*.

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью — *детектор*. Таким элементом может быть полупроводниковый диод.

Рассмотрим принцип работы полупроводникового детектора. Пусть этот прибор включён в цепь последовательно с источником модулированных колебаний и нагрузкой (рис. 6.16). Ток в цепи будет идти преимущественно в одном направлении, отмеченном на рисунке стрелкой, так как сопротивление диода в прямом направлении много меньше, чем в обратном. Мы вообще можем пренебречь обратным током и считать, что диод обладает односторонней проводимостью. Вольт-амперную характеристику диода приближённо можно представить в виде ломаной, состоящей из двух прямолинейных отрезков (рис. 6.17).

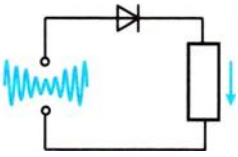


Рис. 6.16

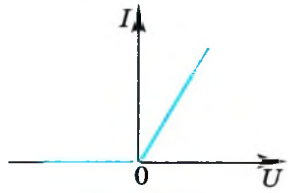


Рис. 6.17

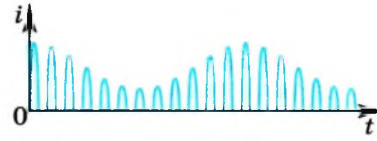


Рис. 6.18

В цепи (см. рис. 6.16) будет идти пульсирующий ток, график силы тока которого показан на рисунке 6.18. Этот пульсирующий ток сглаживается с помощью *фильтра*. Простейший фильтр представляет собой конденсатор, присоединённый к нагрузке (рис. 6.19).

Фильтр работает так. В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку, а другая часть тока ответвляется в конденсатор, заряжая его (сплошные стрелки на рисунке 6.19). Разветвление тока уменьшает пульсации тока, проходящего через нагрузку. Зато в промежутке между импульсами, когда диод заперт, конденсатор частично разряжается через нагрузку. Поэтому в интервале между импульсами ток через нагрузку идёт в ту же сторону (штриховые стрелки на рисунке 6.19). Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор. В результате этого через нагрузку идёт ток звуковой частоты, форма колебаний которого почти точно воспроизводит форму низкочастотного сигнала на передающей станции (рис. 6.20).

Более сложные фильтры сглаживают небольшие высокочастотные пульсации, и колебания звуковой частоты происходят более плавно, чем это изображено на рисунке 6.20.

Простейший радиоприёмник. Простейший радиоприёмник состоит из колебательного контура, связанного с антенной, и подключённой к нему цепи, состоящей из детектора, конденсатора и телефона (рис. 6.21). В колебательном контуре радиоволной возбуждаются модулированные колебания. Катушки телефонов играют роль нагрузки. Через них идёт ток звуковой частоты. Небольшие пульсации высокой частоты не сказываются заметно на колебаниях мембраны и не воспринимаются на слух.

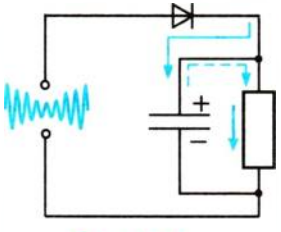


Рис. 6.19

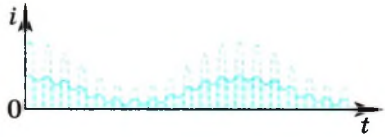


Рис. 6.20

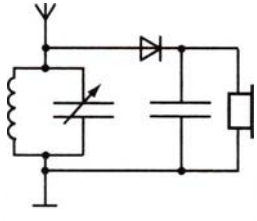


Рис. 6.21

Модуляция. Детектирование

Найти

1. От чего зависит амплитуда автоколебаний в генераторе на транзисторе?
2. Как устроен простейший детекторный радиоприёмник?

§ 39 СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Какие свойства механических волн вы изучали?
Распространение каких колебаний происходит в электромагнитной волне?

Современные радиотехнические устройства позволяют провести очень наглядные опыты по наблюдению свойств электромагнитных волн. При этом лучше всего пользоваться волнами сантиметрового диапазона. Эти волны излучаются специальным генератором сверхвысокой частоты (СВЧ). Электрические колебания генератора модулируют звуковой частотой. Принятый сигнал после детектирования подаётся на громкоговоритель.

Электромагнитные волны излучаются рупорной антенной в направлении оси рупора. Приёмная антенна в виде такого же рупора улавливает волны, которые распространяются вдоль его оси. Общий вид установки изображён на рисунке 6.22.

Поглощение электромагнитных волн. Рупоры располагают друг против друга и, добившись хорошей слышимости звука в громкоговорителе, помещают между рупорами различные диэлектрические тела. При этом замечают уменьшение громкости.

Какая характеристика волны изменяется при поглощении?

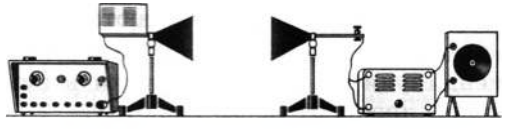


Рис. 6.22

Отражение электромагнитных волн. Если диэлектрик заменить металлической пластиной, то звук перестанет быть слышимым. Волны не достигают приёмника вследствие отражения. Отражение происходит под углом, равным углу падения, как и в случае световых и механических волн. Чтобы убедиться в этом, рупоры располагают под одинаковыми углами к большому металлическому листу (рис. 6.23). Звук исчезнет, если убрать лист или повернуть его.

Преломление электромагнитных волн. Электромагнитные волны изменяют своё направление (преломляются) на границе диэлектрика. Это можно обнаружить с помощью большой треугольной призмы из парафина. Рупоры располагают под углом друг к другу, как и при демонстрации отражения. Металлический лист заменяют призмой (рис. 6.24). Убирая призму или поворачивая её, наблюдают исчезновение звука.

Поперечность электромагнитных волн. Электромагнитные волны являются поперечными. Это означает, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$

ИНТЕРЕСНО

Отражение электромагнитных волн от металла можно объяснить следующим образом. В металлах есть свободные электроны. При падении электромагнитной волны под действием переменного электрического поля возбуждаются колебания этих электронов, что вызывает появление отражённой электромагнитной волны с частотой падающей волны. Энергия падающей волны полностью идёт на возбуждение колебаний свободных электронов, именно поэтому волна не проходит через металл.

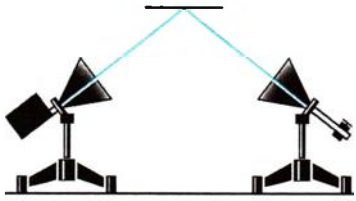


Рис. 6.23

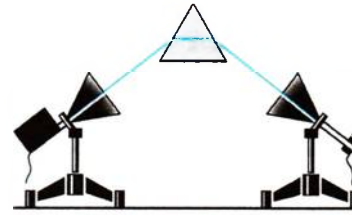


Рис. 6.24

электромагнитного поля волны перпендикулярны направлению её распространения. При этом векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ взаимно перпендикулярны. Волны с определённым направлением колебаний этих векторов называются поляризованными. На рисунке 6.6 изображена такая поляризованная волна.

Приёмный рупор с детектором принимает только поляризованную в определённом направлении волну. Это можно обнаружить, повернув передающий или приёмный рупор на 90°. Звук при этом исчезает.

Поляризацию наблюдают, помещая между генератором и приёмником решётку из параллельных металлических стержней (рис. 6.25). Решётку располагают так, чтобы стержни были горизонтальными или вертикальными. При одном из этих положений, когда электрический вектор параллелен стержням, в них возбуждаются токи, в результате чего решётка отражает волны, подобно сплошной металлической пластине. Когда же вектор $\vec{E}$ перпендикулярен стержням, токи в них не возбуждаются и электромагнитная волна проходит через решётку.

Интерференция и дифракция электромагнитных волн. В опытах с генератором СВЧ можно наблюдать интерференцию электромагнитных волн (радиоволн). Генератор и приёмник располагают друг против друга (рис. 6.26). Затем подносят снизу металлическую пластину в горизонтальном положении. Постепенно поднимая пластину, обнаруживают поочерёдное ослабление и усиление звука.

Явление объясняется следующим образом. Часть волны из рупора генератора попадает непосредственно в приёмный рупор. Другая же её часть отражается от металлической пластины. Меняя расположение пластины, мы изменяем разность хода прямой и отражённой волн. Вследствие этого волны либо усиливают, либо ослабляют друг друга в зависимости от того, равна разность хода целому числу длин волн или нечётному числу полуволн.

Условия наблюдения интерференционных максимумов и минимумов аналогичны условиям (5.6) и (5.7).

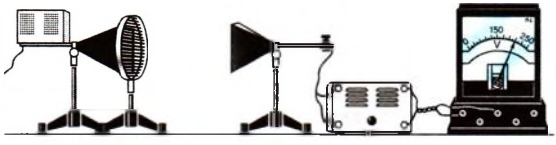


Рис. 6.25

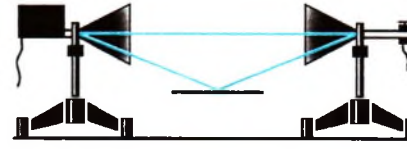


Рис. 6.26

Так же наблюдается дифракция электромагнитных волн. В этом легко убедиться. Когда мы слушаем приёмник, источник волн (антенна) может находиться как в прямой видимости, так и за препятствиями.

Более подробно мы разберём эти явления в главе «Световые волны».

Поглощение. Отражение. Преломление. Интерференция. Дифракция — Найти

1. Перечислите известные вам свойства электромагнитных волн.
2. Какая волна называется поляризованной?

1. Сложение в пространстве когерентных волн, при котором образуется постоянное во времени пространственное распределение амплитуд результирующих колебаний, называется
1) интерференцией
2) поляризацией
3) дисперсией
4) преломлением

2. Два источника испускают электромагнитные волны с одинаковой фазой и одинаковой частотой $5 \cdot 10^{14}$ Гц. Скорость распространения электромагнитных волн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. В точке с разностью хода волн, равной 1,2 мкм, будет наблюдаться
1) максимум интерференции, так как разность хода равна нечётному числу полуволн
2) минимум интерференции, так как разность хода равна чётному числу полуволн
3) максимум интерференции, так как разность хода равна чётному числу полуволн
4) минимум интерференции, так как разность хода равна нечётному числу полуволн

3. Два источника испускают электромагнитные волны частотой $5 \cdot 10^{14}$ Гц с одинаковыми начальными фазами. Скорость распространения электромагнитных волн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Максимум интерференции будет наблюдаться в точке пространства, для которой минимальная разность хода волн от источника равна
1) 0,9 мкм 2) 0,6 мкм 3) 0,3 мкм 4) 0

4. Явлением, доказывающим, что в электромагнитной волне вектор напряжённости электрического поля колеблется в направлении, перпендикулярном направлению распространения электромагнитной волны, является
1) интерференция
2) отражение
3) поляризация
4) дифракция

§ 40 РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН. РАДИОЛОКАЦИЯ

Какими способами можно настроить колебательный контур в резонанс?

При использовании электромагнитных волн для радиосвязи как источник, так и приёмник радиоволн чаще всего располагают вблизи земной поверхности. Форма и физические свойства земной поверхности, а также состояние атмосферы сильно влияют на распространение радиоволн.

Подумайте, как можно объяснить отражение электромагнитных волн от ионосферы.

Особенно существенное влияние на распространение радиоволн оказывают слои ионизированного газа в верхних частях атмосферы на высоте 100—300 км над поверхностью Земли. Эти слои называют *ионосферой*. Ионизация воздуха верхних слоёв атмосферы вызывается электромагнитным излучением Солнца и потоком заряженных частиц, излучаемых им. Проводящая электрический ток ионосфера отражает радиоволны с длиной волны $\lambda > 10$ м, как обычная металлическая пластина. Но способность ионосферы отражать и поглощать радиоволны существенно меняется в зависимости от времени суток и времени года. Именно по этой причине радиосвязь, особенно в диапазоне средних длин волн (100—1000 м), гораздо надёжнее ночью и в зимнее время.

Устойчивая радиосвязь между удалёнными пунктами на земной поверхности вне прямой видимости оказывается возможной из-за способности радиоволн *огибать* выпуклую земную поверхность (явление *дифракции*). Это огибание выражено тем сильнее, чем больше длина волны. Поэтому радиосвязь на больших расстояниях за счёт огибания волнами Земли оказывается возможной лишь при длинах волн, значительно превышающих 100 м (*средние* и *длинные волны*).

Короткие волны (диапазон длин волн от 10 до 100 м) распространяются на большие расстояния только за счёт многократных отражений от ионосферы и поверхности Земли (рис. 6.27). Радиоволны в этом диапазоне оказываются «запертыми» в тонком слое, ограниченном поверхностью Земли и ионосферой. В результате волны, излучаемые радиостанцией, расположенной, например, в центре Азии, достигают радиоприёмников в Южной Америке.

Длинные радиоволны для этой цели менее пригодны из-за значительного поглощения поверхностными слоями Земли и ионосферой. И всё же наиболее надёжная радиосвязь на ограниченных расстояниях при достаточной мощности передающей радиостанции обеспечивается на длинных волнах.



Рис. 6.27

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли. Поэтому они используются для радиосвязи между пунктами в пределах прямой видимости, а также для связи с космическими кораблями.

Радиолокация.

Запомни Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют **радиолокацией.**

Радиолокационная установка — *радиолокатор* (или радар) — состоит из передающей и приёмной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты (10^8—10^{11} Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создаётся антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие сложения волн. Антенна устроена так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях происходит полное или частичное их взаимное гашение.

Отражённая волна улавливается либо той же излучающей антенной, либо другой приёмной антенной, тоже остронаправленной. Строгая направленность излучения позволяет говорить о *луче* радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приёма отражённого сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отражённые волны.

Определение расстояния R проводится путём измерения общего времени t прохождения радиоволн до цели и обратно. Так как скорость радиоволн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна на всём пути луча, то

$$R = \frac{ct}{2}.$$

Вследствие рассеяния радиоволн до приёмника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Потому приёмники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов раз (10^{12}).

Для фиксации посланного и отражённого сигналов используют электронно-лучевую трубку. В момент посылки импульса светлая точка, равномерно движущаяся по экрану электронно-лучевой трубки, отклоняется. На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности (рис. 6.28). Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приёма слабого отражённого сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране пропорционально времени t прохождения сигнала и, следовательно, расстоянию R до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.



Рис. 6.28

В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолётами. Наземная служба передаёт по радио пилотам необходимые указания и

Интересно Локаторы используются в космических исследованиях. Ежегодно радиоволны приносят из космоса удивительные сведения о природе небесных тел. Радиоастрономия использует сейчас самые чувствительные приёмные устройства и самые большие антенные системы.

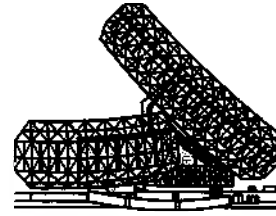


Рис. 6.29

таким образом обеспечивает безопасность полётов. Внешний вид аэродромного локатора показан на рисунке 6.29. Корабли и самолёты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны, и оператор видит радиолокационную карту местности.

Служба погоды применяет локаторы для наблюдения за облаками.

Радиосвязь. Радиолокатор. Радиоастрономия

Найти

На каких принципах основана работа радиолокатора?

1. Работа радиолокатора — прибора, служащего для определения местоположения тел, — основана на физическом явлении
1) отражении электромагнитных волн
2) преломлении электромагнитных волн
3) интерференции электромагнитных волн
4) дифракции электромагнитных волн

2. Радиосвязь на длинных волнах может осуществляться с объектами, находящимися за пределами прямой видимости. Это возможно благодаря
1) влиянию магнитного поля Земли на радиоволны
2) преломлению радиоволн в атмосфере
3) дифракции радиоволн на поверхности Земли
4) отражению радиоволн от ионосферы

3. Радиосвязь на коротких волнах может осуществляться с объектами за пределами прямой видимости в результате
1) дифракции радиоволн
2) отражения радиоволн от ионосферы и поверхности Земли
3) отражения радиоволн от Луны
4) интерференции радиоволн

4. Радиосвязь Центра управления полётами с космическими кораблями на орбитах возможна на ультракоротких волнах благодаря свойству ионосферы
1) отражать их
2) поглощать их
3) преломлять их
4) пропускать их

§ 41 ПОНЯТИЕ О ТЕЛЕВИДЕНИИ

Вспомните, что такое модуляция и детектирование. С какой целью используют эти способы?

Телевидение — это область науки, техники и культуры, связанная с передачей на расстояние изображений подвижных объектов и звуков при помощи радиоэлектронных устройств.

Для передачи изображения используется принцип последовательной передачи элементов изображения. В пункте передачи производят преобразование элементов изображения в последовательность электрических сигналов (*анализ изображения*). Сигналы модулируют колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приёмнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение.

ИНТЕРЕСНО

Идея передачи изображения была сформулирована в конце XIX в. португальским учёным А. ди Пайва и независимо от него российским учёным П. И. Бахметьевым.

Для передачи движения используется принцип кино: немного отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадры) передаются десятки раз в секунду (в нашем телевидении 50 раз). Изображение кадра преобразуется с помощью передающей вакуумной электронной трубки — *иконоскопа* (рис. 6.30) — в серию электрических сигналов. Кроме иконоскопа, существуют и другие передающие устройства.

Внутри иконоскопа расположен мозаичный экран, на который с помощью оптической системы проецируется изображение объекта. Каждая ячейка мозаики заряжается, причём её заряд зависит от интенсивности падающего на ячейку света. Этот заряд меняется при попадании на ячейку электронного пучка, создаваемого электронной пушкой. Электронный пучок последовательно попадает на все элементы сначала одной строчки мозаики, затем другой строчки и т. д. (всего 625 строк). От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в резисторе R. Поэтому напряжение на резисторе изменяется пропорционально изменению освещённости вдоль строк кадра. При этом количество элементов в строке (пикселей) примерно вдвое меньше числа строк, так что число элементов равно $625 \cdot 300 \approx 187\,500$.

Для того чтобы изображение не мелькало, оно передаётся следующим образом: каждые 1/50 с высвечивается одна половина строк, например нечётные строки, а затем другая половина (чётные строки).

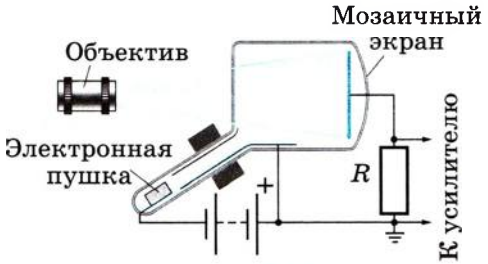


Рис. 6.30

Таким образом, необходимая частота видеосигнала составляет примерно 5 МГц. Частота несущей волны, модулируемая видеосигналом, должна быть существенно больше — порядка 10^8—10^9 Гц, что соответствует длинам волн в метровом или дециметровом диапазоне.

Высокочастотные сигналы, полученные на выходе трубки, попадают на антенну, излучающую соответствующие электромагнитные волны.

Затем происходит передача сигналов по каналам связи в пункт приёма. После детектирования они преобразуются в изображение на экране трубки, называемой *кинескопом*. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим числом электронов в пучке и, следовательно, свечением экрана в месте попадания луча. Системы катушек горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный луч обегает мозаичный экран в передающей трубке. Синхронность движения лучей в передающей и приёмной трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов. Это преобразование называют *синтезом изображения*.

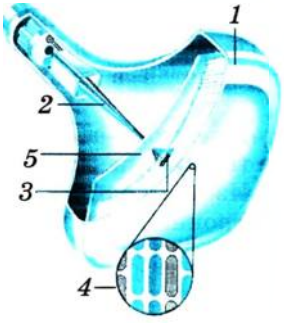


Рис. 6.31

Образование цветного изображения. В кинескопе цветного телевизора (рис. 6.31) с защитным экраном *1* находятся три электронно-лучевые пушки с красным, зелёным и синим светофильтрами, образующие три электронных луча *2*. Магнитная система цветного кинескопа обеспечивает сведение электронных пучков на отверстиях сетки *5*, расположенной перед экраном. После прохождения отверстий сетки пучки попадают на различные люминофоры (люминофорный экран *3*), образуя элемент цветного изображения — пиксель. На экране *4*, покрытом кристаллами, светящимися под ударами электронов красным, синим и зелёным цветами, находится 500 000 ячеек для каждого из этих трёх цветов. Смесь трёх цветов — синего, зелёного и красного — в разных пропорциях воспроизводит для глаза человека все оттенки наблюдаемых цветов.

Интересно Жидкие кристаллы были открыты в 1888 г. австрийским ботаником Ф. Рейнитцером. В различных условиях они обладают разной степенью прозрачности. В 60-е гг. прошлого века учёным удалось создать первые опытные модели дисплеев на жидких кристаллах.

Жидкокристаллический дисплей. Жидкие кристаллы — это фазовое состояние, в которое переходят некоторые вещества при определённых значениях температуры, давления и концентрации в растворе. Молекулы жидких кристаллов имеют вытянутую форму и имеют упорядоченное расположение во всём объёме. Ориентация молекул изменяется под действием электрического поля. Это и определяет возможность их использования в технике. Получение цветного изображения основано на явлении интерференции света на жидких кристаллах.

Плазменный дисплей. Плазменные дисплеи представляют собой многослойную стеклянную конструкцию. Между стеклянными стенками

располагаются сотни тысяч ячеек, покрытых люминофором, который светится красным, зелёным и голубым светом.

Как вы думаете, почему это устройство называется плазменной панелью? Вспомните, что такое плазма.

При подведении к электродам высокочастотного напряжения, получаемого приёмником, происходит ионизация газа или образование плазмы. В плазме происходит ёмкостный высокочастотный разряд, что приводит к ультрафиолетовому излучению, которое вызывает свечение люминофора: красное, зелёное или синее. Это свечение, проходя через переднюю стеклянную пластину, попадает в глаз зрителя.

Интересно

На Останкинской телебашне антенны установлены на высоте 540 м, что обеспечивает приём передач на расстоянии 120 км от Москвы. На бо́льшие расстояния телевизионные сигналы передаются с помощью спутников.

Передачи ТВ ведутся на частотах от 50 до 230 МГц. В этом диапазоне электромагнитные волны распространяются только в пределах видимости. Поэтому для обеспечения передачи сигналов на далёкие расстояния строят высокие антенны.

Как вы думаете, какое преимущество имеет кабельное телевидение по сравнению с передачей и приёмом сигналов с помощью антенн?

Развитие современных систем телевидения связано с повышением чёткости изображения, увеличением помехоустойчивости (кабельное телевидение) и дальности действий (спутниковое телевидение).

Кроме этого, совершенствуются сами телевизоры, уменьшается их объём и вес при увеличении размеров экрана, чему способствует создание систем цифрового телевидения, которое, кроме этого, наиболее помехоустойчиво.

Перспективы развития телевидения связаны с внедрением и разработкой систем стереоцветного и многоракурсного телевидения, позволяющего получить объёмное изображение и посмотреть на изображение со стороны.

Телевидение. Жидкокристаллические и плазменные дисплеи — Найти

«Современное телевидение»

1. Современные способы передачи изображения. Цифровое телевидение.
2. Общий принцип работы современных телевизоров.
3. Спутниковые антенны. Принцип их действия.
4. История телевидения и перспективы развития. Получение объёмных изображений.
5. Устройство жидкокристаллических и плазменных дисплеев.

§ 42 РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ СВЯЗИ

Что определяет распространение электромагнитных волн?
С помощью какого устройства сигналы испускаются и принимаются?

Ещё сравнительно недавно междугородная телефонная связь осуществлялась исключительно по проводам. При этом на надёжность связи влияли грозы и возможность обледенения проводов.

В настоящее время всё шире применяются кабельные и радиорелейные линии, повышается уровень автоматизации связи.

В радиорелейных линиях связи используются ультракороткие (дециметровые и сантиметровые) волны. Эти волны распространяются в пределах прямой видимости. Поэтому линии состоят из цепочки маломощных радиостанций, каждая из которых передаёт сигналы к соседней как бы по эстафете. Такие станции имеют мачты высотой 60—80 м, находящиеся на расстоянии 40—60 км друг от друга.

Всё большей популярностью пользуются оптоволоконные линии связи, позволяющие передавать большой объём информации. Процесс передачи основан на многократном отражении лазерного луча, распространяющегося по тонкой трубке (волокну). Такая связь возможна между двумя неподвижными объектами.

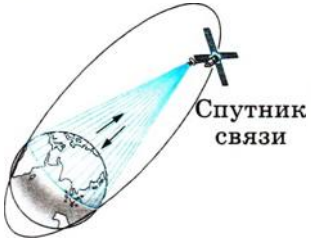


Рис. 6.32

Для космической радиосвязи используются спутники связи (рис. 6.32), сигналы которым посылаются передатчиком с Земли. Спутник принимает сигнал и посылает его другой наземной станции, находящейся на огромном расстоянии от первой. Принятые сигналы усиливаются и посылаются приёмникам других станций.

Спутники также используются для определения положения различных объектов на Земле. Для этих целей одного спутника на околоземной орбите недостаточно, поэтому используется система спутников, позволяющая точно определять координаты, например, автомобилей с навигатором и других объектов. Для телевизионной и радиотрансляции используется геостационарный спутник, находящийся на орбите радиусом 36 000 км. На этой орбите период обращения спутника равен 24 ч. Именно благодаря этому не требуется изменять ориентацию антенн.

Непрерывно делаются попытки обнаружения других цивилизаций и передачи им сигналов. Отправлены сообщения с больших радиотелескопов, в которых содержатся формулировки математических теорем, физических законов, сведения о человеке и т. д. Однако можно сказать, что наиболее мощным сигналом, переданным во Вселенную, является колоссальный рост интенсивности радиоизлучения вследствие развития на Земле телевидения и сотовой связи. Земля из ненаблюдаемого с других звёзд объекта превратилась в яркую радиозвезду, непрерывно излучающую мощный поток радиоволн.

Созданы надёжные системы, обеспечивающие телевизионным вещанием районы Сибири и Дальнего Востока. Они позволяют осуществить телефонно-телеграфную связь с отдалёнными районами нашей страны и всего мира.

Интересно

В 1921 г. впервые была использована подвижная радиосвязь: полиция Детройта использовала одностороннюю диспетчерскую связь на частоте 2 МГц для передачи информации от центрального передатчика к приёмникам, установленным на полицейских автомашинах.

Принцип сотовой связи. Сотовая телефонная связь основана на компьютерных системах, которые связывают номера абонентов и адреса наиболее близких ретрансляторов. Во время соединения компьютерная система находит оптимальный путь связи абонентов — последовательность передачи сигналов через выбранные ретрансляторы. Сотовый телефон абонента постоянно посылает сигналы ретранслятору, с которым он связан. При перемещении абонента происходит перерегистрация — привязка абонента к новому, ближайшему ретранслятору.

На ровной поверхности зона покрытия отдельного ретранслятора представляет собой круг, а составленная из этих кругов сеть имеет вид сот с шестиугольными ячейками, отсюда и название «сотовая связь».

Интернет. В настоящее время в мире существует более миллиарда компьютеров, бóльшая часть которых объединена в единое информационное пространство, называемое *Интернет*.

Одной из самых распространённых услуг Интернета является электронная почта, позволяющая связаться достаточно быстро с любым человеком в любой точке мира.

По Интернету вы можете получить информацию обо всех событиях, происходящих в мире, а также участвовать в дискуссиях на интересующие вас темы. Устраиваются видеоконференции, позволяющие ответить на научные вопросы. Вы можете прослушать и увидеть лекцию известного профессора, находящегося в другой стране, осуществить интерактивное общение.

Создаются сайты, на которых блоггеры могут ответить на интересующий вас вопрос. Например, на сайте физиков помогут решить любую сложную задачу.

Интернет позволяет также осуществить практически телефонную связь. Интернет непрерывно развивается и превращается в основную телекоммуникационную сеть.

Телефонная связь. Сотовая связь. Интернет

Найти

«Современные средства связи»

1. Искусственные спутники Земли на примере спутниковых систем связи.
2. Сотовые сети связи.
3. Этапы развития средств массовой коммуникации.

§ 43 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ»

Для решения задач на эту тему надо знать уравнение электромагнитной волны, а также её свойства. Нужно также помнить, что при приёме электромагнитной волны колебательный контур настраивается на определённую частоту. Это означает, что частота собственных колебаний в контуре должна совпадать с частотой электромагнитной волны.

Задача 1. Две антенны, находящиеся на расстоянии 50 м друг от друга, излучают электромагнитные волны с частотой 10^7 Гц. Определите ближайшие к антеннам точки интерференционных максимумов.

Р е ш е н и е. Условие наблюдения интерференционного максимума — разность хода должна быть равна целому числу длин волн:

$$\Delta = x_1 - x_2 = \pm k\lambda.$$

Так как определяется ближайшая к антенне точка, то $k = 1$. Тогда $x_1 - x_2 = \pm\lambda$. Из условия задачи следует, что $x_1 + x_2 = L$. Решая эти уравнения относительно x_1, получаем $x_1 = \dfrac{L \pm \lambda}{2}$.

Скорость распространения электромагнитных волн в воздухе равна $3 \cdot 10^8$ м/с. Длина волны $\lambda = c/\nu = 30$ м. Отсюда $x_1 = 10$ м.

Ближайшие к антеннам точки интерференционных максимумов находятся на расстоянии, равном 10 м.

Задача 2. Радиолокатор работает на длине волны 12 см и даёт 5000 импульсов в секунду. Длительность каждого импульса $\tau = 3$ мкс. Сколько колебаний содержится в каждом импульсе и чему равна глубина разведки локатора?

Р е ш е н и е. За время одного импульса сигнал должен дойти до объекта и вернуться назад, прежде чем будет послан следующий импульс. Число колебаний, содержащихся в импульсе, можно узнать, зная его продолжительность и период колебаний. Определим интервал времени между соседними импульсами: $\tau_0 = 1/n = 2 \cdot 10^{-4}$ с.

Легко видеть, что $\tau_0 >> \tau$, т. е. именно за время τ_0 импульс, излучённый локатором, должен дойти до объекта наблюдения и вновь вернуться к локатору, т. е. пройти путь $2L$. Тогда $L = c\tau_0 / 2 = 3 \cdot 10^4$ м.

Для того чтобы определить число колебаний в каждом импульсе, необходимо знать время одного колебания, т. е. период T: $T = \dfrac{\lambda}{c} = 4 \cdot 10^{-10}$ с, откуда $n_0 = \tau/T = 7500$ колебаний.

Задача 3. В каком диапазоне длин волн может работать радиоприёмник, если ёмкость конденсатора его колебательного контура изменяется от $2 \cdot 10^{-10}$ до $8 \cdot 10^{-10}$ Ф, а индуктивность катушки — от $5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ Гн?

Р е ш е н и е. Настроить контур — это значит подобрать его параметры таким образом, чтобы собственная частота колебаний была равна частоте принимаемой волны.

Длина волны, принимаемой контуром, определяется из соотношения $\lambda = cT$, где c – скорость распространения электромагнитных волн, равная $3 \cdot 10^8$ м/с; T – период колебаний.

Период колебаний T определяется по формуле Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$, откуда $\lambda_1 = c2\pi\sqrt{L_1C_1} \approx 188$ м, $\lambda_2 = c2\pi\sqrt{L_2C_2} \approx 754$ м.

Таким образом, радиоприёмник может принимать волны в диапазоне от 188 до 754 м.



Задачи для самостоятельного решения

1. В схеме радиоприёмника, изображённой на рисунке 6.21, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ Гн, ёмкость C переменного конденсатора может меняться от 12 до 450 пФ. На какие длины волн рассчитан этот радиоприёмник?

2. На рисунке 6.33 изображена приёмная антенна телевизора. Что можно сказать об ориентации колебаний вектора магнитной индукции волны, идущей из телецентра?

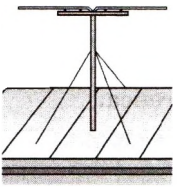


Рис. 6.33

3. Имеются ли существенные различия между условиями распространения радиоволн на Луне и на Земле?

4. Как изменится направление распространения электромагнитной волны, если изменится направление на противоположное: 1) вектора $\vec{E}$; 2) вектора $\vec{B}$; 3) одновременно векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$?



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 6 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

ОПТИКА

От источника света, например от лампочки, свет распространяется во все стороны и падает на окружающие предметы, вызывая, в частности, их нагревание. Попадая в глаз, свет вызывает зрительные ощущения — мы видим. Можно сказать, что при распространении света происходит передача воздействий от одного тела (источника) к другому (приёмнику).

Вообще же действие одного тела на другое может осуществляться двумя способами: либо посредством *переноса вещества* от источника к приёмнику, либо же посредством *изменения состояния среды* между телами (без переноса вещества).

Корпускулярная и волновая теории света. В соответствии с двумя способами передачи энергии от источника к приёмнику возникли и начали развиваться две совершенно разные теории, объясняющие, что такое свет, какова его природа. Причём возникли они почти одновременно в XVII в.

Одна из этих теорий связана с именем Ньютона, другая — с именем Гюйгенса.

Важно Ньютон придерживался так называемой *корпускулярной* теории света, согласно которой свет — это *поток частиц*, идущих от источника во все стороны (перенос вещества).

Согласно же представлениям Гюйгенса свет — это *волны*, распространяющиеся в особой гипотетической среде — эфире, заполняющем всё пространство и проникающем внутрь всех тел.

Обе теории длительное время существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет Ньютона заставлял большинство учёных отдавать предпочтение корпускулярной теории. Известные в то время из опыта законы распространения света более или менее успешно объяснялись обеими теориями.

На основе корпускулярной теории было трудно объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не действуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться. Волновая же теория это легко объясняла. Волны, например на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния.

Однако прямолинейное распространение света, приводящее к образованию за предметами резких теней, трудно объяснить на основе волновой теории. По корпускулярной же теории прямолинейное распространение света является просто следствием закона инерции.

Интересно Первые представления древних учёных о свете были весьма наивны. Считалось, что из глаз выходят особые тонкие щупальца и зрительные впечатления возникают при ощупывании ими предметов.

Такая неопределённость во взглядах на природу света господствовала до начала XIX в., когда были впервые изучены явление огибания светом препятствий (дифракция) и явление усиления или ослабления света при наложении световых

пучков друг на друга (интерференция). Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Максвелл во второй половине XIX в. доказал, что свет — это частный случай электромагнитных волн.

Важно Работами Максвелла были заложены основы *электромагнитной теории света*.

После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем никаких сомнений в том, что при распространении свет ведёт себя как волна, не осталось. Нет их и сейчас.

Однако в начале XX в. представления о природе света начали тем не менее коренным образом меняться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория всё же имеет отношение к действительности. Оказалось, что

Важно при излучении и поглощении свет ведёт себя подобно *потоку частиц*.

Были обнаружены прерывистые, или, как говорят, *квантовые*, свойства света. Возникла необычная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно было объяснить, если считать свет волной, а явления излучения и поглощения — если считать свет потоком частиц. В этой связи вспомним прежде всего, что нам было известно о свете раньше из курса физики.

Геометрическая оптика. При первоначальном ознакомлении с оптическими явлениями было введено понятие светового луча как линии, перпендикулярной фронту волны и указывающей направление, в котором свет переносит энергию.

Запомни **Геометрической оптикой** называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и законы его отражения от зеркальных поверхностей на основе представления о световых лучах.

Световой луч — это линия, указывающая, в каком направлении свет переносит энергию. Световой луч перпендикулярен фронту волны.

Важно Одним из основных положений геометрической оптики является положение о прямолинейности распространения света.

Законы преломления и отражения света были установлены экспериментально задолго до выяснения природы света. Однако они могут быть выведены на основе волновой теории в случае, если длина волны света много меньше размеров препятствий, расположенных не очень далеко от места наблюдения.

ГЛАВА 7 СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

§ 44 СКОРОСТЬ СВЕТА

Сформулируйте один из основных законов геометрической оптики — закон прямолинейного распространения света.

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Предпринимались многочисленные попытки определить скорость света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результата. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была в конце концов измерена.

Астрономический метод измерения скорости света. Скорость света впервые удалось измерить датскому учёному О. Рёмеру в 1676 г. Рёмер был астрономом, и его успех объясняется именно тем, что он использовал для измерений очень большие проходимые светом расстояния. Это расстояния между планетами Солнечной системы.

Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера — самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер имеет шестнадцать спутников. Ближайший его спутник — Ио — стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, погружался в её тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, посылавшие свои сигналы на Землю через равные промежутки времени.

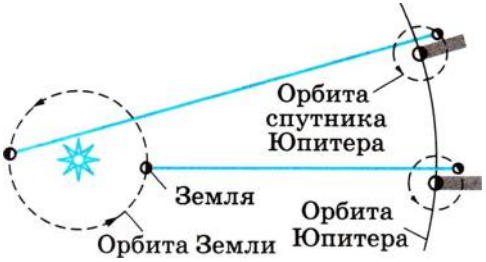


Рис. 7.1

Вначале измерения проводились в то время, когда Земля при своём движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 7.1). Такие же измерения, проведённые несколько месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать, зная период обращения Ио.

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит оттого, что свет употребляет 22 мин

на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная время запаздывания появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость света, разделив это расстояние на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 300 000 км/с. Потому-то крайне трудно определить время распространения света между двумя удалёнными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

Лабораторные методы измерения скорости света. Впервые скорость света лабораторным методом измерил французский физик И. Физо в 1849 г.

В опыте Физо свет от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку *1* (рис. 7.2). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала *2*, находящегося на расстоянии $l \sim 8{,}6$ км от колеса.

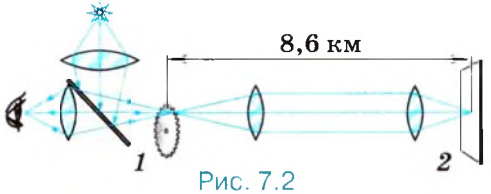


Рис. 7.2

Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отражённый от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чём же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шёл до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым.

Подумайте, почему в опыте Физо расстояние должно было быть столь большим.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время распространения света до зеркала и обратно колесо успевало в этом случае повернуться настолько, что на место прежней прорези вставала уже новая прорезь.

Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо при расстоянии, равном 8,6 км, для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано ещё много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод определения скорости света с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных средах. Она всегда оказывалась меньше, чем в вакууме.

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с (с точностью до ±1,2 м/с) или приближённо $3 \cdot 10^8$ м/с.

Скорость света. Экспериментальные методы измерения скорости света — Найти

В чём состояла основная трудность при измерении скорости света?

§ 45 ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Что такое свет?
Какие законы геометрической оптики вы знаете?



Х. Гюйгенс
(1629—1695)

Законы отражения и преломления света можно вывести из одного общего принципа, описывающего поведение волн. Этот принцип (мы о нём уже говорили в § 33) впервые был выдвинут в XVII в. современником Ньютона Христианом Гюйгенсом.

Закон отражения. Согласно *принципу Гюйгенса* каждая точка (M_1, M_2, M_3 ...) волнового фронта является источником вторичных волн (рис. 7.3). Огибающая поверхность к фронтам волн от вторичных источников определяет положение нового фронта волны. С помощью принципа Гюйгенса можно вывести закон отражения света.

Рассмотрим, как происходит отражение плоской волны. Повторим определение плоской волны.

Запомни Волна называется **плоской**, если поверхности равной фазы (волновые поверхности) и соответственно фронт волны представляют собой плоскости.

На рисунке 7.4 MN — отражающая поверхность; прямые A_1A и B_1B — два луча падающей плоской волны. Плоскость AC — фронт волны в момент времени, когда луч A_1A дошёл до отражающей поверхности.

Запомни **Углом падения** называют угол α между падающим лучом и нормалью к отражающей поверхности в точке падения.

Волновую поверхность отражённой волны можно получить, если провести огибающую к фронтам вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела двух сред. Различные участки волновой поверхности AC достигают отражающей границы не одновременно.

Подумайте, что изображает поверхность CD (см. рис. 7.3). Какой источник создаёт фронт волны, показанный на этом рисунке?

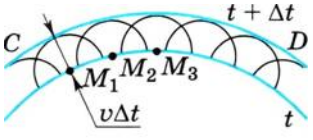


Рис. 7.3

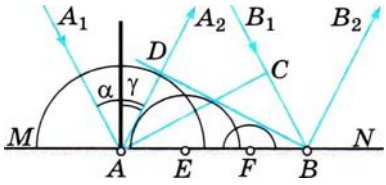


Рис. 7.4

Возбуждение колебаний в точке A начнётся раньше, чем в точке B, на время $\Delta t = \frac{CB}{v}$ (v — скорость волны).

Докажите с помощью принципа Гюйгенса, что при распространении света фронт плоской волны остаётся плоским.

В момент, когда волна достигнет точки B и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A уже будет представлять собой полусферу радиусом $r = AD = v\Delta t = CB$. Фронты вторичных волн от источников, расположенных между точками A и B, показаны на рисунке 7.4. Огибающей фронтов вторичных волн — фронт отражённой волны — является плоскость DB, касательная к сферическим поверхностям. Лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны фронту отражённой волны DB.

Запомни **Углом отражения** называют угол γ между нормалью к отражающей поверхности и отражённым лучом.

Так как $AD = CB$ и треугольники ADB и ACB прямоугольные, следовательно, треугольники равны и угол CAB равен углу DBA. Но $\angle CAB = \alpha$, а $\angle DBA = \gamma$ как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Следовательно, угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \gamma. \qquad (7.1)$$

Закон отражения света

Луч падающий, луч отражённый и нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, причём угол падения равен углу отражения.

При обратном направлении распространения световых лучей отражённый луч станет падающим, а падающий — отражённым.

Проведите эксперимент и убедитесь в справедливости закона отражения.

Важно Обратимость хода световых лучей — их важное свойство.

Принцип Гюйгенса. Закон отражения света

1. Как с помощью закона отражения построить изображение точечного источника света в плоском зеркале?
2. Почему нельзя использовать плоское зеркало в качестве киноэкрана?

1. Луч света падает на плоское зеркало. Угол падения равен 15°. Угол между отражённым лучом и зеркалом
1) 15° 2) 30° 3) 75° 4) 105°

2. Луч света падает на плоское зеркало. Угол между падающим лучом и зеркалом равен 20°. Угол между падающим и отражённым лучами
1) 50° 2) 100° 3) 40° 4) 140°

§ 46 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА»

Одним из основных законов геометрической оптики является закон прямолинейного распространения света. Используя этот закон, можно определить, например, размеры тени от предмета.

Главное при решении задач на законы отражения — необходимо правильно построить лучи, отражённые от зеркальной поверхности согласно закону отражения.

Задача 1. Определите диаметр Солнца, если известно, что диаметр Луны $3{,}48 \cdot 10^6$ м. Расстояние от Земли до Луны равно $3{,}8 \cdot 10^8$ м, а до Солнца $1{,}5 \cdot 10^8$ км.

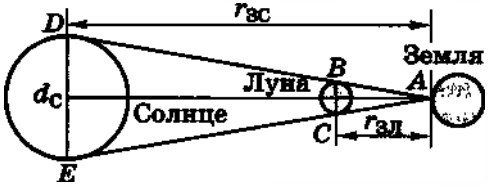


Рис. 7.5

Решение. Угловые диаметры Луны и Солнца приблизительно одинаковы, что проявляется при солнечных затмениях (рис. 7.5). Из подобия треугольников ABC и ADE следует: $\frac{d_л}{r_{зл}} = \frac{d_с}{r_{зс}}$, откуда

$$d_с = d_л \frac{r_{зс}}{r_{зл}} = 1{,}4 \cdot 10^9 \text{ м}.$$

Задача 2. Человек, рост которого равен h, приближается по прямой со скоростью v_0 к фонарю, висящему на высоте H. Определите скорость, с которой будет уменьшаться размер его тени, и скорость, с которой «бежит» тень головы человека.

Решение. На рисунке 7.6 отмечены тени A_1B_1 и A_2B_2 человека, когда он находится на двух разных расстояниях от фонаря. Из подобия треугольников $A_1C_1B_1$ и OEB_1 следует: $\frac{H}{h} = \frac{OB_1}{A_1B_1}$, из подобия треугольников $A_2C_2B_2$ и OEB_2 следует: $\frac{H}{h} = \frac{OB_2}{A_2B_2}$.

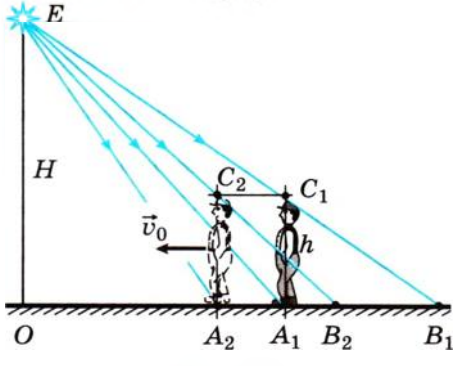


Рис. 7.6

В свою очередь, $OA_1 - OA_2 = C_1C_2 = v_0\Delta t$, где Δt — время перехода человека из положения A_1 в положение A_2. Изменение размера тени $\Delta x = v_т\Delta t = A_1B_1 - A_2B_2 = (OB_1 - OB_2)\frac{h}{H} = B_1B_2 \cdot \frac{h}{H}$. Из подобия треугольников B_1B_2E и C_1C_2E следует $\frac{B_1B_2}{C_1C_2} = \frac{H}{H-h}$, $B_1B_2 = v_0\Delta t\frac{H}{H-h}$. Следовательно скорость уменьшения размеров тени равна $v_т = v_0\frac{H}{H-h}\frac{h}{H} = v_0\frac{h}{H-h}$.

Скорость, с которой тень «бежит» головы человека, определим из подобия треугольников C_1C_2E и B_1B_2E: $\frac{v_0 t}{v_г t} = \frac{H - h}{H}$, тогда $v_г = v_0 \frac{H}{H - h}$.

Задача 3. Плоское зеркало повернули на угол $\alpha = 17°$ вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала. На какой угол β повернётся отражённый от зеркала луч, если направление падающего луча осталось неизменным?

Р е ш е н и е. Пусть φ — первоначальный угол падения луча (рис. 7.7). По закону отражения угол отражения также равен φ, и, следовательно, угол между падающим лучом и отражённым лучом равен 2φ. При повороте зеркала на угол α перпендикуляр I к зеркалу, восставленный в точке падения, также повернётся на угол α и займёт положение II. Значит, новый угол падения будет равен $\varphi + \alpha$. Таким же будет и новый угол отражения.

Поэтому угол, на который повернётся отражённый луч, $\beta = (\varphi + \alpha) - (\varphi - \alpha) = 2\alpha = 34°$ (см. рис. 7.7).

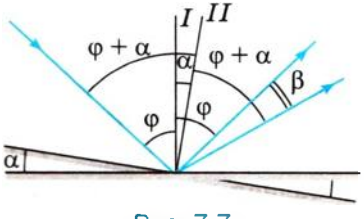


Рис. 7.7

Задача 4. Постройте изображение точечного источника S в плоском зеркале и определите расстояние между источником и его изображением. Расстояние от источника до зеркала равно h.

Р е ш е н и е. Проведём луч SA (рис. 7.8), падающий на зеркало. По закону отражения угол падения равен углу отражения: $\angle SAN = \angle BAN$, $\alpha = \beta$. Луч SC, перпендикулярный плоскости зеркала, отразившись, пойдёт по тому же пути CS.

Мы видим, что отражённые лучи не пересекаются, но пересекаются их продолжения. Таким образом, мнимое изображение источника S находится в точке S_1.

Так как $\angle ASC = \alpha$ (накрест лежащие углы параллельных прямых), а $\angle AS_1C = \beta$ (соответственные углы параллельных прямых), то треугольник AS_1S равнобедренный, CA — высота этого треугольника. Следовательно, расстояние между источником и его изображением равно $2h$.

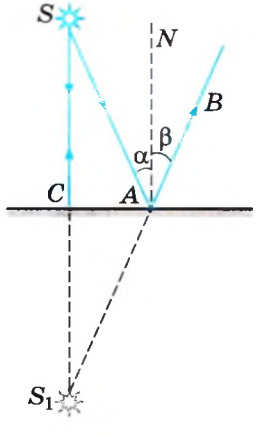


Рис. 7.8

Задача 5. Определите число изображений N точечного источника света S, полученных в двух плоских зеркалах, образующих друг с другом угол $\gamma = 60°$. Источник находится на биссектрисе угла.

Р е ш е н и е. Построим изображение S_1 источника S в зеркале I (рис. 7.9). Мы можем считать это изображение S_1, полученное в зеркале I, предметом

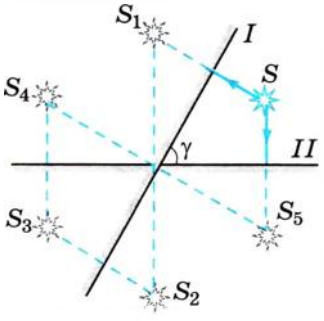


Рис. 7.9

для зеркала II, а затем изображение S_2, полученное в зеркале II предметом для зеркала I, в котором получаем изображение S_3.

Также получим изображение S_4 источника S_3 в зеркале II, являющееся предметом для зеркала I, которое даёт изображение S_5. Изображение S_5, в свою очередь, является предметом для зеркала II, но его изображение в этом зеркале совпадает с источником S. Все последующие изображения будут совпадать. На рисунке 7.9 штриховыми линиями показаны лучи, образующие эти мнимые источники. Итак, число изображений $N = 5$.

Число изображений можно определить по формуле $N = (2\pi/\gamma) - 1$, которая является общей для подобных задач. Так, число изображений точечного источника, полученных в двух взаимно перпендикулярных плоских зеркалах ($\gamma = \pi/2$), $N = 3$, в плоском зеркале ($\gamma = \pi$) $N = 1$.

Задачи для самостоятельного решения

1. «Комната, в которую вступил Иван Иванович, была совершенно темна, потому что ставни были закрыты, и солнечный луч, проходя в дыру, сделанную в ставне, принял радужный цвет и, ударяясь в противоположную стену, рисовал на ней пёстрый ландшафт из крыш, деревьев и развешанного на дворе платья, всё только в обращённом виде» (Н. В. Гоголь. «Повесть о том, как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем»). Объясните это явление.

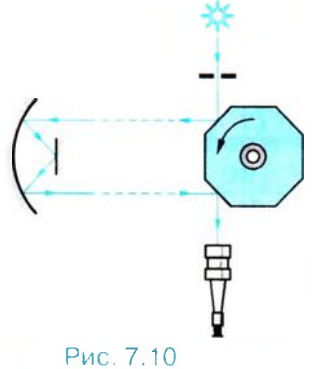


Рис. 7.10

2. Почему тень ног человека на земле от фонаря резко очерчена, а тень головы более расплывчата?

3. На рисунке 7.10 представлена схема опыта Майкельсона по определению скорости света. С какой частотой должна вращаться восьмиугольная зеркальная призма, чтобы источник был виден в зрительную трубу, если световой луч проходит расстояние, примерно равное 71 км?

4. Предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, образующими угол $\alpha = 30°$, и находится на расстоянии $l = 10$ см от линии пересечения зеркал на одинаковом расстоянии от обоих зеркал. Определите расстояние между мнимыми изображениями этого предмета в зеркалах.

5. Луч от точечного источника S падает на плоское зеркало в точке A и, отражаясь, проходит через точку B (рис. 7.11). Докажите, что если бы луч от того же источника прошёл через точку B, отразившись от зеркала в точке D, то:

1) не был бы выполнен закон отражения;

2) путь SDB был бы пройден светом за большее время, чем путь SAB.

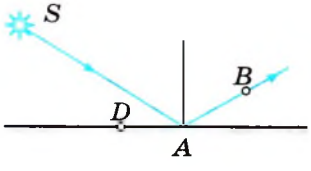


Рис. 7.11

§ 47 ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Вспомните, в чём состоит явление преломления света.

При падении светового луча на границу раздела двух сред часть световой энергии возвращается в первую среду, т. е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, меняя при этом, как правило, направление распространения.

Приведите примеры явления преломления света, которые вы наблюдали в повседневной жизни.

Запомни **Преломлением света** называется явление изменения направления распространения света при прохождении через границу двух сред.

Проведите описанные в тексте эксперименты и начертите ход лучей, отражённых от монеты и попадающих в глаз.

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого непрозрачного сосуда монету или другой небольшой предмет. Подвинем сосуд так, чтобы центр монеты, край сосуда и глаз находились на одной прямой. Не меняя положения головы, будем наливать в сосуд воду. По мере повышения уровня воды дно сосуда с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь будет видна полностью. Установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если посмотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону.

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред — преломлением света.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча AB (рис. 7.12), преломлённого луча DB и перпендикуляра CE к поверхности раздела сред, восставленного в точке падения.

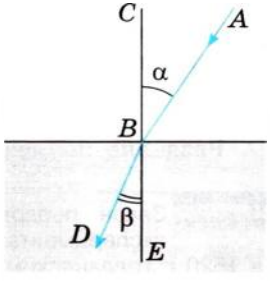


Рис. 7.12

Угол между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности называется **углом падения**, а угол между преломлённым лучом и перпендикуляром — **углом преломления**.

Падающий, отражённый и преломлённый лучи нетрудно наблюдать, сделав узкий световой пучок видимым.

Вывод закона преломления света. Выведем закон преломления света с помощью принципа Гюйгенса.

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано тем, что скорость распространения света неодинакова

Направьте луч лазерной указки на поверхность воды в прозрачном сосуде и посмотрите, как он преломляется.

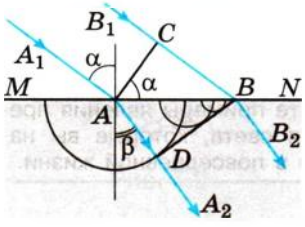


Рис. 7.13

и зависит от свойств среды. Обозначим скорость волны в первой среде через v_1, а во второй — через v_2.

Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, воздуха и воды) падает плоская световая волна (рис. 7.13). Обозначим через AC фронт волны в тот момент, когда волна достигнет точки A. Луч B_1B достигнет границы раздела двух сред спустя время Δt:

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}.$$

Когда волна достигнет точки B, вторичная волна во второй среде от источника, находящегося в точке A, уже будет иметь вид полусферы радиусом

$$AD = v_2\Delta t.$$

Фронт преломлённой волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем фронтам вторичных волн во второй среде, источники которых находятся на границе раздела сред. В данном случае фронт преломлённой волны — плоскость BD. Она является огибающей фронтов вторичных волн.

Угол падения α луча A_1A равен углу CAB в треугольнике ABC (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Следовательно,

$$CB = v_1\Delta t = AB\sin\alpha. \qquad (7.2)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Поэтому

$$AD = v_2\Delta t = AB\sin\beta. \qquad (7.3)$$

Разделив почленно уравнение (7.2) на уравнение (7.3), получим

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \qquad (7.4)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Интересно Закон преломления света был экспериментально установлен в 1620 г. голландским учёным Виллебродом Снеллиусом, а в 1637 г. независимо от Снеллиуса этот закон математически вывел французский математик Рене Декарт.

Величина n называется **относительным показателем преломления.**

Сформулируем *законы преломления света.*

Законы преломления света

1) Падающий луч, преломлённый луч и нормаль к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.

2) Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих двух сред, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой.

Показатель преломления. Из уравнения (7.4) следует, что показатель преломления равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (7.5)$$

Убедитесь экспериментально в справедливости закона преломления, измеряя углы падения и преломления и вычисляя отношение их синусов при различных углах падения. Это отношение должно остаться неизменным. Эксперимент поставьте самостоятельно.

Если угол преломления β меньше угла падения α, то согласно уравнению (7.4) скорость света во второй среде меньше, чем в первой.

Запомни Показатель преломления среды относительно вакуума называют **абсолютным показателем преломления этой среды.**

Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в среде, и равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду: $n = \frac{c}{v}$.

Пользуясь формулой (7.5), можно выразить относительный показатель преломления через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред.

Действительно, так как $n_1 = \frac{c}{v_1}$ и $n_2 = \frac{c}{v_2}$, где c — скорость света в вакууме, то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (7.6)$$

Важно Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть *оптически менее плотной средой*, а среду с бóльшим показателем преломления — *оптически более плотной*.

Сделайте рисунок, аналогичный рисунку 7.13, для случая, когда скорость света во второй среде больше, чем в первой.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физических свойств и состояния среды, т. е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нём упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от длины волны λ света. Для красного света он меньше, чем для зелёного, а для зелёного меньше, чем для фиолетового. Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение n и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от приведённых факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух — твёрдое тело или воздух — жидкость, а не через границу

вакуум — среда. Однако абсолютный показатель преломления n_2 твёрдого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для жёлтого света равен примерно $n_1 \approx 1{,}000292$. Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \qquad (7.7)$$

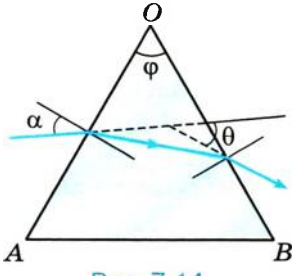


Рис. 7.14

Ход лучей в треугольной призме. С помощью закона преломления света можно рассчитать ход лучей в различных оптических устройствах, например в треугольной призме, изготовленной из стекла или другого прозрачного материала.

На рисунке 7.14 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной её боковым рёбрам. Луч в призме отклоняется к основанию, преломляясь на гранях *OA* и *OB*.

Запомни Угол φ между гранями *OA* и *OB* (см. рис. 7.14) называют **преломляющим углом призмы.**

Выведите примерное равенство $\theta \approx (n - 1)\varphi$.

Угол θ отклонения луча зависит от преломляющего угла призмы, показателя преломления n материала призмы и угла падения α. Он может быть вычислен с помощью закона преломления (см. формулу (7.4)). При малых углах α и φ угол $\theta \approx (n - 1)\varphi$, где n — относительный показатель преломления.

Законы преломления света. Показатель преломления — Найти

1. Каков физический смысл показателя преломления?
2. Чем отличается относительный показатель преломления от абсолютного?

1. При прохождении через границу раздела двух сред измерены два угла падения α_1 и α_2 и два соответствующих им угла преломления γ_1 и γ_2. О соотношении этих углов можно утверждать, что

1) $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$ 2) $\frac{\alpha_1}{\gamma_1} = \frac{\alpha_2}{\gamma_2}$ 3) $\frac{\sin\alpha_2}{\sin\alpha_1} = \frac{\sin\gamma_1}{\sin\gamma_2}$ 4) $\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{\sin\gamma_1}{\sin\gamma_2}$

§ 48 ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Какие световые явления наблюдаются на границе раздела двух сред? Каким законам подчиняются эти явления?

При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную, например из воздуха в стекло или воду, $v_1 > v_2$, и, следовательно, согласно закону преломления (см. формулу (7.4)) показатель преломления $n > 1$. Поэтому $\alpha > \beta$ (рис. 7.15) — угол падения больше угла преломления.

Важно При прохождении света из оптически менее плотной среды в оптически более плотную луч приближается к нормали к границе раздела сред.

Если же направить луч света в обратном направлении — из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (например в воздух) вдоль ранее преломлённого луча (рис. 7.16), то закон преломления можно записать так:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n}. \qquad (7.8)$$

Важно Преломлённый луч по выходе из оптически более плотной среды будет направлен по линии ранее падавшего луча, поэтому $\alpha < \beta$, в этом случае угол падения меньше угла преломления и преломлённый луч отклоняется от нормали.

По мере увеличения угла α угол преломления β также увеличивается, оставаясь всё время больше угла α. Наконец, при некотором угле падения α значение угла преломления β приблизится к 90°, и преломлённый луч будет направлен практически вдоль границы раздела двух сред (рис. 7.17). Наибольшему возможному углу преломления $\beta = 90°$ соответствует угол падения α_0 (луч *1—1*).

При $\alpha > \alpha_0$ преломление света невозможно, луч должен полностью отразиться (луч *2—2*).

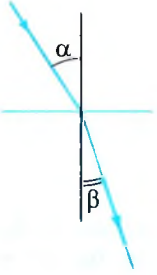


Рис. 7.15

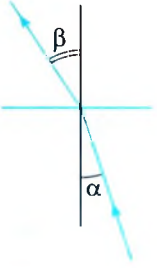


Рис. 7.16

Запомни Отражение света, падающего из оптически более плотной среды на границу с оптически менее плотной средой под углом падения, бо́льшим некоторого критического угла α_0, называется **полным отражением света** или **полным внутренним отражением.**

Для наблюдения полного отражения света можно использовать стеклянный полуцилиндр с матовой задней поверхностью. Полуцилиндр

Проведите описанный в тексте эксперимент с полуцилиндром и убедитесь в справедливости *принципа обратимости лучей.*

закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности полуцилиндра совпадала с центром диска (рис. 7.18). Узкий пучок света от осветителя направляют снизу на боковую поверхность полуцилиндра перпендикулярно его поверхности. На этой поверхности луч не преломляется. На плоской поверхности луч частично преломляется и частично отражается. Отражение происходит в соответствии с законом отражения, а преломление — в соответствии с законом преломления (см. формулу (7.4)).

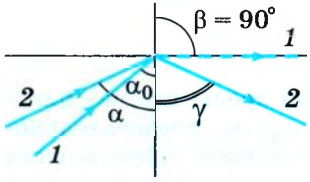


Рис. 7.17


Рис. 7.18

Если увеличивать угол падения, то можно заметить, что яркость (и, следовательно, энергия) отражённого пучка усиливается, в то время как яркость (энергия) преломлённого пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломлённого пучка, когда угол преломления приближается к 90°. Наконец, когда угол падения становится таким, что преломлённый пучок идёт вдоль границы раздела двух сред (см. рис. 7.17), доля отражённой энергии составляет почти 100 %. Повернём осветитель, увеличив угол падения до α. Мы увидим, что преломлённый пучок исчез, и весь свет отражается от границы раздела двух сред, т. е. происходит полное отражение света.

Запомни

Угол падения α_0, соответствующий углу преломления 90°, называют **предельным углом полного отражения.**

При $\sin\beta = 1$ формула (7.8) принимает вид

$$\sin\alpha_0 = \frac{1}{n}. \qquad (7.9)$$

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения α_0. Для воды ($n = 1{,}33$) оно равно 48°35′, для стекла ($n = 1{,}5$) принимает значение 41°51′, а для алмаза ($n = 2{,}42$) составляет 24°40′. Во всех случаях второй средой является воздух.

Явление полного отражения света используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — световодов. Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

За счёт многократного полного отражения свет может быть

Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Налейте в стакан воду и поднимите его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды, если рассматривать её снизу сквозь стенку, покажется блестящей, словно посеребрённой вследствие полного отражения света.

направлен по любому (прямому или изогнутому) пути (рис. 7.19). Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передаётся какой-нибудь элемент изображения (рис. 7.20). Жгуты из волокон используются, например, в медицине для исследования внутренних органов.

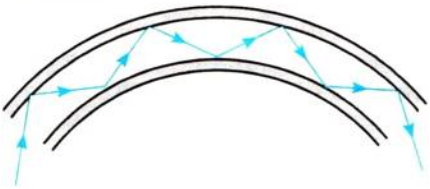


Рис. 7.19

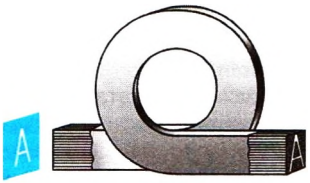
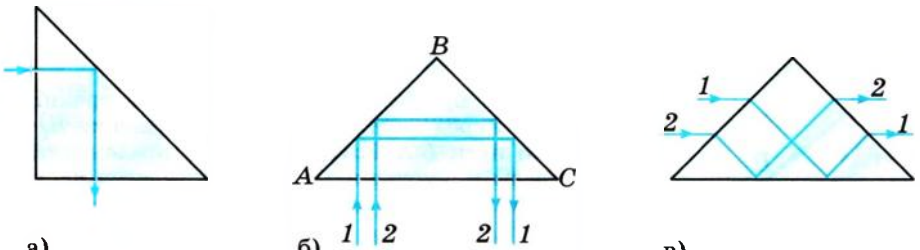


Рис. 7.20

Объём передаваемой информации пропорционален частоте несущей волны. Частота же световых волн в 10^5—10^6 раз больше частоты радиоволн. Таким образом, с помощью световых волн можно передавать большой объём информации.

В последнее время волоконная оптика широко используется для быстрой передачи компьютерных сигналов. При этом передаются сигналы в световом диапазоне, что даёт ряд преимуществ, например, малые потери энергии.

Явление полного отражения используется в поворотных и оборачивающих призмах (рис. 7.21). Предельный угол преломления на границе стекло—воздух равен 42°.



а) б) в)

Рис. 7.21

Рассмотрим ход лучей сквозь поворотную и одновременно оборачивающую линзу, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник, изображённую на рисунке 7.21, *б*. Проходя через широкую грань, лучи не изменяют своего направления, так как угол падения равен нулю. На узкой грани *AB* лучи полностью отражаются, так как угол падения равен 45° и, следовательно, больше предельного угла полного отражения для стекла, равного 42°. После полного отражения от левой грани лучи падают на правую грань, снова полностью отражаются и выходят из призмы по направлению, перпендикулярному широкой грани. Таким

Вспомните, как идут лучи в треугольной призме (см. § 47).

образом, направление пучка света изменяется на 180°. Такой ход лучей используется, например, в призматических биноклях.

Призмы широко используются в оптических приборах. Одно из преимуществ призм перед зеркалами заключается в том, что в призмах, в отличие от зеркал, отражается почти 100 % энергии светового луча и изображение получается ярким.

Полное отражение света. Предельный угол полного отражения

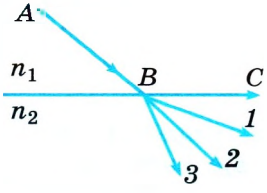
Найти

1. Чему равен предельный угол полного отражения на границе раздела сред алмаз—воздух?
2. Как называется телевизионная связь, которая основана на явлении полного отражения?

1. Показатели преломления относительно воздуха для воды, стекла и алмаза соответственно равны 1,33; 1,5; 2,42. В каком из этих веществ предельный угол полного отражения при выходе в воздух имеет максимальное значение?
1) в воде
2) в стекле
3) в алмазе
4) во всех трёх веществах угол одинаков

2. Синус предельного угла полного отражения на границе стекло—воздух равен 8/13. Абсолютный показатель преломления стекла приблизительно равен
1) 1,63 2) 1,5 3) 1,25 4) 0,62

3. Синус предельного угла полного отражения на границе стекло—вода равен 0,875. Чему равна скорость света в стекле? Скорость света в воде $2{,}25 \cdot 10^8$ м/с.
1) $4{,}88 \cdot 10^8$ м/с
2) $2{,}57 \cdot 10^8$ м/с
3) $1{,}97 \cdot 10^8$ м/с
4) $3{,}82 \cdot 10^8$ м/с



4. Луч AB преломляется в точке B на границе раздела двух сред с показателями преломления $n_1 > n_2$ и идёт по пути BC. Если показатель преломления первой среды n_1 уменьшить, сохранив условие $n_1 > n_2$, то преломлённый луч
1) пойдёт по пути *1*
2) пойдёт по пути *2*
3) пойдёт по пути *3*
4) исчезнет

«Экспериментальное определение абсолютного показателя преломления различных прозрачных сред, а также относительного показателя преломления света на границе раздела двух сред»

§ 49 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА»

При решении задач надо хорошо знать законы преломления света. Обратите внимание на то, что размеры предмета из-за преломления света кажутся изменёнными. Полное отражение наблюдается только в случае падения лучей на границу оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой.

Задача 1. Определите, на какой угол θ отклоняется световой луч от своего первоначального направления при переходе из воздуха в воду, если угол падения $\alpha = 75°$.

Р е ш е н и е. Из рисунка 7.22 видно, что $\theta = \alpha - \beta$. Согласно закону преломления $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$, где n — показатель преломления воды.

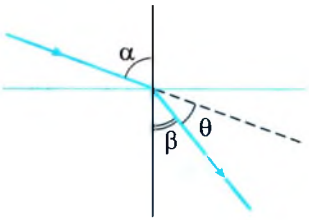


Рис. 7.22

Отсюда $\sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n} \approx 0{,}727$.

Из таблицы синусов находим: $\beta \approx 46°$. Следовательно,

$$\theta = 75° - 46° \approx 29°.$$

Задача 2. Определите, во сколько раз истинная глубина водоёма больше кажущейся, если смотреть по вертикали вниз. Показатель преломления воды $n = 1{,}3$.

Р е ш е н и е. Построим ход лучей, вышедших из точки S на дне водоёма и попавших в глаз наблюдателя (рис. 7.23). Так как наблюдение ведётся по вертикали, один из лучей (SA) направим перпендикулярно поверхности воды, другой (SB) — под малым углом α к перпендикуляру, восставленному в точке B (при больших углах α лучи не попадут в глаз). Точка S_1 пересечения луча SA и продолжения преломлённого луча SB — мнимое изображение точки S.

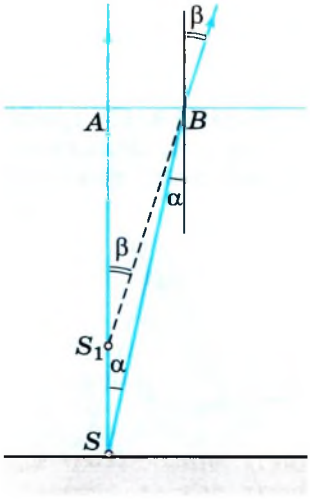


Рис. 7.23

Угол ASB равен углу падения α (внутренние накрест лежащие углы), а угол AS_1B равен углу преломления β (соответственные углы при параллельных прямых). Прямоугольные треугольники ASB и AS_1B имеют общий катет AB, который можно выразить через истинную глубину водоёма $SA = H$ и через кажущуюся глубину $S_1A = h$: $AB = H \operatorname{tg}\alpha = h \operatorname{tg}\beta$.

Отсюда $\frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha}$.

Так как углы α и β малы, то $\frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = n$, где n — показатель преломления воды. Следовательно, $\frac{H}{h} = n$. Истинная глубина водоёма больше кажущейся в $n = 1{,}3$ раза.

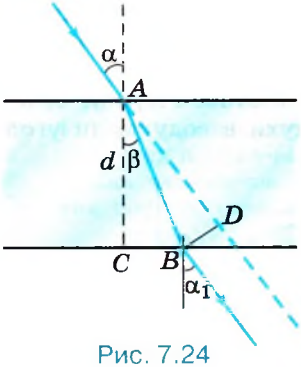


Рис. 7.24

Задача 3. Определите линейное смещение луча при прохождении его через плоскопараллельную стеклянную пластинку с показателем преломления $n_2 = 1{,}7$ и толщиной $d = 4$ см. Угол падения луча 30°. Показатель преломления воздуха равен $n_1 = 1$.

Р е ш е н и е. Выходящий и входящий в пластинку лучи (рис. 7.24) параллельны, что следует из закона преломления: на первой границе воздух—стекло $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$, на второй границе стекло—воздух $\frac{\sin\beta}{\sin\alpha_1} = \frac{n_1}{n_2}$, откуда $\angle\alpha = \angle\alpha_1$.

Для определения смещения луча x рассмотрим треугольники ABC и ABD: $x = BD = AB\sin(\alpha - \beta)$, $AB = \frac{AC}{\cos\beta} = \frac{d}{\cos\beta}$. Тогда

$$x = \frac{d}{\cos\beta}\sin(\alpha - \beta).$$

Из первого уравнения определим угол β: $\sin\beta = \frac{n_1\sin\alpha}{n_2}$. Тогда

$$x = d\sin\alpha\left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2\alpha}{n_2^2 - \sin^2\alpha}}\right) \approx 1 \text{ см}.$$

Задача 4. На грань призмы с углом при вершине γ под малым углом α падает луч. Докажите, что отклонение луча $\delta = (n - 1)\gamma$, где n — показатель преломления призмы.

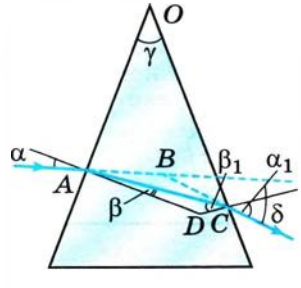


Рис. 7.25

Р е ш е н и е. Очевидно, что δ — внешний угол треугольника ABC (рис. 7.25), $\delta = \angle BAC + \angle BCA$.

Обозначим через α и β, α_1 и β_1 углы падения и преломления на первой и второй поверхностях призмы так, как показано на рисунке 7.25. Тогда $\angle BAC = \alpha - \beta$, $\angle BCA = \alpha_1 - \beta_1$, или $\delta = \alpha - \beta + \alpha_1 - \beta_1$.

По условию углы малы, и, следовательно, $\frac{\alpha}{\beta} \approx n$, $\frac{\alpha_1}{\beta_1} \approx n$. Тогда

$$\delta = (n - 1)\beta + (n - 1)\beta_1. \qquad (1)$$

Из четырёхугольника $AOCD$ (углы OAD и OCD прямые) следует, что $\angle ADC = \pi - \gamma$, а из треугольника ACD получим $\angle ADC = \pi - \beta - \beta_1$, откуда

$$\beta_1 = \gamma - \beta. \qquad (2)$$

Подставив в уравнение (1) выражение (2), получим $\delta = (n - 1)\beta + (n - 1)\gamma - (n - 1)\beta = (n - 1)\gamma$.

Задача 5. Прозрачный кубик лежит на монете. Монета освещается рассеянным светом. Определите, при каком значении показателя преломления материала кубика монета не будет видна через его боковую грань.

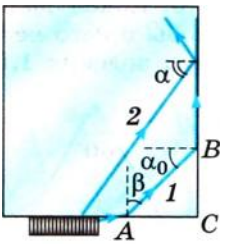


Рис. 7.26

Решение. Монета не видна, когда лучи, отражённые от неё, не выходят за грань кубика (рис. 7.26). Это может быть, если лучи, падающие на грань, отражаются от неё или скользят вдоль поверхности грани. Из этого следует, что луч должен падать на боковую грань под углом, бóльшим предельного угла или равным ему: $\alpha \geq \alpha_0$. Если луч *1*, падающий на основание под углом, близким к $\pi/2$, преломившись на нижней грани кубика, попадёт на боковую грань и претерпит полное отражение, т. е. будет скользить вдоль боковой грани кубика, то все остальные лучи, имеющие меньший угол падения на основание, будут падать на эту грань под углом, бóльшим α_0, и отразятся от неё: $\alpha > \alpha_0$ (например, луч *2*). Для преломления луча *1*, отражённого от монеты, на нижней грани кубика справедливо выражение $\dfrac{\sin\frac{\pi}{2}}{\sin\beta} = n$.

Закон преломления на границе кубик—воздух имеет вид $\dfrac{\sin\alpha_0}{\sin\frac{\pi}{2}} = \dfrac{1}{n}$, откуда $\beta = \alpha_0$, а так как треугольник ABC прямоугольный, то $\alpha_0 + \beta = \pi/2$, и, следовательно, $\alpha_0 = 45°$. Отсюда $\sin\alpha_0 = \dfrac{1}{n}$, $n = \sqrt{2}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Вычислите показатель преломления воды относительно алмаза и сероуглерода относительно льда.

2. Сечение призмы представляет собой равносторонний треугольник. Луч проходит сквозь призму, преломляясь в точках, равноотстоящих от вершины (рис. 7.27). Чему равно наибольшее допустимое значение показателя преломления вещества призмы?

3. Изобразите ход лучей через треугольную стеклянную призму, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник. Лучи падают на призму, как показано на рисунке 7.28. Останется ли ход лучей таким же, если призму погрузить в воду?

4. Под каким углом на боковую поверхность призмы должен падать луч, чтобы в призме с углом при вершине $\gamma = 60°$ его отклонение было минимальным? Определите этот угол для стеклянной призмы с показателем преломления $n = 1{,}41$.

5. В стеклянной пластинке с показателем преломления 1,4 образовался воздушный клин с углом у основания 30°. Определите отклонение луча, падающего нормально на боковую грань (рис. 7.29).

6. Какая должна быть минимальная длина стороны квадратного плота, чтобы с него не был виден камень, находящийся под серединой плота? Глубина водоёма 1,5 м, показатель преломления воды 1,3.

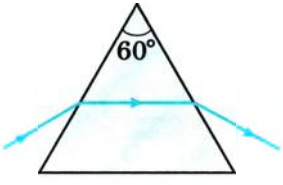
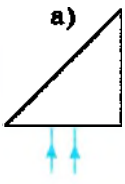


Рис. 7.27



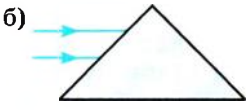


Рис. 7.28

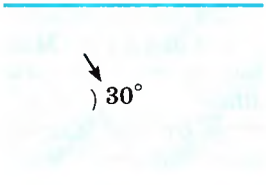
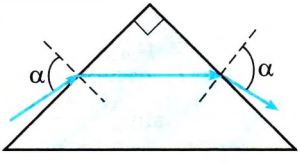


Рис. 7.29



1. Если луч света падает на прямоугольную призму под углом $\alpha = 80°$ ($\sin 80° = 0{,}98$), то ход луча оказывается симметричным. Чему равен показатель преломления n материала призмы? Ответ округлите до десятых.

2. Водолазу, находящемуся под водой, кажется, что пролетающий над головой самолёт, находится на высоте, равной 900 м. Определите реальную высоту, на которой летит самолёт, если показатель преломления воды равен 4/3.

3. В дно водоёма глубиной 3 м вертикально вбита свая, скрытая под водой. Высота сваи 2 м. Свая отбрасывает на дне водоёма тень длиной 0,75 м. Определите угол падения солнечных лучей на поверхность воды. Показатель преломления воды $n = 4/3$.

4. На поверхности воды плавает надувной плот шириной 4 м и длиной 6 м. Небо затянуто сплошным облачным покровом, полностью рассеивающим солнечный свет. Определите глубину тени под плотом. Глубину погружения плота и рассеивание света водой не учитывайте. Показатель преломления воды относительно воздуха $n = 4/3$.

5. На дне аквариума глубиной 20 см лежит плоское зеркало. Чему равно расстояние от лица человека до его мнимого изображения в зеркале, если он рассматривает его с расстояния 20 см над поверхностью воды? Используйте тот факт, что для малых углов $\operatorname{tg}\alpha \approx \sin\alpha$. Показатель преломления воды $n = 4/3$.

§ 50 ЛИНЗЫ. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗЕ

Вспомните, что такое линза.
Какие бывают линзы, где они используются?

Запомни Прозрачное тело, ограниченное криволинейными поверхностями, называют **линзой**.

Простейшая линза — сферическая.

Виды линз. Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (двояковыпуклая линза — рис. 7.30, *а*), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (плоско-выпуклая линза — рис. 7.30, *б*), выпуклой и вогнутой сферическими поверхностями (вогнуто-выпуклая линза — рис. 7.30, *в*).

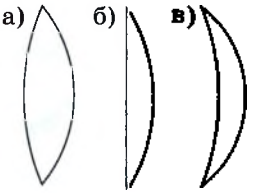


Рис. 7.30

Запомни Линзы, которые посредине толще, чем у краёв, называются **выпуклыми.**
Линзы, которые посредине тоньше, чем у краёв, называются **вогнутыми.**

На рисунке 7.31 изображено три вида вогнутых линз: двояковогнутая — *а*, плоско-вогнутая — *б* и выпукло-вогнутая — *в*.

Тонкая линза. Тонкая линза — это физическая модель реальной линзы.

Запомни **Тонкой линзой** называют такую линзу, толщина которой $l = AB$ пренебрежимо мала по сравнению с радиусами R_1 и R_2 сферических поверхностей линзы (рис. 7.32) и расстоянием предмета от линзы.

Точки A и B — вершины сферических сегментов — расположены в тонкой линзе столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку, которую называют **оптическим центром линзы** и обозначают буквой O.

Прямую O_1O_2, проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют её **главной оптической осью.** Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют **побочной оптической осью** (рис. 7.33).

В дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем подразумевать тонкую линзу. Главная оптическая ось тонкой линзы проходит через оптический центр. Луч света, который проходит через оптический центр линзы, не изменяет своего направления, а только смещается, но, так как линза тонкая, этим смещением можно пренебречь.

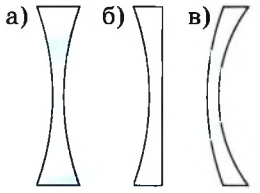


Рис. 7.31

Изображение в линзе. Подобно плоскому зеркалу, линза создаёт изображения источников света. Это означает, что свет, исходящий из какой-либо точки

Начертите луч, идущий через плоскопараллельную пластинку. На основании рисунка сделайте вывод, как меняется смещение луча при уменьшении толщины пластинки.
Почему неверно утверждение, что луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется?

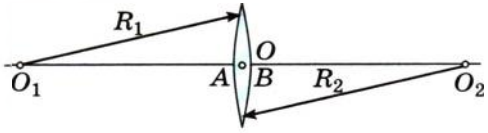


Рис. 7.32

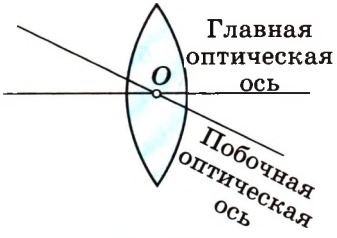


Рис. 7.33

предмета (источника), после преломления в линзе снова собирается в одну точку (изображение) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если по выходе из линзы лучи сходятся, они образуют *действительное* изображение. В случае же, когда прошедшие через линзу лучи расходятся, то пересекаются в одной точке не сами эти лучи, а лишь их продолжения. Изображение в этом случае *мнимое*. Его можно наблюдать глазом непосредственно или с помощью оптических приборов.

Собирающая линза. Обычно линзы изготавливают из стекла. Выпуклые линзы в воздухе являются собирающими. Любую из них схематично можно себе представить как совокупность стеклянных призм (рис. 7.34). В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Все лучи, идущие через линзу, отклоняются в сторону её главной оптической оси.

Интересно Лучи или их продолжения будут пересекаться практически в одной точке, если они образуют малые углы с главной оптической осью (такие лучи называют *параксиальными* лучами).


Рис. 7.34

Запомни Точка, в которой пересекаются после преломления в собирающей линзе лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом линзы.**

Эту точку обозначают буквой F (рис. 7.35, *а*).

Пучки, параллельные главной оптической оси, можно направить на линзу и с противоположной стороны. Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, будет другим главным фокусом (рис. 7.35, *б*).

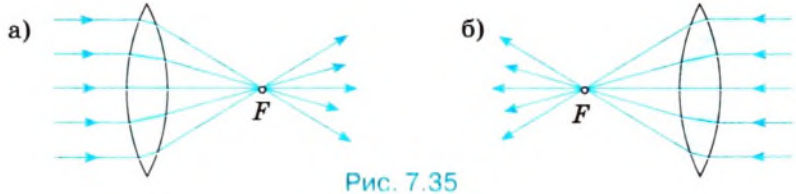


Рис. 7.35

Важно Таким образом, у линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одинаковых расстояниях от неё.

Запомни Расстояние от главных фокусов до оптического центра линзы называется **фокусным расстоянием линзы;** его обозначают буквой F (той же буквой, что и фокус).

Направим три узких параллельных пучка лучей от осветителя под углом к главной оптической оси линзы. Мы увидим, что пересечение лучей произойдёт не в главном фокусе, а в другой точке (рис. 7.36, *а*). Эта точка находится в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус.

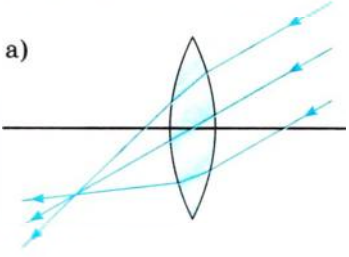
Запомни Плоскость, которой принадлежат точки пересечения преломлённых пучков лучей независимо от углов, образуемых этими пучками с главной оптической осью, называют **фокальной плоскостью** (рис. 7.36, *б*).

Важно Пересечение лучей, параллельных побочной оптической оси, происходит в точке её пересечения с фокальной плоскостью (см. рис. 7.36, *б*).

Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в фокальной плоскости), получим после преломления параллельные лучи (рис. 7.37).

Если сместить источник дальше от фокуса линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение (рис. 7.38, *а*). Когда же источник находится между фокусом и оптическим центром линзы, преломлённые лучи расходятся и изображение получается мнимым (рис. 7.38, *б*).

Рассеивающая линза. Вогнутые линзы, находящиеся в оптически менее плотной среде (по сравнению с материалом линзы), являются рассеивающими. Направив на такую линзу лучи параллельно главной оптической оси, мы



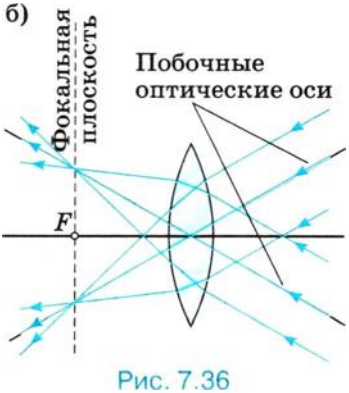


Рис. 7.36

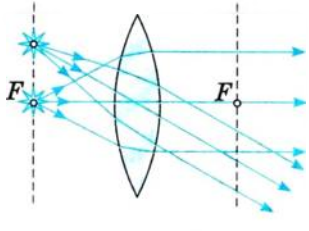


Рис. 7.37

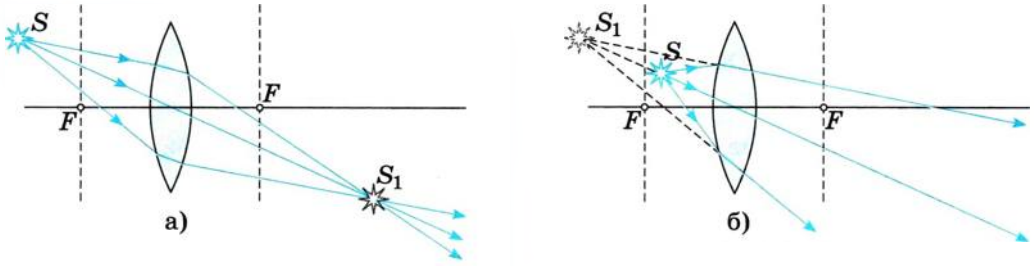


Рис. 7.38

Ещё раз убедитесь в том, что параллельные главной оптической оси лучи сходятся в точку только в случае тонкой линзы. Начертите крупно толстую сферическую линзу, проведите параллельно её главной оптической оси три луча. Измерьте транспортиром углы падения и вычислите углы преломления, считая линзу стеклянной (n = 1,3). Проведите преломлённые лучи. Проделайте то же самое на другой сферической поверхности. Сделайте вывод.

получим расходящийся пучок лучей. Их продолжения пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы.

В этом случае главный фокус является мнимым (рис. 7.39, *а*) и расположен на расстоянии F от линзы. Другой мнимый главный фокус находится по другую сторону линзы на таком же расстоянии, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 7.39, *б*).

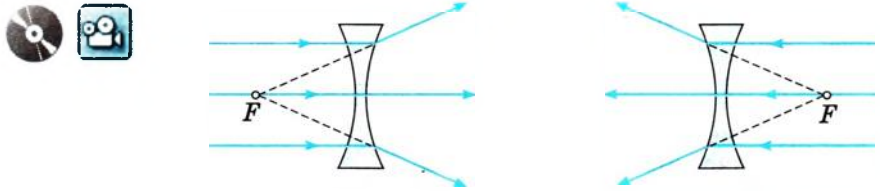


Рис. 7.39

Оптическая сила линзы.

Запомни Величину, обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой линзы.** Её обозначают буквой D:

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

$D > 0$, если линза собирающая, $D < 0$, если линза рассеивающая.

Почему мы считаем, что фокусы расположены симметрично, хотя сама линза может быть несимметрична?

Чем ближе к линзе её фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше оптическая сила линзы.

Оптическую силу D линз выражают в *диоптриях* (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м.

Построение изображений в линзе. Свойства тонкой линзы определяются главным образом расположением её фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника света до линзы и её фокусное расстояние (положения фокусов), можно найти расстояние до изображения, не рассматривая ход лучей внутри линзы.

Поэтому нет необходимости изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Собирающую линзу обозначают символом, показанным на рисунке 7.40, *а*, а рассеивающую — символом, приведённым на рисунке 7.40, *б*.

Нам уже известно, что все лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета, пройдя сквозь тонкую линзу, пересекаются также в одной точке. Именно поэтому линза даёт изображение любой точки предмета, а следовательно, и всего предмета в целом.

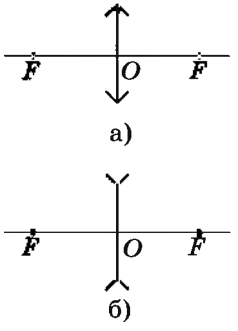


Рис. 7.40

Для построения изображений, получаемых с помощью собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой заданы, мы будем пользоваться в основном тремя видами «удобных» лучей. Как было выяснено, лучи, параллельные главной оптической оси, преломившись в линзе, проходят через её фокус. Из обратимости хода лучей следует, что лучи, идущие к линзе через её фокус, после преломления будут направлены параллельно главной оптической оси. Наконец, лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления.

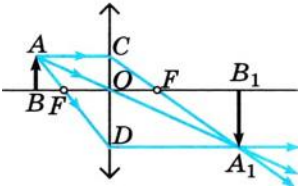


Рис. 7.41

Построим изображение предмета AB (рис. 7.41). Чтобы найти изображение точки A, направим луч AC параллельно главной оптической оси. После преломления он пройдёт через фокус линзы. Другой луч — AD можно направить через фокус. После преломления он пройдёт параллельно главной оптической оси. В точке пересечения этих двух преломлённых лучей будет находиться изображение A_1 точки A. Так же можно построить и все остальные точки изображения. Не следует только думать, что изображение создаётся двумя или тремя лучами; оно формируется всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки A и собравшихся в точке A_1. В частности, в точку A_1 попадает луч AOA_1, прошедший через оптический центр O линзы. Таким образом, для построения изображения точки можно использовать любые два из трёх «удобных» лучей, ход которых через линзу известен: 1) луч, проходящий через оптический центр; 2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси; 3) луч, проходящий через фокус.

Изображение предмета AB в этом случае будет действительным, перевёрнутым, увеличенным.

Рассмотрим ещё случай, когда необходимо построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность заключается в том,

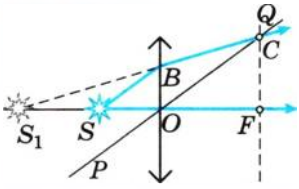


Рис. 7.42

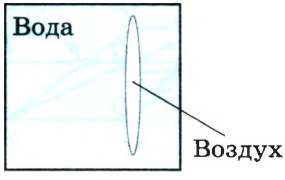
что все три «удобных» луча сливаются в один луч SF, совпадающий с главной оптической осью. Поэтому необходимо определить ход произвольного луча SB (рис. 7.42), попавшего на линзу в точке B.

Для построения преломлённого луча проведём побочную оптическую ось PQ, параллельную лучу SB. Затем построим фокальную плоскость и найдём точку C пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку и пройдёт преломлённый луч BC. Таким образом, построен ход двух лучей, выходящих из точки S. После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение S_1 точки S будет мнимым, так как источник расположен между фокусом и линзой.

Линзы. Построение изображений в линзах

Найти

1. С помощью очень тонких одинаковых сегментов изготовлены четыре двояковогнутые линзы. Показатель преломления глицерина больше, чем показатель преломления воды. У собирающей линзы
1) между стёклами глицерин, окружающая среда — воздух
2) между стёклами вода, окружающая среда — воздух
3) между стёклами глицерин, окружающая среда — вода
4) между стёклами вода, окружающая среда — глицерин



2. Линзу, изготовленную из двух тонких сферических стёкол одинакового радиуса, между которыми находится воздух (воздушная линза), опустили в воду. Как действует эта линза?
1) как собирающая линза
2) как рассеивающая линза
3) она не изменяет хода луча
4) может действовать и как собирающая, и как рассеивающая линза

3. На каком расстоянии от собирающей линзы нужно поместить предмет, чтобы его изображение было действительным?
1) большем, чем фокусное расстояние
2) меньшем, чем фокусное расстояние
3) при любом расстоянии изображение будет действительным
4) при любом расстоянии изображение будет мнимым

4. Предмет находится между собирающей линзой и её фокусом. Изображение предмета
1) мнимое, перевёрнутое
2) действительное, перевёрнутое
3) действительное, прямое
4) мнимое, прямое

5. Оптическая сила линзы — это величина,
1) равная отношению фокусного расстояния линзы к её диаметру
2) обратная её фокусному расстоянию
3) равная отношению диаметра линзы к её фокусному расстоянию
4) обратная расстоянию от линзы до изображения предмета

§ 51 ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

Какие изображения в линзах являются действительными? мнимыми? Какое изображение можно видеть непосредственно, а какое на экране?

Выведем формулу, связывающую три величины: расстояние d от предмета до линзы, расстояние f от изображения до линзы и фокусное расстояние F.

Из подобия треугольников AOB и A_1B_1O (см. рис. 7.41) следует равенство $\frac{BO}{OB_1} = \frac{AB}{A_1B_1}$.

Из подобия треугольников COF и FA_1B_1 имеем $\frac{CO}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$.

Так как $AB = CO$, то $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$. Отсюда $\frac{BO}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1}$, или $\frac{d}{f} = \frac{F}{f - F}$.

Учитывая свойство пропорции, имеем $fF + Fd = fd$.

Поделив все члены полученного равенства на произведение Ffd, получим

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \qquad (7.10)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \qquad (7.11)$$

Запомни Уравнение (7.10), как и уравнение (7.11), принято называть **формулой тонкой линзы.**

Величины d, f и F есть расстояния, т. е. положительные числа. Однако отметим (без доказательства), что в зависимости от условий задачи, применяя формулу линзы, нужно ставить знаки перед членами уравнения согласно следующему правилу.

Важно

Если линза собирающая, то её фокус действительный и перед членом $\frac{1}{F}$ ставят знак «+». В случае рассеивающей линзы в правой части формулы (7.10) будет стоять знак «–».

Перед членом $\frac{1}{f}$ ставят знак «+», если изображение действительное, и знак «–» в случае мнимого изображения.

Перед членом $\frac{1}{d}$ ставят знак «+» в случае действительной светящейся точки и знак «–», если она мнимая (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

Таким образом, формулу линзы в общем виде можно записать так:

Постройте несколько последовательных изображений предмета AB (см. рис. 7.41) в линзе, изменяя расстояние d от $d > 2F$ до $d < F$. Начертите график зависимости f от d.

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

В том случае, когда F, f или d неизвестны, перед соответствующими членами $\frac{1}{F}$, $\frac{1}{f}$ или $\frac{1}{d}$ ставят знак «+». Но если в результате вычислений фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения либо до источника получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник мнимые.

Увеличение линзы. Изображение, получаемое с помощью линзы, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют *увеличением*.

Запомни

Линейным увеличением называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для нахождения линейного увеличения обратимся снова к рисунку 7.41. Если высота предмета AB равна h, а высота изображения A_1B_1 равна H, то

$$\Gamma = \frac{H}{h} \qquad (7.12)$$

есть *линейное увеличение*.

Из подобия треугольников AOB и OA_1B_1 следует, что $H/h = f/d$.

Следовательно, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

Подумайте, в каких случаях $\Gamma < 1$.

$$\Gamma = \frac{f}{d}. \qquad (7.13)$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа, телескопа. В глазу тоже есть линзы — роговица и хрусталик.

Формула тонкой линзы. Линейное увеличение Найти

1. Какие лучи удобно использовать для построения изображения в линзе?
2. Что называется увеличением линзы?

«Оптические системы»

1. Микроскоп, лупа, телескоп.
2. Камера-обскура. Проекционный фонарь.
3. Глаз как оптическая система.

§ 52 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЛИНЗЫ»

При использовании формулы линзы надо обратить внимание на знаки перед слагаемыми в этой формуле. Обычно в условии задачи даются числовые значения. Только построив изображение и поняв, действительное оно или мнимое, можно получить правильный ответ. При этом в формулу линзы ставят числа d, f и F, а знаки берут в соответствии с условием задачи и построением согласно указанному в § 51 правилу.

Задача 1. На рисунке 7.43 показаны расположения главной оптической оси MN линзы, светящейся точки S и её изображения S_1. Найдите построением оптический центр линзы и её фокусы. Определите, собирающей или рассеивающей является эта линза, действительным или мнимым является изображение.

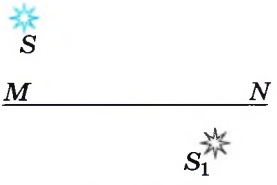


Рис. 7.43

Решение. Луч, проходящий через оптический центр линзы, не отклоняется от своего направления. Поэтому оптический центр O совпадает с точкой пересечения прямых SS_1 и MN (рис. 7.44). Проведём луч SK, параллельный главной оптической оси. Преломлённый луч KS_1 пройдёт через фокус. Зная, что луч, падающий на линзу через фокус, после преломления идёт параллельно главной оптической оси, находим другой фокус. Линза является собирающей, а изображение — действительным.

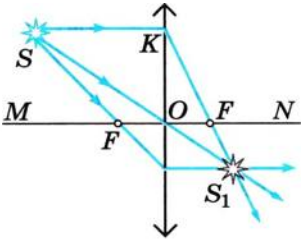


Рис. 7.44

Задача 2. Предмет имеет высоту $h = 2$ см. Какое фокусное расстояние F должна иметь линза, расположенная на расстоянии $f = 4$ м от экрана, чтобы изображение данного предмета на экране имело высоту $H = 1$ м?

Решение. Из формулы линзы $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ находим фокусное расстояние: $F = \frac{fd}{d + f}$.

Увеличение линзы можно выразить так: $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$. Отсюда $d = \frac{hf}{H}$. Поэтому $F = \frac{hf}{H + h} \approx 8$ см.

Задача 3. Фокусное расстояние собирающей линзы $F = 30$ см, расстояние от предмета до фокуса $l = 10$ см. Линейные размеры предмета 5 см. Определите размеры изображения H.

Р е ш е н и е. Из условия задачи неясно, где находится предмет. Он может располагаться как за фокусом, так и перед ним.

Рассмотрим сначала случай, когда $d_1 = F + l$. Запишем формулу линзы. Поскольку изображение будет действительным, имеем $\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F + l} + \frac{1}{f_1}$, откуда $f_1 = \frac{F(F + l)}{l}$.

Увеличение в этом случае $\Gamma_1 = \frac{H_1}{h} = \frac{f_1}{d_1}$, откуда $H_1 = \frac{f_1 h}{d_1} = \frac{F(F + l)h}{l(F + l)} = \frac{Fh}{l}$.

Если предмет расположить между фокусом и линзой, то изображение будет мнимым. В этом случае $d_2 = F - l$, и формула имеет вид $\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F - l} - \frac{1}{f_2}$.

Выполнив необходимые преобразования, получим $H_2 = \frac{Fh}{l}$.

Следовательно, в обоих случаях высота изображения одинакова и равна $H = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}05}{0{,}1}$ (м) = 0,15 м.

Задача 4. Тонкая линза с некоторым фокусным расстоянием F_1 создаёт прямое изображение предмета с увеличением $\Gamma_1 = \frac{2}{3}$. Чему будет равно увеличение Γ_2, если, не изменяя расстояние между предметом и линзой, заменить линзу на линзу с оптической силой $D_2 = -D_1$?

Р е ш е н и е. В первом случае (рис. 7.45, *а*) было получено уменьшенное прямое изображение предмета AB. Очевидно, что такое изображение можно получить только в рассеивающей линзе. Предмет находится между фокусом и оптическим центром, так как увеличение больше $\frac{1}{2}$. В этом случае формула линзы имеет вид $-\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_1}$; увеличение $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d}$, откуда $f_1 = d\Gamma_1$. При замене линзы на собирающую (рис. 7.45, *б*) ($D_2 = -D_1$) формула линзы имеет вид

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2},$$

откуда $\Gamma_2 = \frac{f_2}{d}$, $f_2 = d\Gamma_2$.

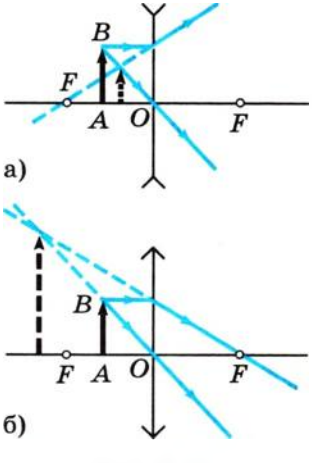
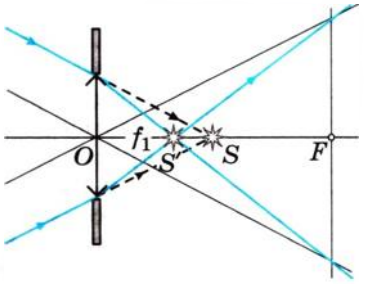


Рис. 7.45

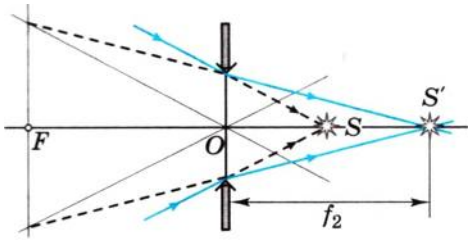
Приравнивая правые части формул линзы и учитывая знак «−», получаем

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d \cdot \Gamma_1} = \frac{1}{d \cdot \Gamma_2} - \frac{1}{d}, \qquad 2 = \frac{1}{\Gamma_1} + \frac{1}{\Gamma_2}, \qquad \Gamma_2 = \frac{1}{2 - \frac{1}{\Gamma_1}} = \frac{\Gamma_1}{2\Gamma_1 - 1} = 2.$$

Задача 5. На экран с круглым отверстием радиусом $r_0 = 10$ см падает сходящийся пучок света. Угол между крайним лучом и осью симметрии равен 60°. Определите точку, в которой будут сходиться лучи, если в отверстие вставляется линза 1) собирающая; 2) рассеивающая. Известно, что $D_1 = -D_2 = 10$ дптр.



а)



б)

Рис. 7.46

Р е ш е н и е. В данном случае источник является мнимым, находящимся на расстоянии $d = r_0 \operatorname{ctg} \alpha = \frac{r_0}{\sqrt{3}}$. Формула линзы в первом случае (рис. 7.46, *а*) имеет вид $D_1 = \frac{1}{F_1} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1}$, где f_1 — расстояние от линзы до точки пересечения лучей, преломлённых в линзе, откуда

$$f_1 = \frac{F_1 d}{d + F_1} = \frac{F_1 \frac{r_0}{\sqrt{3}}}{\frac{r_0}{\sqrt{3}} + F_1} = 5{,}9 \text{ см}.$$

Во втором случае формула линзы имеет вид $D_2 = -\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f_2}$. Отсюда

$$f_2 = \frac{F_2 d}{F_2 - d} = \frac{F_2 \frac{r_0}{\sqrt{3}}}{F_2 - \frac{r_0}{\sqrt{3}}} = 14{,}3 \text{ см}.$$

Из вычислений и из построения изображений ясно, что точка пересечения лучей в первом случае станет ближе к экрану, во втором — дальше от экрана.

Задачи для самостоятельного решения

1. С помощью линзы на вертикальном экране получено действительное изображение электрической лампочки. Как изменится изображение, если закрыть верхнюю половину линзы?

2. Фотоаппарат даёт на плёнке изображение человеческого лица. Поясните с помощью чертежа, почему изображение леса, виднеющегося вдали за человеком, получается нерезким. В какую сторону следует сместить объектив, чтобы лес был изображён чётко? Будет ли при этом чётким изображение лица?

3. Постройте изображение предмета, помещённого перед собирающей линзой, в следующих случаях: 1) $d > 2F$; 2) $d = 2F$; 3) $F < d < 2F$; 4) $d < F$.

4. На рисунке 7.47 линия ABC изображает ход луча через тонкую рассеивающую линзу. Определите построением положения главных фокусов линзы.

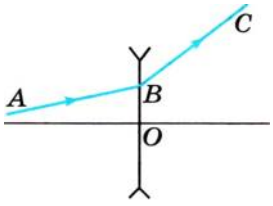


Рис. 7.47

5. От предмета высотой 1 см получили с помощью линзы действительное изображение высотой 6 см. Когда предмет передвинули на 6 см, то получили мнимое изображение высотой 3 см. Определите фокусное расстояние линзы.

6. На оптической оси линзы с фокусным расстоянием 20 см помещена светящаяся точка на расстоянии 30 см от линзы. По другую сторону от линзы в её фокальной плоскости находится экран. Определите диаметр пятна на экране, если диаметр линзы 3 см.

7. Два одинаковых предмета, находящиеся по одну сторону линзы на расстоянии 60 см друг от друга, изображаются линзой с увеличением 2 и 4 соответственно. Определите расстояние между изображениями предметов.

8. Собирающая линза с фокусным расстоянием 20 см находится на расстоянии 10 см от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 60 см. Определите, на каком расстоянии от второй линзы получается изображение точки S, если сама светящаяся точка находится на расстоянии 30 см от первой линзы.

9. С какой выдержкой надо фотографировать бегуна, скорость которого 3 м/с, чтобы размытость изображения не превышала 0,1 мм? Фокусное расстояние объектива 15 см, расстояние от фотоаппарата до бегуна 10 м.

1. Небольшой груз, подвешенный на нити длиной 2,5 м, совершает гармонические колебания, при которых его максимальная скорость достигает 0,2 м/с. При помощи собирающей линзы с фокусным расстоянием 0,2 м изображение колеблющегося груза проецируется на экран, расположенный на расстоянии 0,5 м от линзы. Главная оптическая ось линзы перпендикулярна плоскости колебаний маятника и плоскости экрана. Определите максимальное смещение изображения груза на экране от положения равновесия.

2. На оси OX в точке $x_1 = 10$ см находится тонкая рассеивающая линза с фокусным расстоянием $F_1 = -10$ см, а в точке $x_2 = 25$ см — тонкая собирающая линза. Главные оптические оси обеих линз совпадают с осью OX. Свет от точечного источника, расположенного в точке $x = 0$, пройдя данную оптическую систему, распространяется параллельным пучком. Определите фокусное расстояние F_2 собирающей линзы.

3. На оси OX в точке $x_1 = 0$ находится оптический центр тонкой рассеивающей линзы с фокусным расстоянием $F_1 = -20$ см, а в точке $x_2 = 20$ см — тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием $F_2 = 20$ см. Главные оптические оси обеих линз лежат на оси OX. На рассеивающую линзу по оси OX падает параллельный пучок света из области $x < 0$. Определите координату x точки, в которой соберётся этот пучок, пройдя данную оптическую систему.

§ 53 ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Какие представления о свете были у учёных в начале XIX в.?
Что определяет цвет предмета?

Интересно

На Востоке изготавливали украшения в виде стеклянных призм, дающих разноцветные блики.
Декарт наблюдал искусственную радугу на водяной пыли от фонтана.

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и проистекающие отсюда особенности цветов, которых до того времени никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Радужную окраску изображения, получаемого с помощью линзы, наблюдали, конечно, и до него.

Было замечено также, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.

Опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемнённую комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлинённое изображение с радужным чередованием цветов. Стилизованное изображение опыта Ньютона показано на рисунке 7.48. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал *спектром*.

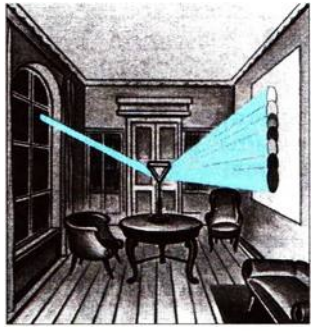


Рис. 7.48

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом — синее пятно и т. д. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части (см. рис. I на цветной вклейке). Белый свет имеет сложный состав. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повёрнутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет (см. рис. II на цветной вклейке). Выделив какую-либо часть спектра, например зелёную, и заставив свет пройти ещё через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

Возьмите линзу и внимательно посмотрите на её края. В каком положении лучше видно, что её края окрашены?

Другой важный вывод, к которому пришёл Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал *дисперсией*.

Интересно Слово «дисперсия» происходит от латинского слова *dispersio* — рассеяние.

Показатель преломления зависит и от скорости света в веществе (см. § 47). Абсолютный показатель преломления $n = \frac{c}{v}$. Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового света наименьшая.

Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Рёмер, казался бы красным в момент выхода спутника из тени. Но этого не наблюдается.

Начертите лучи, падающие под углом к поверхности прозрачного тела. Покажите, как будут располагаться согласно принципу Гюйгенса фронты волн красного и фиолетового цветов.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физической характеристики световой волны: её частоты колебаний ν (или длины волны λ). Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришёл Ньютон.

Запомни **Дисперсией** называется зависимость показателя преломления среды от частоты световой волны.

Длины волн видимой части спектра лежат в интервале примерно от 400 до 760 нм. Одному цвету также соответствует определённый диапазон длин волн (рис. 7.49).

Зная, что белый свет имеет сложный состав, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаём при этом

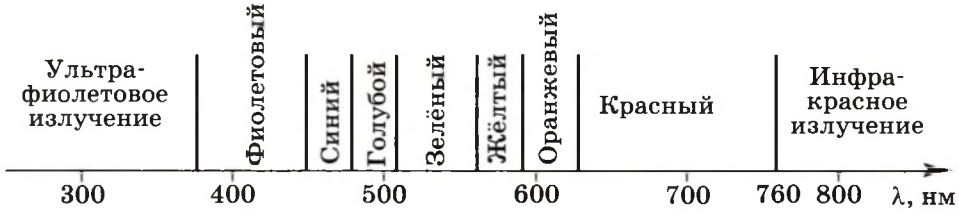


Рис. 7.49

свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелёными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зелёные, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее только красные лучи, то она будет казаться почти чёрной.

Дисперсия. Спектр видимого света Найти

1. На тетради написано красным карандашом «отлично» и зелёным — «хорошо». Имеется два стекла — зелёное и красное. Через какое стекло надо смотреть, чтобы увидеть слово «отлично»?
2. Почему только узкий световой пучок даёт спектр после прохождения сквозь призму, а у широкого пучка окрашенными оказываются лишь края?
3. Что такое дисперсия света?

1. Верно(-ы) утверждение(-я)
Дисперсией света объясняется физическое явление
А: фиолетовый цвет мыльной плёнки, освещаемой белым светом
Б: фиолетовый цвет абажура настольной лампы, светящейся белым светом
В: проявление цветного спектра после прохождения белого света через стеклянную призму
1) только А и В 2) только Б и В 3) А 4) В

2. Разложение пучка солнечного света в спектр при прохождении его через призму объясняется тем, что свет состоит из набора электромагнитных волн разной длины, которые, попадая в призму,
1) движутся с разной скоростью
2) имеют одинаковую частоту
3) поглощаются в разной степени
4) имеют одинаковую длину волны

3. При попадании солнечного света на капли дождя образуется радуга. Это объясняется тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны, которые каплями по-разному
1) поглощаются 3) поляризуются
2) отражаются 4) преломляются

§ 54 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Дайте определение интерференции механических волн.
При каких условиях она возникает?
Исчезает ли энергия при интерференции волн, если есть интерференционные минимумы?

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину (чередование максимумов и минимумов освещённости экрана) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение ещё одной лампочки лишь увеличивает освещённость поверхности, но не создаёт чередования минимумов и максимумов освещённости.

Выясним, в чём причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

Условие когерентности световых волн. Причина отсутствия интерференционной картины в опыте с двумя лампочками в том, что световые волны, излучаемые независимыми источниками, не согласованы друг с другом. Разность фаз колебаний, вызванных этими волнами, непрерывно изменяется во времени. Для получения же устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы в данной точке пространства разность фаз оставалась постоянной, т. е. чтобы колебания были *когерентны*. Как вы уже знаете, волны, возбуждающие в пространстве когерентные колебания, называются *когерентными волнами*.



От значения разности фаз зависит амплитуда колебаний, вызванных когерентными волнами. Длины когерентных волн также должны быть равны. Точного равенства длин волн от двух источников добиться нетрудно. Для этого достаточно использовать хорошие светофильтры, пропускающие свет в очень узком интервале длин волн. Но невозможно осуществить постоянство разности фаз от двух независимых источников. Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными «обрывками» (*цугами*) синусоидальных волн, имеющими обычно длину около метра. И такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. Моменты излучения атомов согласовать невозможно. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотично меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты относительно друг друга по фазе. Волны от различных источников света *некогерентны* из-за того, что разность фаз волн не остаётся постоянной (исключение составляют квантовые источники света — лазеры, созданные в 1960 г.). Никакой устойчивой картины с определённым распределением максимумов и минимумов освещённости в пространстве наблюдаться не будет.



Подумайте, о каких колебаниях в случае световых волн мы говорим.

Интерференция в тонких плёнках. Тем не менее интерференцию света удаётся наблюдать. Хотя её и наблюдали очень давно, но только никак не объясняли.

Вы тоже много раз видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов тонкой плёнки бензина на поверхности воды.

Окраску тонких плёнок можно объяснить согласно идее Томаса Ю н г а сложением волн *1* и *2* (рис. 7.50), одна из которых (*1*) отражается от наружной поверхности плёнки, а другая (*2*) — от внутренней. При этом происходит *интерференция световых волн* — сложение двух волн, вследствие которого наблюдается устойчивая во времени картина усиления или ослабления результирующих световых колебаний в различных точках пространства. Результат интерференции (усиление или ослабление результирующих колебаний) зависит от угла падения света на плёнку, её толщины и длины волны света.



Т. Юнг
(1773—1829)

Интересно

Открыл интерференцию света (ввёл в физику термин «интерференция»), дал объяснение этому явлению и первым измерил длину световой волны английский учёный Томас Ю н г.

Важно

Усиление света произойдёт в том случае, если преломлённая волна *2* отстанет от отражённой волны *1* на целое число длин волн.

Если же вторая волна отстанет от первой на половину длины волны или на нечётное число полуволн, то произойдёт ослабление света.

Цуг волн от каждого излучающего атома разделяется плёнкой на два цуга, а затем эти части сводятся вместе и интерферируют.

Вспомните условия наблюдения максимумов и минимумов при интерференции механических волн.

Важно

Когерентность волн, отражённых от наружной и внутренней поверхностей плёнки, возникает из-за того, что они являются частями одного и того же светового пучка.

Юнг понял также, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн). Световым пучкам различного цвета соответствуют волны с разной длиной волны λ. Для взаимного усиления

Интересно

«Мыльный пузырь, витая в воздухе... зажигается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы» (Марк Твен).

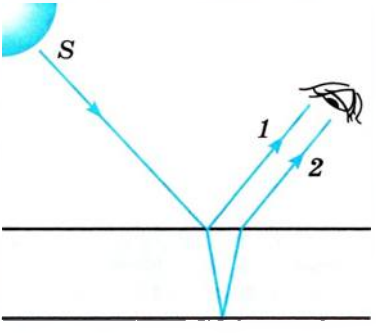


Рис. 7.50

волн, отличающихся друг от друга длиной волны (углы падения предполагаются одинаковыми), требуется различная толщина плёнки. Следовательно, если плёнка имеет неодинаковую толщину, то при освещении её белым светом должны появиться различные цвета.

Кольца Ньютона.

Запомни Интерференционная картина, возникающая в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и лежащей на ней плоско-выпуклой линзой, сферическая поверхность которой имеет большой радиус кривизны, получила название **колец Ньютона.**

Интересно Монохроматическое излучение — это излучение волн одной частоты.

Ньютон наблюдал и исследовал их не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (монохроматическим) пучком.

Оказалось, что радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному; красные кольца имеют максимальный радиус. Расстояния между соседними кольцами уменьшаются с увеличением их радиусов (см. рис. III, *2*, *3* на цветной вклейке).

Удовлетворительно объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог. Удалось это Юнгу. Проследим за ходом его рассуждений. В их основе лежит предположение о том, что свет — это волны. Рассмотрим случай, когда волна определённой длины волны падает почти перпендикулярно на плоско-выпуклую линзу (рис. 7.51). Волна *1* появляется в результате отражения от выпуклой поверхности линзы на границе двух сред стекло—воздух, а волна *2* — в результате отражения от пластины на границе двух сред воздух—стекло. Эти волны когерентны: они имеют одинаковую длину волны и постоянную разность фаз, которая возникает из-за того, что волна *2* проходит больший путь, чем волна *1*.

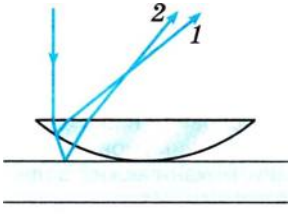


Рис. 7.51

Подумайте, как можно объяснить появление в центре тёмного пятна. Ведь разность хода отражённых волн равна нулю.

Отметим, что при отражении света от оптически более плотной среды фаза колебаний вектора напряжённости $\vec{E}$ электромагнитной волны изменяется на π. Это изменение можно учесть, вычтя (или прибавив) из разности хода половину длины волны. Говорят, что при таком отражении происходит потеря половины длины волны.

Важно Если вторая волна отстаёт от первой на целое число длин волн, то, складываясь, волны усиливают друг друга.

Напротив, если вторая волна отстаёт от первой на нечётное число полуволн, то колебания, вызванные ими, будут происходить в противоположных фазах и волны погасят друг друга.

Если известен радиус кривизны R выпуклой поверхности линзы, то можно вычислить, на каких расстояниях от точки соприкосновения линзы со стеклянной пластиной разности хода таковы, что волны определённой длины волны λ гасят друг друга. Эти расстояния и являются радиусами тёмных колец Ньютона. Ведь линии постоянной толщины воздушной прослойки представляют собой окружности. Измерив радиусы колец, можно вычислить длины волн.

Возьмите плоско-выпуклую линзу с малой кривизной сферической поверхности и положите её выпуклостью вниз на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая плоскую поверхность линзы (лучше через лупу), найдите в месте соприкосновения линзы и пластины тёмное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец (см. рис. III, *1* на цветной вклейке). Это и есть кольца Ньютона.

Длина световой волны. В результате измерений было установлено, что для красного света $\lambda_{кр} = 7{,}6 \cdot 10^{-7}$ м, а для фиолетового — $\lambda_{ф} = 3{,}8 \cdot 10^{-7}$ м. Длины волн, соответствующие другим цветам спектра, принимают промежуточные значения. Для любого цвета длина световой волны очень мала. Поясним это на простом примере. Представьте себе среднюю морскую волну длиной волны в несколько метров, которая увеличилась настолько, что заняла весь Атлантический океан от берегов Америки до Европы. Длина световой волны, увеличенной в той же пропорции, лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

Важно

Явление интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны. Подобно тому как высота звука определяется его частотой, цвет света определяется частотой колебаний или длиной волны.

В природе нет никаких красок, есть лишь волны разных длин волн. Глаз — сложный физический прибор, способный обнаруживать различие в цвете, которому соответствует весьма незначительная (около 10^{-6} см) разница в длинах световых волн.

Интересно

Большинство животных не способны различать цвета. Они всегда видят чёрно-белую картину. Не различают цвета также дальтоники — люди, страдающие цветовой слепотой.

При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно увидеть. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления n воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшатся.

Кольца Ньютона относят к интерференционным картинам, называемым «полосы равной толщины». Подумайте, как будет выглядеть интерференционная картина, если её наблюдать в воздушном зазоре, образованном между двумя плоскими пластинами, расположенными под небольшим углом друг к другу.

Почему это происходит? Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-нибудь среду скорость света уменьшается в n раз. Частота волны при переходе не изменяется, а так как $v = \lambda\nu$, то изменяется в n раз длина волны.

Интерференция света. Кольца Ньютона. Томас Юнг

Найти

1. Как получают когерентные световые волны?
2. В чём состоит явление интерференции света?
3. С какой физической характеристикой световых волн связано различие в цвете?
4. После удара камнем по прозрачному льду возникают трещины, переливающиеся всеми цветами радуги. Почему?
5. Длина волны света в воде уменьшается в n раз (n — показатель преломления воды относительно воздуха). Означает ли это, что ныряльщик под водой не может видеть окружающие предметы в естественном свете?
6. Человеческий глаз может фиксировать изменение интенсивности излучения с частотой не более 20 Гц. По цепи лампы накаливания идёт переменный ток. Почему мы видим постоянное, а не пульсирующее излучение лампы?

1. Явление интерференции присуще
1) только видимому свету
2) только радиоволнам
3) только звуковым волнам
4) как электромагнитным, так и механическим волнам

2. Световые волны когерентны, если у них
1) совпадают амплитуды
2) совпадают частоты
3) сдвиг фаз не зависит от времени
4) совпадают частоты и сдвиг фаз не зависит от времени

3. Интерференцию света с помощью лазерной указки показать легче, чем с помощью обычного источника, так как пучок света, даваемый лазером,
1) мощнее
2) когерентный
3) расходящийся
4) ярче

4. Два точечных источника света находятся близко друг от друга и создают на удалённом экране устойчивую интерференционную картину. Это возможно, если эти два источника являются
1) двумя лампами накаливания
2) двумя солнечными зайчиками от разных зеркал
3) малыми отверстиями в непрозрачном экране, освещёнными светом одного и того же точечного источника
4) малыми отверстиями в непрозрачном экране, освещёнными светом двух точечных источников разных цветов

§ 55 НЕКОТОРЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

При каких условиях интерференционная картина может измениться? исказиться? Почему для появления цветной интерференционной картины необходима неодинаковая толщина плёнки?

Области применения интерференции очень важны и обширны. Существуют специальные приборы — интерферометры, принцип действия которых основан на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: точное измерение длин световых волн, показателя преломления газов и других веществ. Имеются интерферометры специального назначения.

Мы остановимся на двух случаях применения интерференции.

Проверка качества обработки поверхностей. С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до 1/10 длины волны, т. е. с точностью до 10^{-6} см. Для этого нужно создать тонкую клиновидную прослойку воздуха между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластиной. Тогда неровности поверхности размером до 10^{-6} см вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней поверхности эталонной пластины.

Просветление оптики. Объективы фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и различные другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стёкол — линз, призм и др. Проходя через такие устройства, свет отражается от многих поверхностей.

Интересно

Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10, а в перископах подводных лодок доходит до 40.

При падении света перпендикулярно поверхности доля отражённой от неё энергии составляет 5—9 % всей энергии. Поэтому сквозь прибор часто проходит всего 10—20 % поступающего в него света. В результате этого освещённость изображения получается слабой. Кроме того, ухудшается качество изображения. Часть светового пучка после многократного отражения от внутренних поверхностей всё же проходит через оптический прибор, но рассеивается и уже не участвует в создании чёткого изображения. На фотографических изображениях по этой причине образуется «вуаль». Для устранения этих неприятных последствий отражения света от поверхностей оптических стёкол надо уменьшить долю отражаемой энергии света. Получаемое с помощью прибора изображение становится при этом ярче, просветляется. Отсюда и происходит термин *просветление оптики.*

Просветление оптики основано на явлении интерференции. На поверхность оптического стекла, например линзы, наносят тонкую плёнку с показателем преломления $n_п$, меньшим показателя преломления стекла $n_с$. Для простоты рассмотрим случай нормального падения света на плёнку.

Для упрощения понимания на рисунке 7.52 показан ход луча, падающего на поверхность раздела под небольшим углом α, однако все вычисления делаем для $\alpha = 0$.

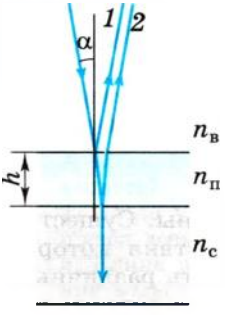


Рис. 7.52

Разность хода световых волн *1* и *2* (см. рис. 7.52), отражённых от верхней и нижней поверхностей плёнки, равна удвоенной толщине плёнки $2h$. Длина волны $\lambda_п$ в плёнке меньше длины волны λ в вакууме в $n_п$ раз:

$$\lambda_п = \frac{\lambda}{n_п}.$$

Для того чтобы волны *1* и *2* ослабляли друг друга, разность хода должна быть равна половине длины волны в плёнке:

$$2h = \frac{\lambda_п}{2} = \frac{\lambda}{2n_п}. \qquad (7.16)$$

Если амплитуды обеих отражённых волн одинаковы или очень близки друг к другу, то гашение света будет полным. Чтобы добиться этого, подбирают соответствующим образом показатель преломления плёнки, так как интенсивность отражённого света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

На линзу при обычных условиях падает белый свет. Выражение (7.16) показывает, что требуемая толщина плёнки зависит от длины волны. Поэтому осуществить гашение отражённых волн всех частот невозможно. Толщину плёнки подбирают так, чтобы добиться полного гашения при нормальном падении для длин волн средней части спектра (зелёный цвет, $\lambda_з \approx 5{,}5 \cdot 10^{-5}$ см). Она должна быть равна четверти длины волны в плёнке:

$$h = \frac{\lambda_з}{4n_п}.$$

Отражение света для крайних участков спектра — красного и фиолетового — будет несколько меньшим. Поэтому объектив с просветлённой оптикой в отражённом свете имеет сиреневый оттенок. Сейчас даже простые дешёвые фотоаппараты снабжены просветлённой оптикой.

На явлении интерференции основано также изготовление так называемых холодных зеркал. В этом случае необходимо, чтобы от зеркала отражалось как можно больше световой энергии, а волны инфракрасного диапазона проходили через зеркало. Для этого используются диэлектрические плёнки с разными показателями преломления. Толщина плёнки подбирается таким образом, чтобы проходящая через плёнку волна и волна, испытавшая отражение от двух поверхностей плёнки, накладываясь, компенсировали друг друга.

Отсутствие света в областях интерференционных минимумов не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, отсутствие света в данной области пространства означает, что происходит перераспределение энергии, отражённых волн нет и весь свет проходит сквозь объектив.

§ 56 ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Вспомните явление дифракции механических волн.
Какое условие необходимо для наблюдения дифракции?

Если свет — это волна, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и *дифракция* света. Ведь дифракция — огибание волнами краёв препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала ($\sim 10^{-7}$ м).

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь бóльшие размеры, чем размеры пучка.

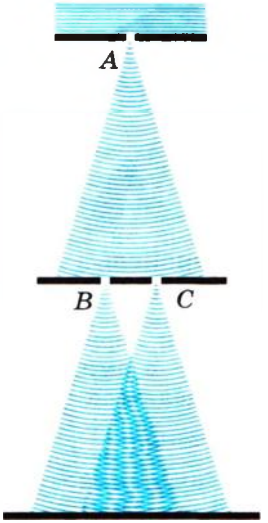


Рис. 7.53

Опыт Юнга. В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 7.53). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия B и C на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие A в другой ширме. Именно эта деталь (наличие двух отверстий), до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия A возбуждала в отверстиях B и C когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий B и C выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и тёмные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причём весьма точно.

Обсудите детально с одноклассниками опыт Юнга. Где мы наблюдаем дифракцию, а где — интерференцию?

Теория Френеля. Исследование дифракции было завершено в работах Огюстена Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и разработал на основе принципа Гюйгенса количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля

Важно каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причём все вторичные источники когерентны (*принцип Гюйгенса—Френеля*).



О. Френель (1788—1827)

Применим принцип Гюйгенса—Френеля для определения амплитуды колебаний в точке B, возбуждённых источником S (рис. 7.54). Считаем, что в момент времени t фронт волны имеет радиус R. Проведём из точки B сферические поверхности радиусами $b + \lambda/2$, $b + 2\lambda/2$, $b + 3\lambda/2$ и т. д. Весь фронт волны таким образом будет разделён на кольцевые зоны *1*, *2*, *3* и т. д., называемые *зонами Френеля*. При этом колебания, вызываемые вторичными источниками, находящимися в двух соответствующих точках соседних зон (например, в точках M_4 и M_5), происходят в противофазе и частично гасят друг друга.

Если первая зона вызывает в точке B колебания с амплитудой A_1, вторая — с амплитудой A_2 и т. д., то амплитуда колебаний в точке B будет определяться формулой

$$A_B = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \ldots . \qquad (7.17)$$

Так как $A_1 > A_2 > A_3 > \ldots$, то можно показать, что амплитуда колебаний, вызванных в точке B i-й зоной, равна:

$$A_i = \frac{A_{i-1} + A_{i+1}}{2}. \qquad (7.18)$$

Перепишем выражение (7.17) в виде

$$A_B = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + \ldots = \frac{A_1}{2},$$

так как согласно формуле (7.18) все выражения в скобках равны нулю.

Интересно Любопытный случай произошёл на заседании Французской академии наук в 1818 г. С. Пуассон, присутствовавший на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу, а именно: за маленьким непрозрачным диском всегда должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление учёных, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле! Светлое пятно в центре дифракционной картины от круглого диска называют *пятном Пуассона*.

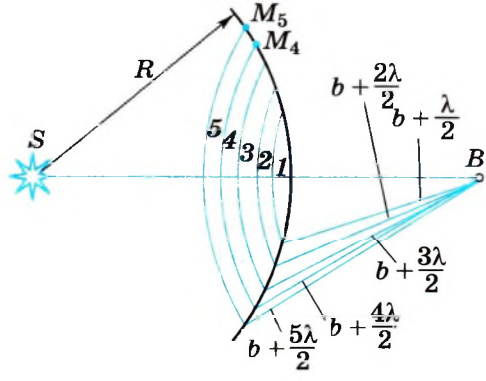


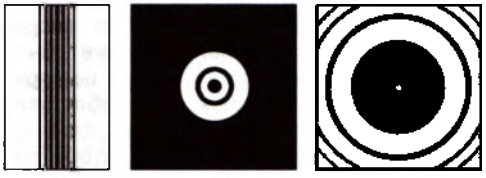
Рис. 7.54

Мы получили, что амплитуду колебаний и соответственно освещённость в точке B определяет половина первой зоны, размеры которой порядка долей миллиметра. Следовательно, свет распространяется от точки S к точке B практически прямолинейно.

Подумайте, почему уменьшается амплитуда колебаний, возбуждаемых в точке B каждой последующей зоной (при увеличении номера зоны Френеля), несмотря на то, что площади зон равны.

Дифракционные картины от различных препятствий. Расчёты, сделанные Френелем, полностью были подтверждены экспериментом. Из-за того что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчётливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо не располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размерами в несколько сантиметров и даже метров.

На рисунке 7.55, *а*—*в* схематично показаны дифракционные картины от различных препятствий: *а* — от тонкой проволочки; *б* — от круглого отверстия; *в* — от круглого экрана.



а) б) в)

Рис. 7.55

Вместо тени от проволочки видны светлые и тёмные полосы. В центре дифракционной картины от отверстия появляется тёмное пятно, окружённое светлыми и тёмными кольцами (изменяя диаметр отверстия, можно в центре дифракционной картины получить и светлое пятно, окружённое тёмными и светлыми кольцами). В центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена тёмными концентрическими кольцами.

Дифракция. Принцип Гюйгенса—Френеля Найти

1. Какое явление называется дифракцией?
2. Почему дифракцию механических волн наблюдать легче, чем дифракцию света?

§ 57 ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Как определяют границы применимости физической теории?

Все физические теории отражают происходящие в природе процессы лишь приближённо. Для любой теории могут быть указаны определённые границы её применимости. Можно ли применять в конкретном случае данную теорию или нет, зависит не только от той точности, которую обеспечивает эта теория, но и от того, какая точность требуется при решении той или иной практической задачи. Границы применимости теории можно установить лишь после того, как разработана более общая теория, охватывающая те же явления.

Все эти общие положения относятся и к геометрической оптике. Эта теория является приближённой. Она неспособна объяснить, например, явления интерференции и дифракции света. Более общей и более точной теорией является волновая оптика. Согласно ей закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света *много больше длины световой волны*. Но совершенно точно они не выполняются никогда.

Интересно «...Успехи волнового принципа показывают, что выбор между той или другой теорией не может быть безразличен. Полезность теории не ограничивается только тем, что облегчает изучение фактов... цель всякой хорошей теории должна состоять в том, чтобы содействовать прогрессу науки открытием связующих фактов...» О. Френель.

Принцип действия оптических приборов описывается законами геометрической оптики. Согласно этим законам можно различать с помощью микроскопа сколь угодно малые детали объекта; с помощью телескопа можно установить существование двух звёзд при любых малых угловых расстояниях между ними. Однако в действительности это не так, и лишь волновая теория света позволяет разобраться в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

Разрешающая способность микроскопа и телескопа.

Запомни Способность оптического прибора различать детали рассматриваемого объекта называют **разрешающей способностью** прибора.

Волновая природа света налагает предел на возможность различать детали предмета или очень мелкие предметы при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчётливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения получаются размытыми.

Минимальное линейное расстояние между точками предмета или двумя предметами, которые можно различить с помощью микроскопа, $l \approx \dfrac{\lambda}{2(n-1)}$, где n — показатель преломления материала, из которого изготовлена линза

объектива. Учитывая, что среднее значение показателя преломления стекла $n \approx 1{,}5$, получаем $l \approx \lambda$. Следовательно,

Важно невозможно разрешить две детали объекта, размеры которых меньше длины световой волны.

Применение ультрафиолетового излучения позволяет повысить разрешающую способность линз. Использование же электронного микроскопа даёт возможность получать разрешение, во много раз превышающее разрешение оптического микроскопа.

Дифракция также налагает предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и тёмных колец. Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга, и глаз не может различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние (предел разрешения оптического прибора) между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива:

$$\Theta = \frac{1{,}22\lambda}{D},$$

где Θ — угол, под которым из центра линзы наблюдаются два точечных объекта.

Таким образом, для уменьшения углового расстояния, которое разрешается телескопом, необходимы объективы возможно большего диаметра.

Эти примеры показывают, что с дифракцией приходится считаться всегда, при любых препятствиях. Ею при очень тщательных наблюдениях нельзя пренебрегать и в случае препятствий, размеры которых значительно больше, чем длина волны.

Важно Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики.

Границы применимости геометрической оптики — Найти

1. Почему с помощью микроскопа нельзя увидеть атом?
2. В каких случаях приближённо справедливы законы геометрической оптики?

§ 58 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

Как получают когерентные источники света?
Почему существует предел в наблюдении деталей предметов?

На явлении дифракции основано устройство оптического прибора — *дифракционной решётки*.

Запомни **Дифракционная решётка** представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделённых непрозрачными промежутками (рис. 7.56).

Запомни Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна a и ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна b, то величина $d = a + b$ называется **периодом решётки.**

Обычно период дифракционной решётки порядка 10 мкм.

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решётки. Пусть на решётку (рис. 7.57) падает плоская монохроматическая волна длиной волны λ. Так как период дифракционной решётки мал, то волна будет огибать непрозрачные промежутки. Согласно принципу Гюйгенса вторичные источники, расположенные в щелях, когерентны и создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдём условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим, например, волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ. Разность



Рис. 7.56

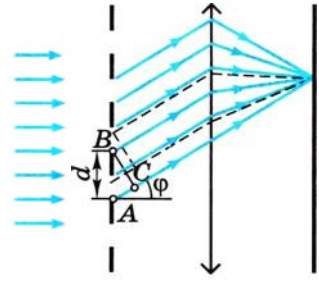


Рис. 7.57

Интересно Решётку изготовляют с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянную пластину параллельные штрихи. Число штрихов достигает нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов превышает 100 000. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решётки, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Отражательные решётки представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносят резцом на отшлифованную металлическую пластину.

хода волн от краёв соседних щелей равна длине отрезка AC. Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, распространяющиеся под углом φ, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC можно найти длину катета AC: $AC = AB \sin\varphi = d \sin\varphi$.

Важно

Максимумы будут наблюдаться под углом φ в соответствии с условием

$$d \sin\varphi = \pm k\lambda, \qquad (7.19)$$

где величина $k = 0, 1, 2, \ldots$ определяет порядок спектра.

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия (см. формулу (7.19)) усиливают друг друга не только волны, идущие от нижних (см. рис. 7.57) краёв щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели, находящаяся на расстоянии d от первой точки. Поэтому разность хода испущенных этими точками вторичных волн равна $k\lambda$, и эти волны взаимно усиливаются.

Подумайте, будет ли наблюдаться дифракционная картина, если не помещать за решёткой линзу.

За решёткой помещают собирающую линзу и за ней — экран на фокусном расстоянии от линзы. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление.

Запомни

Углы φ, удовлетворяющие условию (7.19), определяют положение так называемых **главных максимумов** на экране.

Наряду с картиной, получаемой в результате дифракции света, в случае дифракционной решётки наблюдается дифракционная картина и от отдельных щелей. Интенсивность максимумов в ней меньше интенсивности главных максимумов.

Важно

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k = 0$) зависит от длины волны, то решётка разлагает белый свет в спектр. Чем больше λ, тем дальше от центрального максимума располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны (см. рис. IV на цветной вклейке).

Каждому значению k соответствует свой порядок спектра.

Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены. Световая энергия, падающая на решётку, перераспределяется ею так, что бóльшая её часть приходится на максимумы, а в область минимумов попадает незначительная часть энергии.

С помощью дифракционной решётки можно проводить очень точные измерения длины волны. Если период решётки известен, то

Как будет выглядеть дифракционная картина в монохроматическом свете?

Интересно Лазерный диск с бороздками, проходящими близко друг от друга, подобен отражательной дифракционной решётке. Если вы посмотрите на отражённый им свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр. Можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям k. Картина будет очень чёткой, если свет от лампочки падает на пластинку под большим углом.

определение длины волны сводится к измерению угла φ, соответствующего направлению на максимум.

Мы можем наблюдать дифракционную картину достаточно просто. Так, если прищуриться, смотря на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Наши ресницы вместе с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решётку.

Дифракционная решётка. Дифракционный спектр

Найти

1. Зависит ли положение максимумов освещённости, создаваемых дифракционной решёткой, от числа щелей?
2. Что вы увидите, посмотрев на электрическую лампочку сквозь птичье перо?
3. Чем различаются спектры, получаемые с помощью призмы, от дифракционных спектров?

1. Дифракционная решётка с периодом d освещается нормально падающим световым пучком с длиной волны λ. Какое из приведённых ниже выражений определяет угол α, под которым наблюдается второй главный максимум?
1) $\sin\alpha = 2\lambda/d$ 3) $\cos\alpha = 2\lambda/d$
2) $\sin\alpha = d/2\lambda$ 4) $\cos\alpha = d/2\lambda$

2. Луч лазера направляется перпендикулярно плоскости дифракционной решётки. Расстояние между нулевым и первым дифракционными максимумами на удалённом (расстояние до экрана $L >> 10$ см) экране равно 10 см. Расстояние между дифракционными максимумами первого порядка примерно равно
1) 5 см 2) 10 см 3) 20 см 4) 40 см

3. На дифракционную решётку с периодом 0,0066 мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Длина волны 550 нм. Какое максимальное количество дифракционных максимумов можно наблюдать с помощью этой решётки для данной световой волны?
1) 11 2) 24 3) 3 4) 22

4. На дифракционную решётку с периодом 0,004 мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Количество дифракционных максимумов, наблюдаемых с помощью этой решётки, равно 19. Чему равна длина волны света?
1) 640 нм 2) 560 нм 3) 440 нм 4) 580 нм

§ 59 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА»

При решении задач надо выбрать когерентные волны, определить оптическую разность хода и записать условия наблюдения максимумов и минимумов интенсивности света.

Задача 1. В опыте Юнга по дифракции световых волн расстояние между щелями $d = 0{,}07$ мм, а расстояние от двойной щели до экрана $D = 2$ м. При освещении прибора зелёным светом расстояние между соседними светлыми дифракционными полосами оказалось равным $\Delta h = 16$ мм. Определите длину волны.

Р е ш е н и е. В некоторой точке C экрана (рис. 7.58) будет наблюдаться максимум освещённости, если выполнено условие

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$ — целые числа.

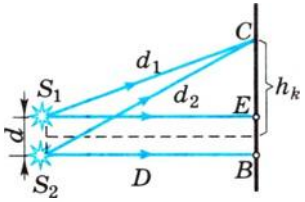


Рис. 7.58

Применим теорему Пифагора к треугольникам S_1CE и S_2CB:

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2, \qquad d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Вычитая почленно из первого равенства второе, получаем $d_2^2 - d_1^2 = 2h_kd$, или $(d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_kd$.

Так как $d << D$, то $d_1 + d_2 \approx 2D$. Следовательно, $d_2 - d_1 \approx \frac{h_kd}{D}$.

Учитывая, что $d_2 - d_1 = k\lambda$, можем записать: $k\lambda \approx \frac{h_kd}{D}$.

Отсюда находим расстояние k-й светлой полосы от центра экрана: $h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}$. Расстояние между соседними полосами равно: $\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \approx \frac{\lambda D}{d}$. Отсюда $\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D} \approx 5{,}6 \cdot 10^{-5}$ см.

Задача 2. В некоторую точку пространства приходит излучение с оптической разностью хода волн $\Delta = 1{,}8$ мкм. Определите, будет ли наблюдаться интерференционный минимум или максимум в этой точке. Длина волны: 1) 600 нм; 2) 400 нм.

Р е ш е н и е. Максимум или минимум интерференционной картины зависит от числа полуволн, укладывающихся на разности хода. Для λ_1 и λ_2 получим

$$\frac{\Delta}{\lambda_1} = \frac{1{,}8 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-7}} = 3, \qquad \frac{\Delta}{\lambda_2} = \frac{1{,}8 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-7}} = 4{,}5,$$

т. е. для излучения с длиной волны 600 нм в этой точке будет наблюдаться интерференционный максимум, а для излучения с длиной волны 400 нм,

для которого разность хода равна нечётному числу длин полуволн, будет наблюдаться интерференционный минимум.

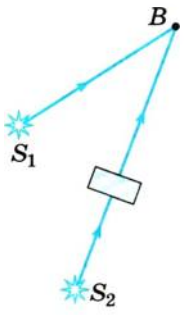


Рис. 7.59

Задача 3. Сместится ли интерференционный максимум, если на пути одного из лучей в опыте Юнга (рис. 7.59) поставить пластинку из стекла с показателем преломления $n = 1{,}4$ и толщиной $d = 1$ мм? Источник света монохроматический, длина волны $\lambda_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ м.

Р е ш е н и е. Длина волны в стекле $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$. На толщине пластинки укладывается число длин волн $N = \frac{d}{\lambda} = \frac{dn}{\lambda_0} = 3{,}5 \cdot 10^3$. N — целое число, следовательно, разность фаз колебаний, вызванных источниками S_1 и S_2, не изменится. Следовательно, в точке B останется интерференционный максимум.

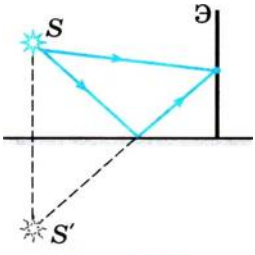


Рис. 7.60

Задача 4. Монохроматический источник света (зелёный, $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м) расположен над плоским зеркалом. Перпендикулярно зеркалу на расстоянии $l = 1$ м от источника находится экран, на котором на расстоянии $h_5 = 1$ мм от зеркала наблюдается пятый интерференционный максимум. Определите, на каком расстоянии от зеркала находится источник.

Р е ш е н и е. Интерференционная картина получается в результате наложения потока от источника S и потока, отражённого от зеркала (рис. 7.60). Источник S и его мнимое изображение S' можно рассматривать как два когерентных источника, расстояние между которыми равно d. Искомое расстояние $d_0 = \frac{d}{2}$. Согласно формуле (см. решение задачи 1) координату пятого максимума определим по формуле $h_5 = \frac{5\lambda l}{d}$, откуда $d = \frac{5\lambda l}{h_5}$. Следовательно, $d_0 = \frac{5}{2}\frac{\lambda l}{h_5} = 1{,}25 \cdot 10^{-3}$ м.

Задача 5. Рассчитайте радиус k-го тёмного кольца в установке для наблюдения колец Ньютона. Радиус линзы R, длина волны λ.

Р е ш е н и е. Интерференционная картина получается в результате наложения волн, отражённых от границы двух сред воздух—стекло. Волны *1* и *2* когерентны, разность фаз колебаний, вызванных этими волнами, определяется размером воздушного зазора (см. рис. 7.51). Если размер зазора таков, что вторая волна отстаёт от первой на целое число длин волн, то колебания, возбуждаемые волнами, будут усиливать друг друга (интерференционный максимум); если размер зазора таков, что вторая волна отстаёт от первой на нечётное число полуволн, то колебания, вызванные ими, гасят друг друга (интерференционный минимум). Соответственно в первом случае

мы наблюдаем светлое кольцо, во втором — тёмное. Каждое из колец соответствует одной и той же толщине воздушного зазора.

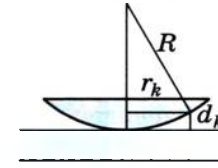


Рис. 7.61

Теперь рассчитаем радиус r_k k-го тёмного кольца (рис. 7.61). По теореме Пифагора запишем:

$R^2 = r_k^2 + (R - d_k)^2$, где d_k – толщина зазора.

Отсюда $2Rd_k = r_k^2 + d_k^2$.

По условию радиус кривизны линзы велик, тогда $d_k << R$ и $d_k << r_k$. Значение d_k^2 настолько мало, что им можно пренебречь. Тогда для d_k имеем

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R}. \qquad (1)$$

Вторая волна проходит на $2d_k$ больше, чем первая. Известно, что при отражении волны от оптически более плотной среды происходит изменение фазы колебаний волны на π, таким образом, при отражении второй волны от пластины происходит потеря половины длины волны. Следовательно, разность хода волн *1* и *2* равна $\Delta = 2d_k + \frac{\lambda}{2}$.

Условие минимума имеет вид $2d_k + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Отсюда определяем толщины воздушного зазора, соответствующие тёмным кольцам: $2d_k + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2}$, или

$$d_k = \frac{k\lambda}{2}. \qquad (2)$$

Приравнивая выражения (1) и (2), получаем $\frac{r_k^2}{2R} = \frac{k\lambda}{2}$. Радиусы тёмных колец определяются формулой $r_k = \sqrt{k\lambda R}$.

Из этой формулы следует, что в центре интерференционной картины будет всегда тёмное пятно. Это очевидно, так как разность хода волн в точке касания определяется половиной длины волны при отражении волны *2* (см. рис. 7.51, с. 208) от пластины — оптически более плотной среды. Кроме этого, ясно, что кольца будут тем лучше различимы, чем больше R, т. е. чем у́же воздушный зазор.

Задача 6. Определите углы, соответствующие дифракционным максимумам первого и второго порядков для зелёного света ($\lambda = 0{,}55$ мкм), если дифракционная решётка содержит 10^3 штрихов на 1 см.

Р е ш е н и е. Максимумы дифракционного спектра наблюдаются согласно формуле (7.19) под углами

$$d \sin \varphi_1 = \lambda, \qquad (1)$$

$$d \sin \varphi_2 = 2\lambda. \qquad (2)$$

Период дифракционной решётки равен $d = d_0/N$.

Подставив d в формулы (1) и (2), получим $\varphi_1 = 3{,}15°$, $\varphi_2 = 6{,}31°$.

Задача 7. Период дифракционной решётки 3 мкм. Определите наибольший порядок спектра для жёлтого света (длина волны 580 нм).

Р е ш е н и е. Запишем формулу для наблюдения максимумов спектра, полученного с помощью дифракционной решётки: $d \sin \varphi = k\lambda$.

Очевидно, что максимальный порядок спектра k_{max} достигается при максимальном значении $\sin \varphi$, т. е. при $\varphi \approx 90°$. Положим $\sin \varphi = 1$, тогда $d = k\lambda$, $k_{max} = d/\lambda < 6$, откуда $k_{max} = 5$.



Рис. 7.62

Задачи для самостоятельного решения

1. Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м. Источники находятся на расстоянии $d = 0{,}3$ см друг от друга. Экран расположен на расстоянии 9 м от источников. Что будет наблюдаться в точке A экрана (рис. 7.62): светлое пятно или тёмное?

2. На дифракционную решётку, имеющую период $d = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ см, падает по нормали монохроматическая волна. Оцените длину волны λ, если угол между спектрами второго и третьего порядков $\Delta\varphi = 2°30'$.

3. Две щели находятся на расстоянии 0,2 мм друг от друга и отстоят на расстоянии 1,5 м от экрана. На щели падает поток монохроматического света ($\lambda = 500$ нм) от удалённого источника. Определите расстояние между соседними интерференционными полосами.

4. Точка мыльного пузыря, ближайшая к наблюдателю, кажется ему зелёной ($\lambda = 540$ нм). Определите минимальную толщину мыльной плёнки. Показатель преломления мыльной плёнки $n = 1{,}35$.

5. Чему равна постоянная дифракционной решётки, если при её освещении монохроматическим светом длиной волны 500 нм лучи, отклоняющиеся на угол 15°, образуют максимум четвёртого порядка?

6. На дифракционную решётку, имеющую 100 штрихов на 1 мм, по нормали к ней падает белый свет. Определите ширину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 2 м. Видимым считайте свет в диапазоне 400—760 нм.

1. Какое число штрихов на 1 мм имеет дифракционная решётка, если зелёная линия ($\lambda = 550$ нм) в спектре первого порядка наблюдается под углом $\varphi = 19°$? Считайте, что $\sin 19° = 0{,}33$.

2. На дифракционную решётку, имеющую период $2 \cdot 10^{-5}$ м, падает нормально параллельный пучок белого света. Спектр наблюдается на экране на расстоянии 2 м от решётки. Чему равно расстояние между красным и фиолетовым участками спектра первого порядка (первой цветной полоски на экране), если длины волн красного и фиолетового света соответственно равны $8 \cdot 10^{-7}$ и $4 \cdot 10^{-7}$ м? Считайте $\sin\varphi = \operatorname{tg}\varphi$.

3. Дифракционная решётка, имеющая 400 штрихов на 1 мм, расположена параллельно экрану на расстоянии 1,5 м от него. На решётку перпендикулярно её плоскости направлен пучок света. Определите длину волны света, если расстояние на экране между вторыми максимумами слева и справа от центрального (нулевого) равно 60 см.

§ 60 ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Вспомните, как выглядит мгновенный снимок электромагнитной волны. Как направлены векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$ в электромагнитной волне?

Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн — продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам.

Однако постепенно накапливалось всё больше и больше экспериментальных фактов, которые никак не удавалось истолковать и согласно которым световые волны считали продольными.

Опыты с турмалином. Рассмотрим подробно один из таких экспериментов, очень простой и эффектный. Это опыт с кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зелёной окраски).

Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмём прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из её граней была параллельна оси кристалла. Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через неё, не вызовет (рис. 7.63). Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрёл зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Но это не так. Если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 7.64, *а*), параллельный первому, то при одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок ещё более ослабляется за счёт поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 7.64, *б*), то обнаружится удивительное явление — гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 7.64, *в*). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

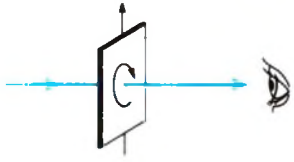


Рис. 7.63

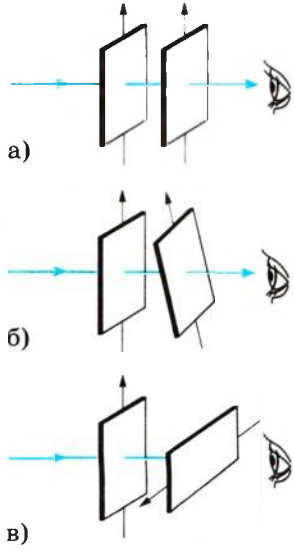


Рис. 7.64

Поперечность световых волн. Из описанных выше опытов следуют два вывода:

Важно

во-первых, световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность практически не меняется);

во-вторых, волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча интенсивность прошедшего света изменяется).

Интересно В XVIII в. световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и проникающем внутрь всех тел. Такие волны, казалось, не могли быть поперечными, так как поперечные волны, в соответствии с воззрениями того времени, могут существовать только в твёрдом теле.

Продольные волны обладают полной симметрией по отношению к направлению распространения (колебания происходят вдоль этого направления, и оно является осью симметрии волны). Поэтому объяснить опыт с вращением второй пластины, считая световую волну продольной, невозможно.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения. Первое предположение относится к самому свету.

Важно

Свет — поперечная волна.

В падающем от обычного источника пучке световых волн происходят колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн (рис. 7.65).

Вспомните, как происходит распространение продольных волн. Почему они симметричны по отношению к направлению распространения? Может ли быть нарушена эта симметрия при переходе в среду с другими свойствами?

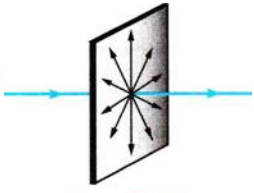


Рис. 7.65

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной.

Запомни

Световой поток, в котором колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн, называется **естественным светом**.

Интересно Волны на поверхности воды осевой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Это название оправданно, так как в обычных условиях источники света излучают такой поток. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла

турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, потому что падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

Второе предположение относится не к световой волне, а к кристаллу.

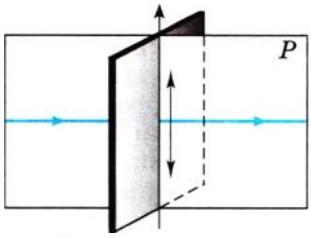


Рис. 7.66

Важно

Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, происходящими в одной определённой плоскости (плоскость P на рисунке 7.66).

Запомни

Свет, в котором колебания вектора $\vec{E}$ происходят только в одной определённой плоскости, называется **поляризованным** или, точнее, **плоскополяризованным** светом.

Как вы думаете, может ли произойти поворот вектора $\vec{E}$ независимо от поворота вектора $\vec{B}$?

Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещённых кристаллах (угол между их осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от 90°, то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Поляроиды. Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые поляроиды. Поляроид представляет собой тонкую (0,1 мм) плёнку кристаллов герапатита, нанесённую на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно провести те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно получать большие поверхности, поляризующие свет. К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттенок, который они придают белому свету.

Поперечность световых волн. Естественный и поляризованный свет — Найти

1. Доказательством поперечности световой волны служит явление
1) дифракции
2) интерференции
3) дисперсии
4) поляризации

2. Поляризация света доказывает, что свет — это
1) поток заряженных частиц
2) поток электронейтральных частиц
3) поперечная волна
4) продольная волна

* * *

Электромагнитная (волновая) теория света. Электромагнитная теория света берёт начало от работ Максвелла.

В основе электромагнитной теории света лежит факт совпадения скорости света со скоростью распространения электромагнитных волн.

Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны являются поперечными. К тому времени поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл обоснованно считал поперечность электромагнитных волн ещё одним важным доказательством справедливости электромагнитной теории света.

После того как Герц экспериментально получил электромагнитные волны и измерил их скорость, электромагнитная теория света была впервые экспериментально подтверждена. Было доказано, что электромагнитные волны при распространении проявляют те же свойства, что и световые: отражение, преломление, интерференцию, поляризацию и др. (см. § 39). В конце XIX в. было окончательно установлено, что световые волны возбуждаются движущимися в атомах заряженными частицами.

Электромагнитные процессы подчиняются не законам механики, а законам электромагнетизма. Эти законы и были установлены в окончательной форме Максвеллом.

Электромагнитные волны могут распространяться в вакууме, в отличие от механических волн, которые могут распространяться только в упругих средах.

Возникает естественный вопрос: если речь идёт о направлении колебаний в световой волне, то, собственно говоря, колебания какого вектора — $\vec{E}$ или $\vec{B}$ — имеются в виду? Специально поставленные опыты доказали, что на сетчатку глаза или фотоэмульсию действует электрическое поле световой волны. В связи с этим за направление колебаний в световой волне принято направление вектора напряжённости $\vec{E}$ электрического поля.

Открытие электромагнитной теории света — одно из немногих открытий, сделанных на кончике пера, т. е. теоретически.

Всеобщее признание электромагнитная теория получила, однако, лишь после своего экспериментального подтверждения.



Повторите материал главы 7 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.



«Создание экспериментальной установки для исследования явления интерференции света»

ГЛАВА 8 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

С развитием электродинамики изменились представления о пространстве и времени. Согласно классическим представлениям о пространстве и времени, считавшимся на протяжении веков незыблемыми, движение не оказывает никакого влияния на течение времени (время абсолютно), а линейные размеры любого тела не зависят от того, покоится тело или движется (длина абсолютна).

Специальная теория относительности Эйнштейна — это новое учение о пространстве и времени, расширяющее старые (классические) представления.

§ 61 ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Вспомните принцип относительности Галилея и определение инерциальных систем отсчёта.

Принцип относительности в механике и электродинамике. После того как во второй половине XIX в. Максвеллом были сформулированы основные законы электродинамики, возник вопрос: распространяется ли принцип относительности, справедливый для механических явлений, и на электромагнитные явления? Иными словами, протекают ли электромагнитные процессы (взаимодействие зарядов и токов, распространение электромагнитных волн и т. д.) одинаково во всех инерциальных системах отсчёта? Или, быть может, равномерное прямолинейное движение, не влияя на механические явления, оказывает некоторое воздействие на электромагнитные процессы?

Чтобы ответить на эти вопросы, нужно было выяснить, меняются ли основные законы электродинамики при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой, или же, подобно законам Ньютона, они остаются неизменными. Только в последнем случае можно отбросить сомнения в справедливости принципа относительности применительно к электромагнитным процессам и рассматривать этот принцип как общий закон природы.

Законы электродинамики сложны, и строгое решение этой задачи — нелёгкое дело. Однако уже простые соображения, казалось бы, позволяют найти правильный ответ. Согласно законам электродинамики скорость распространения электромагнитных волн в вакууме одинакова по всем направлениям и равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Но в соответствии с законом сложения скоростей механики Ньютона скорость может быть равна скорости света только в одной избранной системе отсчёта. В любой другой системе отсчёта, движущейся по отношению к этой избранной системе отсчёта со скоростью $\vec{v}$, скорость света должна

Докажите, что во всех инерциальных системах отсчёта второй закон Ньютона ($m\vec{a} = \vec{F}$) выглядит одинаково.

Приведите примеры, свидетельствующие о том, что в электродинамике принцип Галилея справедлив не всегда.

уже быть равна $\vec{c} - \vec{v}$. Это означает, что если справедлив обычный закон сложения скоростей, то при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой законы электродинамики должны меняться так, чтобы в этой новой системе отсчёта скорость света уже была равна не $\vec{c}$, а $\vec{c} - \vec{v}$.

Таким образом, обнаружились определённые противоречия между электродинамикой и механикой Ньютона, законы которой согласуются с принципом относительности. Возникшие трудности пытались преодолеть тремя различными способами.

Первый способ: объявить несостоятельным принцип относительности в применении к электромагнитным явлениям. Эту точку зрения разделял великий голландский физик, основатель электронной теории Х. Лоренц. Электромагнитные явления ещё со времён Фарадея рассматривались как процессы, происходящие в особой всепроникающей среде, заполняющей всё пространство, — мировом эфире. Инерциальная система отсчёта, покоящаяся относительно эфира, — это согласно Лоренцу особая, преимущественная (абсолютная) система отсчёта. В ней законы электродинамики Максвелла справедливы и наиболее просты по форме. Лишь в этой системе отсчёта скорость света в вакууме одинакова по всем направлениям.

Второй способ: считать неправильными уравнения Максвелла и пытаться изменить их таким образом, чтобы они при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой (в соответствии с обычными, классическими представлениями о пространстве и времени) не менялись. Такая попытка, в частности, была предпринята Г. Герцем. По Герцу, эфир полностью увлекается движущимися телами и поэтому электромагнитные явления протекают одинаково независимо от того, покоится тело или движется. Принцип относительности остаётся справедливым.

Имеет ли физический смысл второй из предлагаемых способов преодоления противоречий? Вспомните экспериментальные доказательства справедливости теории Максвелла.

Наконец, *третий способ*: отказаться от классических представлений о пространстве и времени, с тем чтобы сохранить как принцип относительности, так и законы Максвелла. Это наиболее революционный путь, ибо он означает, как мы увидим в дальнейшем, пересмотр в физике самых глубоких, основных представлений. С данной точки зрения оказываются неточными не уравнения электромагнитного поля, а законы механики Ньютона, согласующиеся со старыми представлениями о пространстве и времени. Изменять нужно законы механики, а не законы электродинамики Максвелла.



А. Эйнштейн (1879—1955)

Единственно правильным оказался именно третий способ. Последовательно развивая его, А. Эйнштейн пришёл к новым представлениям о пространстве и времени. Первые два пути, как оказалось, опровергаются экспериментом.

Точка зрения Лоренца, согласно которой должна существовать избранная система отсчёта, связанная с мировым эфиром, пребывающим в абсолютном покое, была опровергнута прямыми опытами.

Если бы скорость света была равна 300 000 км/с только в системе отсчёта, связанной с эфиром, то, измеряя скорость света в произвольной инерциальной системе отсчёта, можно было бы обнаружить движение этой системы отсчёта по отношению к эфиру и определить скорость этого движения. Подобно тому как в системе отсчёта, движущейся относительно воздуха, возникает ветер, при движении по отношению к эфиру (если, конечно, эфир существует) должен быть обнаружен «эфирный ветер». Опыт по обнаружению «эфирного ветра» был поставлен в 1881 г. американскими учёными А. Майкельсоном и Э. Морли по идее, высказанной за 12 лет до этого Максвеллом.



В этом опыте сравнивалась скорость света в направлении движения Земли и в перпендикулярном направлении. Измерения проводились очень точно с помощью специального прибора — интерферометра Майкельсона. Эксперименты ставились в разное время суток и различные времена года, интерферометр устанавливался под различными углами. Но всегда получался отрицательный результат: движения Земли по отношению к эфиру обнаружить не удалось.

Таким образом, идея о существовании преимущественной системы отсчёта не выдержала опытной проверки. В свою очередь, это означало, что никакой особой среды — «светоносного эфира», с которой можно было бы связать такую преимущественную систему отсчёта, не существует.

При попытках Герца изменить законы электродинамики Максвелла выяснилось, что новые уравнения неспособны объяснить ряд наблюдаемых фактов. Так, согласно теории Герца движущаяся вода должна полностью увлекать за собой распространяющийся в ней свет, так как она увлекает эфир, в котором свет распространяется. Опыт же показал, что в действительности это не так.

Важно Согласовать принцип относительности с электродинамикой Максвелла оказалось возможным, только отказавшись от классических представлений о пространстве и времени, согласно которым расстояния и течение времени не зависят от системы отсчёта.

Принцип относительности. Теория эфира. Опыт Майкельсона—Морли

Найти

1. Что такое мировой эфир? Какими свойствами он обладает?
2. Какие способы были предложены учёными для того, чтобы ликвидировать противоречия между механикой и электродинамикой?



§ 62 ПОСТУЛАТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Вспомните, как мы делаем отсчёт времени при описании механического движения.

К началу XX в. обозначились существенные противоречия между электродинамикой Максвелла и классической механикой Ньютона. В 1905 г. А. Эйнштейн предложил изменить представления о пространстве и времени, построив новую (специальную) теорию относительности.

В основе теории относительности Эйнштейна лежат **два постулата.**

Важно 1. Все процессы в природе протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.

Это означает, что во всех инерциальных системах отсчёта физические законы имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики распространяется на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

Важно 2. Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчёта и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приёмника светового сигнала.

Скорость света занимает, таким образом, особое положение. Более того, как вытекает из постулатов теории относительности, скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи взаимодействий в природе.

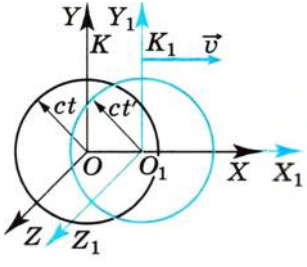


Рис. 8.1

Для того чтобы сформулировать постулаты теории относительности, нужна была большая научная смелость, так как они противоречили классическим представлениям о пространстве и времени.

В самом деле, допустим, что в момент времени, когда начала координат инерциальных систем отсчёта K и K_1, движущихся относительно друг друга со скоростью $\vec{v}$, совпадают, в начале координат происходит кратковременная вспышка света. За время t системы отсчёта сместятся относительно друг друга на расстояние vt, а сферическая волновая поверхность будет иметь радиус vt (рис. 8.1). Системы отсчёта K и K_1 равноправны, и скорость света одинакова в той и другой системе отсчёта. Следовательно, с точки зрения наблюдателя, связанного с системой отсчёта K, центр сферы будет находиться в точке O, а с точки зрения наблюдателя, связанного с системой отсчёта K_1, —

Интересно *Постулат* в физической теории выполняет ту же роль, что и аксиома в математике. Это — основное положение, которое не может быть логически доказано. В физике постулат есть результат обобщения опытных фактов.

в точке O_1. Но ведь не может одна и та же сферическая поверхность иметь центры в точках O и O_1. Это явное противоречие вытекает из рассуждений, основанных на постулатах теории относительности.

Как мы видим, имеется противоречие с классическими представлениями о пространстве и времени, которые при больших скоростях движения несправедливы. Однако сама теория относительности не содержит противоречий и является абсолютно логичной.

Относительность одновременности. До начала XX в. никто не сомневался, что время абсолютно. Два события, одновременные для жителей Земли, одновременны для жителей любой космической цивилизации. Создание теории относительности привело к выводу о том, что это не так.

Причиной несостоятельности классических представлений о пространстве и времени является неправильное предположение о возможности мгновенной передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения привычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об абсолютном времени, которое течёт раз и навсегда заданным темпом совершенно независимо от материи и её движения, оказывается неправильным.

Если допустить возможность мгновенного распространения сигналов, то утверждение, что события в двух пространственно разделённых точках A и B произошли одновременно, будет иметь абсолютный смысл. Можно поместить в точки A и B часы и синхронизировать их с помощью мгновенных сигналов. Если такой сигнал отправлен из точки A, например, в 0 ч 45 мин и он в этот же момент времени по часам B пришёл в точку B, то, значит, часы показывают одинаковое время, т. е. идут синхронно. Если же такого совпадения нет, то часы можно синхронизировать, подведя вперёд те часы, которые показывают меньшее время в момент отправления сигнала.

Любые события, например два удара молнии, одновременны, если они происходят при одинаковых показаниях синхронизированных часов.

Только располагая в точках A и B синхронизированные часы, можно судить о том, произошли ли два каких-либо события в этих точках одновременно или нет. Но как можно синхронизировать часы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, если скорость распространения сигналов не бесконечно велика?

Для синхронизации часов естественно использовать световые или вообще электромагнитные сигналы, так как скорость электромагнитных волн в вакууме является строго определённой, постоянной величиной.

Именно этот способ используют для проверки часов по радио. Сигналы времени позволяют синхронизировать ваши часы с точными эталонными часами. Зная расстояние от радиостанции до дома, можно вычислить поправку на запаздывание сигнала. Эта поправка, конечно, очень мала. В повседневной жизни она не играет сколько-нибудь заметной роли. Но при огромных космических расстояниях она может оказаться весьма существенной.



Посчитайте, насколько ваши часы будут отставать от часов диктора, находящегося от вас на расстоянии 200 км, если вы поставите время по его голосу.

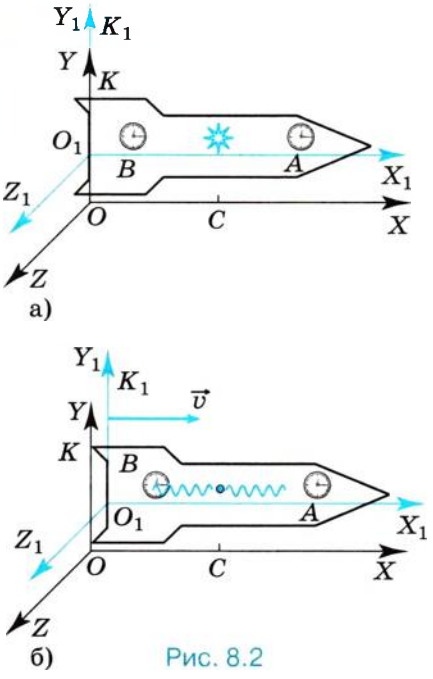


Рис. 8.2

Рассмотрим подробнее простой метод синхронизации часов, не требующий никаких вычислений. Допустим, что космонавт хочет узнать, одинаково ли идут часы A и B, установленные на противоположных концах космического корабля. Для этого с помощью источника, неподвижного относительно корабля и расположенного в его середине, космонавт производит вспышку света. Свет одновременно достигает тех и других часов. Если показания часов в этот момент одинаковы, то часы идут синхронно.

Но так будет лишь в системе отсчёта K_1, связанной с кораблем. Согласно второму постулату теории относительности скорость света одинакова во всех инерциальных системах отсчёта. Следовательно, в системе отсчёта K скорость света также равна c. Очевидно, что часы на носу корабля удаляются от того места, где произошла вспышка света (точка с координатой C), и, чтобы достигнуть часов A, свет должен преодолеть расстояние, большее половины длины корабля (рис. 8.2). Напротив, часы B на корме приближаются к месту вспышки, и путь светового сигнала меньше половины длины корабля. (На рисунке 8.2, *а* координаты x и x_1 совпадают в момент вспышки; на рисунке 8.2, *б* показано положение систем отсчёта в момент, когда свет достигает часов B.) Поэтому наблюдатель, находящийся в системе отсчёта K, сделает вывод: сигналы достигают тех и других часов не одновременно.

Важно Два любых события в точках A и B, одновременные в системе отсчёта K_1, не одновременны в системе отсчёта K.

Но согласно принципу относительности системы отсчёта K_1 и K совершенно равноправны. Ни одной из этих систем отсчёта нельзя отдать предпочтение. Поэтому мы вынуждены прийти к заключению, что

Важно одновременность пространственно разделённых событий относительна.

Причиной относительности одновременности является, как мы видим, конечность скорости распространения сигналов.

Именно в относительности одновременности, с которой мы не сталкиваемся в повседневной жизни, кроется решение парадокса со сферическими световыми сигналами, о котором шла речь выше. Свет одновременно достигает точек сферической поверхности с центром в точке O только с точки зрения

наблюдателя, находящегося в покое относительно системы отсчёта K. С точки же зрения наблюдателя, связанного с системой отсчёта K_1, свет достигает этих точек в разные моменты времени.

Разумеется, справедливо и обратное: с точки зрения наблюдателя в системе отсчёта K свет достигает точек поверхности сферы с центром в точке O_1 в различные моменты времени, а не одновременно, как это представляется наблюдателю в системе отсчёта K_1.

Отсюда следует вывод, что никакого парадокса в действительности нет. Одновременность событий относительна. Представить себе это наглядно, «почувствовать» мы не в состоянии из-за того, что скорость света много больше тех скоростей, с которыми привыкли двигаться мы.

Постулаты теории относительности. Относительность одновременности

1. Какие утверждения лежат в основе теории относительности?
2. В чём отличие первого постулата теории относительности от принципа относительности в механике?
3. Какие события называются одновременными?

1. В основе специальной теории относительности лежат
1) эксперименты, доказывающие независимость скорости света от скорости движения источника и приёмника света
2) эксперименты по измерению скорости света в воде
3) представления о том, что свет является колебанием невидимого эфира
4) гипотезы о взаимосвязи массы и энергии, энергии и импульса

2. Для каких физических явлений был сформулирован принцип относительности Галилея?
1) только для механических явлений
2) для механических и тепловых явлений
3) для механических, тепловых и электромагнитных явлений
4) для любых физических явлений

3. Принцип относительности Эйнштейна справедлив
1) только для механических явлений
2) только для оптических явлений
3) только для электрических явлений
4) для всех физических явлений

4. Для описания физических процессов
А. все системы отсчёта являются равноправными
Б. все инерциальные системы отсчёта являются равноправными
Какое из этих утверждений справедливо согласно специальной теории относительности?
1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

5. Нельзя установить, движется или покоится лаборатория относительно какой-либо инерциальной системы отсчёта, на основании проведённых в этой лаборатории наблюдений
1) оптических явлений
2) электрических явлений
3) механических явлений
4) любых физических явлений

§ 63 ОСНОВНЫЕ СЛЕДСТВИЯ ИЗ ПОСТУЛАТОВ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Как проводят измерения длины и времени в классической механике? Вспомните классический закон сложения скоростей.

Из постулатов теории относительности вытекает ряд важнейших следствий. Перечислим их, не останавливаясь на обосновании этих следствий.

Относительность расстояний. Расстояние между двумя точками тела не является абсолютной величиной, а зависит от скорости движения тела относительно данной системы отсчёта.

Обозначим через l_0 длину стержня в системе отсчёта K_1, относительно которой стержень покоится. Тогда длина l этого стержня в системе отсчёта K, относительно которой стержень движется со скоростью $\vec{v}$, определяется формулой

Будет ли Земля выглядеть круглой для космонавта, движущегося с большой скоростью к Земле?

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (8.1)$$

Как видно из этой формулы, $l < l_0$. В этом состоит так называемое *релятивистское сокращение размеров* движущегося тела.

Запомни

Релятивистское сокращение размеров движущегося тела — эффект, заключающийся в том, что с точки зрения неподвижного наблюдателя движущиеся относительно него предметы имеют меньшие линейные размеры в направлении движения, чем их собственные размеры.

Относительность промежутков времени. Пусть интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке инерциальной системы отсчёта K, равен τ_0. Этими событиями, например, могут быть два удара метронома в K-системе, отсчитывающего секунды.

Тогда интервал τ между теми же событиями в системе отсчёта K_1, движущейся относительно системы отсчёта K со скоростью $\vec{v}$, равен:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (8.2)$$

Очевидно, что $\tau > \tau_0$. В этом состоит *релятивистский эффект замедления времени.*

Запомни

Релятивистский эффект замедления времени — эффект, заключающийся в том, что в движущейся системе отсчёта все физические процессы проходят медленнее, чем следовало бы по отсчётам времени неподвижной (лабораторной) системы отсчёта.

Движущиеся часы «тикают» медленнее, чем покоящиеся.

Если $v << c$, то в формулах (8.1) и (8.2) можно пренебречь величиной $\frac{v^2}{c^2}$. Тогда $l \approx l_0$ и $\tau \approx \tau_0$, т. е. релятивистское сокращение размеров тела и замедление времени в движущихся системах отсчёта можно не учитывать.

Релятивистский закон сложения скоростей. Новым релятивистским представлениям о пространстве и времени соответствует новый закон сложения скоростей. Очевидно, что классический закон сложения скоростей не может быть справедливым, так как он противоречит утверждению о постоянстве скорости света в вакууме.

Как на основании формул (8.1) и (8.2) доказать, что скорость света — максимальная скорость движения физических объектов?

Если поезд движется со скоростью $\vec{v}$ и в вагоне в направлении движения поезда распространяется световая волна, то её скорость относительно земли должна быть равна опять-таки $\vec{c}$, а не $\vec{v} + \vec{c}$. Новый закон сложения скоростей и должен приводить к требуемому результату.

Мы запишем этот закон сложения скоростей для частного случая, когда тело движется вдоль оси X_1 системы отсчёта K_1, которая, в свою очередь, движется со скоростью $\vec{v}$ относительно системы отсчёта K. Причём в процессе движения координатные оси OX и OX_1 всё время совпадают, а координатные оси OY и OY_1, OZ и OZ_1 остаются параллельными (рис. 8.3).

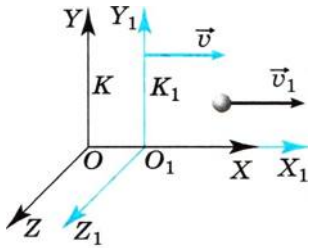


Рис. 8.3

Обозначим скорость тела относительно системы отсчёта K_1 через v_1, а скорость этого же тела относительно системы отсчёта K через v_2. Тогда

Важно

релятивистский закон сложения скоростей имеет вид

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}. \qquad (8.3)$$

Если $v << c$ и $v_1 << c$, то членом $\frac{v_1 v}{c^2}$ в знаменателе можно пренебречь, и вместо выражения (8.3) получим привычный для нас *классический закон сложения скоростей*:

$$v_2 = v_1 + v.$$

При $v_1 = c$ скорость v_2 также равна c в соответствии со вторым постулатом теории относительности. Действительно,

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c\frac{c + v}{c + v} = c.$$

Замечательным свойством релятивистского закона сложения скоростей является то, что при любых скоростях v_1 и v (конечно, не бóльших c) результирующая скорость v_2 не превышает c.

Следствия из постулатов теории относительности

Найти

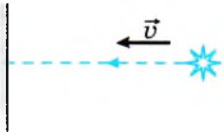
1. При каких скоростях движения релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический (закон Галилея)?
2. В чём принципиальное отличие скорости света от скоростей движения тел?

1. Формулы специальной теории относительности необходимо использовать при описании движения
1) только микроскопических тел, скорости которых близки к скорости света
2) только макроскопических тел, скорости которых близки к скорости света
3) любых тел, скорости которых близки к скорости света
4) любых тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света

2. Время жизни заряженных частиц, покоящихся относительно ускорителя, равно τ. Чему равно время жизни частиц, которые движутся в ускорителе со скоростью $0{,}6c$?
1) τ 2) $1{,}67\tau$ 3) $0{,}85\tau$ 4) $1{,}25\tau$

3. В инерциальной системе отсчёта свет распространяется в вакууме со скоростью c. В некоторой системе отсчёта с одинаковыми скоростями v движутся навстречу друг другу две светящиеся кометы. Скорость света, испущенного первой кометой, в системе отсчёта, связанной с другой кометой, равна
1) c 2) $c + v$ 3) $c + 2v$ 4) $2c + v$

4. Два электрона движутся в противоположные стороны со скоростями $0{,}5c$ и $0{,}6c$ относительно Земли (c — скорость света в вакууме). Скорость второго электрона в системе отсчёта, связанной с первым электроном, равна
1) $1{,}1c$ 2) c 3) $0{,}85c$ 4) $0{,}1c$



5. Свет от источника падает перпендикулярно поверхности неподвижного зеркала. Источник света приближается к зеркалу со скоростью $\vec{v}$. Чему равна скорость отражённого света в инерциальной системе отсчёта, связанной с зеркалом? (Свет в вакууме распространяется со скоростью c.)
1) $c - v$ 2) c 3) $c + v$ 4) $c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

§ 64 ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ

Вспомните определения основных понятий динамики: массы, импульса, энергии.

С новыми пространственно-временными представлениями не согласуются при больших скоростях движения и законы механики Ньютона. Лишь при малых скоростях движения, когда справедливы классические представления о пространстве и времени, второй закон Ньютона (уравнение движения)

$$m\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \qquad (8.4)$$

не меняет своей формы при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой (выполняется принцип относительности).

Но при больших скоростях движения этот закон в своей обычной (классической) форме несправедлив. Однако введённые в динамике основные понятия: энергия, импульс — имеют тот же физический смысл, лишь понятие массы в классической механике отличается от понятия массы в релятивистской динамике.

В природе существуют частицы, скорость которых равна скорости света. Это фотоны. Массы этих частиц равны нулю. Они не могут быть замедлены или ускорены. Поэтому во всех инерциальных системах отсчёта их импульс и энергия не равны нулю. Такие частицы называются *безмассовыми* (см. § 71).

Энергия и импульс таких частиц связаны соотношениями

$$E = pc \quad \text{и} \quad E^2 - p^2c^2 = 0. \qquad (8.5)$$

Эти соотношения экспериментально подтверждены.

Однако для большинства частиц масса является одной из важнейших характеристик. Эти частицы называются *массовыми*. Скорость таких частиц $v < c$.

Массовая частица обладает собственной энергией:

$$E = mc^2. \qquad (8.6)$$

Запомни Согласно формуле (8.6) тело обладает энергией и при скорости, равной нулю, — **энергией покоя.**

Это замечательный результат.

Важно Любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна его массе m.

При превращениях элементарных частиц, обладающих массой покоя $m \neq 0$, в частицы, у которых $m = 0$, их энергия покоя E_0 целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц. Этот факт является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

Важно Во всех инерциальных системах отсчёта импульс частицы и её энергия связаны соотношением

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4. \quad (8.7)$$

Как называются величины, не изменяющиеся при переходе от одной системы отсчёта к другой?

Так как величины m и c не меняются при переходе от одной системы отсчёта к другой, то, следовательно, не меняется и значение $E^2 - p^2c^2$.

Выражение (8.7) преобразуется в уравнение (8.5) при $m = 0$, следовательно, оно справедливо также и для безмассовых частиц.

Важно Формула (8.7) является *фундаментальным соотношением релятивистской механики.*

Энергия движущейся частицы выражается через её импульс следующим образом:

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}. \quad (8.8)$$

Используя формулу (8.8), а также учитывая, что импульс частицы пропорционален её скорости и энергии, получаем выражения для импульса и энергии частицы:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (8.9)$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (8.10)$$

При $v << c$ мы получим выражение для импульса в классической механике: $\vec{p} = m\vec{v}$.

Множитель $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ (*релятивистский множитель*) при малых скоростях можно преобразовать: $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$.

Подставим это выражение в формулу (8.10) и получим

$$E \approx mc^2 + mv^2/2. \quad (8.11)$$

Подставьте формулы (8.9) и (8.10) в формулу (8.8) и убедитесь в правильности приведённых выражений для импульса и энергии.

Последнее слагаемое — это выражение для кинетической энергии в классической механике.

Первое слагаемое в формуле (8.11) — это собственная энергия частицы.

Важно Релятивистская энергия есть сумма собственной энергии частицы и релятивистской кинетической энергии $E_к$:

$$E \approx mc^2 + E_к. \qquad (8.12)$$

Из уравнений (8.10) и (8.12) получим выражение для *релятивистской кинетической энергии* массовой частицы:

$$E_к = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) mc^2. \qquad (8.13)$$

Заметим, что если $v \to c$, то $E_к \to \infty$, что невозможно. Это означает, что скорость массовой частицы всегда меньше скорости света.

Масса частицы из формулы (8.8) имеет вид

$$m = \frac{1}{c^2}\sqrt{E^2 - p^2c^2}\,. \qquad (8.14)$$

Если частица покоится, то $m = E/c^2$.

Важно Так как подкоренное выражение в формуле (8.14) не зависит от выбора системы отсчёта, то масса частицы не зависит от её движения и остаётся одной и той же величиной во всех инерциальных системах отсчёта.

Принцип соответствия. Законы динамики Ньютона и классические представления о пространстве и времени можно рассматривать как частный случай релятивистских законов при скоростях движения, много меньших скорости света.

Это — проявление так называемого *принципа соответствия.*

Запомни **Принцип соответствия** — принцип, согласно которому любая теория, претендующая на более глубокое описание явлений и на более широкую сферу применимости, чем старая, должна включать последнюю как предельный случай.

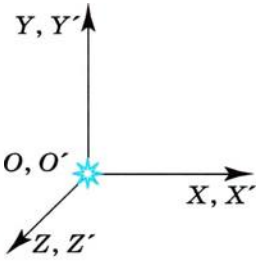
Принцип соответствия впервые был сформулирован Нильсом Бором для установления связи квантовой и классической теорий.

Энергия покоя. Релятивистские импульс, энергия — Найти

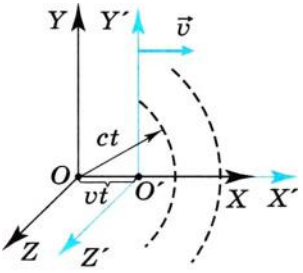
1. Какие величины не изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой?
2. Какие частицы могут двигаться со скоростью света?
3. В чём состоит принцип соответствия?

§ 65 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

Задачи на теорию относительности в основном решают по известным формулам. Надо обращать внимание на то, с каким телом связывать подвижную и неподвижную системы отсчёта, от этого зависят знаки в формулах.



а)



б)

Рис. 8.4

Задача 1. Исходя из второго постулата теории относительности, выведите преобразования координат подвижной системы отсчёта K' в координаты неподвижной системы отсчёта K, если система отсчёта K' движется вдоль оси OX со скоростью v относительно системы K (преобразования Лоренца).

Р е ш е н и е. В начальный момент времени совместим начала координат подвижной и неподвижной систем (O совпадёт с O') (рис. 8.4, *а*).

Пусть в точке O (или O') в начальный момент времени произошла вспышка.

Спустя промежуток времени t оси совпадать уже не будут (рис. 8.4, *б*) и значения координат волнового фронта x и x' тоже.

Преобразования координат в классической механике имели вид

$$\begin{array}{cc} K \to K' & K' \to K \\ x' = x - vt & x = x' + vt' \\ y' = y & y = y' \\ z' = z & z = z' \\ t' = t & t = t' \end{array} \qquad (1)$$

Согласно принципу соответствия преобразования координат в релятивистской механике должны оставаться линейными и переходить в соотношения (1) при $v << c$. Следовательно, они должны иметь вид

$$x' = \gamma(x - vt), \qquad x = \gamma(x' + vt'). \qquad (2)$$

Так как скорость света не зависит от движения системы отсчёта, в системе отсчёта K за время t сигнал вдоль оси OX распространился на расстояние $x = ct$, а в системе отсчёта K' — на расстояние $x' = ct'$. Подставив эти значения в формулы (2), имеем

$$ct' = \gamma t(c - v), \qquad ct = \gamma t'(c + v).$$

Выразив t' из этих равенств и приравняв полученные выражения, имеем $\dfrac{\gamma(c - v)}{c} = \dfrac{c}{\gamma(c + v)}$, откуда получим

$$\gamma^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - v^2/c^2}, \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Следовательно, для преобразования координат имеем выражения

$$K \to K' \qquad K' \to K$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y' = y \qquad y = y'$$

$$z' = z \qquad z = z'$$

Для t' и t находим соотношения:

$$t' = \frac{\gamma(c - v)}{c}t = \frac{ct - vt}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{t - xv/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad t = \frac{t' - x'v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Задача 2. Выведите формулу сокращения длины стержня из преобразований Лоренца (см. задачу 1).

Р е ш е н и е. Пусть l — длина стержня в неподвижной системе отсчёта, l_0 — длина стержня в движущейся со скоростью v системе отсчёта, т. е. длина, измеряемая наблюдателем, покоящимся относительно стержня (рис. 8.5). Длина l определится разностью координат концов стержня: $l = x_2 - x_1$.

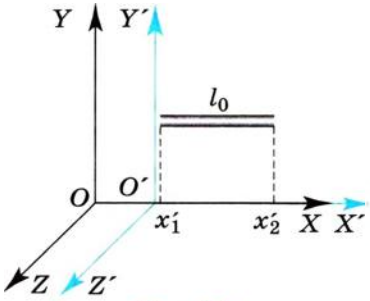


Рис. 8.5

В системе координат K', движущейся со скоростью v, длина l_0 стержня, равная разности его координат, определённых одновременно, равна $l_0 = x_2' - x_1'$.

Используя преобразования Лоренца, для x_1' и x_2' имеем

$$x_1' = \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad x_2' = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Так как $t_1 = t_2$ (измерения проводятся одновременно), то $x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. Окончательно $l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Задача 3. Среднее время жизни элементарной частицы — мюона в состоянии покоя равно $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с. Через какой промежуток времени наблюдатель увидит распад образовавшегося мюона, движущегося со скоростью $0{,}3c$?

Р е ш е н и е. Мюон движется относительно наблюдателя со скоростью $v = 0{,}3c$. Если бы наблюдатель двигался с ним, то он зафиксировал бы его время жизни, равное τ_0. Но относительно неподвижного наблюдателя время жизни мюона увеличится, и наблюдатель увидит его распад через промежуток времени $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \approx 2{,}3 \cdot 10^{-6}$ с.

Задача 4. Тонкое кольцо радиусом 40 см пролетает мимо наблюдателя со скоростью $v = 0{,}8c$. Определите изменения формы кольца, которые фиксирует наблюдатель.

Р е ш е н и е. Если бы наблюдатель двигался с такой же скоростью, что и кольцо, он бы не обнаружил изменений его формы. Относительно этого наблюдателя кольцо было бы неподвижно.

Относительно неподвижного наблюдателя размеры кольца вдоль направления его движения сокращаются, а в перпендикулярном к направлению движения направлении не изменяются. Поэтому кольцо будет казаться неподвижному наблюдателю сплющенным.

Итак, продольный размер определяется по формуле $d_1' = 2r\sqrt{1 - v^2/c^2}$, поперечный размер $d_2 = d_2' = 2r$, откуда

$$\Delta d_1 = d_1' - d_1 = 2r\left(\sqrt{1 - v^2/c^2} - 1\right) = -0{,}32 \text{ м}; \quad \Delta d_2 = 0.$$

Задача 5. С космического корабля, находящегося от Земли на расстоянии $s = 6 \cdot 10^6$ м, посылают на Землю световой сигнал и пучок быстрых частиц, имеющих скорость относительно корабля $v' = 0{,}8c$. Корабль движется к Земле со скоростью $v_0 = 0{,}4c$. Определите, через какие промежутки времени сигнал и пучок частиц дойдут до Земли.

Р е ш е н и е. Скорость света не зависит от движения источника, и поэтому время τ_1, через которое световой сигнал дойдёт до Земли, равно:

$$\tau_1 = \frac{s}{c} = \frac{6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \text{ (с)} = 0{,}02 \text{ с}.$$

В неподвижной системе отсчёта, связанной с Землёй, скорость частиц определим согласно закону сложения скоростей (8.3): $v = \dfrac{v_0 + v'}{1 + v'v_0/c^2}$.

Соответственно $\tau_2 = \dfrac{s\left(1 + v'v_0/c^2\right)}{v_0 + v'} = 0{,}022$ с.

Световой сигнал дойдёт до Земли на 2 мс раньше, чем пучок частиц.

Задача 6. Определите изменение массы льда при его плавлении при температуре 0 °С. Исходная масса льда 10 кг, удельная теплота плавления льда $3{,}3 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Р е ш е н и е. При плавлении энергия системы увеличивается за счёт изменения потенциальной энергии взаимодействия молекул: $\Delta E = \lambda m$.

Энергия системы связана с массой следующим соотношением: $\Delta E = \Delta m c^2$.

Отсюда $\Delta m = \dfrac{\Delta E}{c^2} = \dfrac{\lambda m}{c^2} = 3{,}67 \cdot 10^{-11}$ кг.

Задачи для самостоятельного решения

1. С точки зрения наблюдателя, находящегося в движущемся поезде, удары молний в землю в точке A (впереди поезда) и в точке B (позади поезда)

произошли одновременно. Какая молния ударила в землю раньше с точки зрения наблюдателя, находящегося на земле?

2. Электрон, ускоренный электрическим полем, приобретает скорость, при которой его полная энергия равна удвоенной энергии покоя. Чему равна ускоряющая разность потенциалов?

3. Выведите из преобразований Лоренца формулу преобразований промежутков времени.

4. Стержень длиной 1 м находится в космическом корабле, пролетающем мимо Земли со скоростью $0{,}8c$. Чему равна длина стержня для наблюдателя, находящегося на Земле? Стержень ориентирован вдоль скорости полёта.

5. На сколько увеличится масса стали при плавлении, если её исходная масса равна 20 кг? Удельная теплота плавления стали $8{,}2 \cdot 10^4$ Дж/кг.

6. Элементарная частица движется со скоростью c. Определите скорость частицы относительно наблюдателя, движущегося навстречу частице со скоростью v.

1. При проведении опытов учёные обнаружили явление образования пары «электрон—позитрон». Чему равна минимальная суммарная энергия пары? Энергия покоя электрона равна 0,5 МэВ.

2. Звезда каждую секунду испускает излучение с суммарной энергией около $9 \cdot 10^{26}$ Дж. В результате этого масса звезды ежесекундно уменьшается на $\Delta m = X \cdot 10^{10}$ кг. Определите значение X.

3. Свободный пион (π^0-мезон) с энергией покоя 135 МэВ движется со скоростью $v = 3 \cdot 10^7$ м/с. В результате его распада образовались два γ-кванта, причём первый распространяется в направлении движения пиона, а второй — в противоположном направлении. Чему равна энергия первого γ-кванта?

Повторите материал главы 8 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.

«Специальная теория относительности»

1. Теория эфира. Опыт Майкельсона—Морли. Аберрация света звезды.
2. Относительность понятия времени. Одновременность событий. Парадокс близнецов.
3. Значение специальной теории относительности, её экспериментальное подтверждение.
4. Понятия пространства и времени. Как мы понимаем, что такое четырёхмерное пространство?

ГЛАВА 9 ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ

§ 66 ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Вспомните, на основании какой теории мы объясняли явления волновой оптики. Что такое свет?

Согласно законам классической электродинамики, ускоренно движущиеся заряженные частицы излучают электромагнитные волны. Как мы знаем, переменный ток также вызывает появление электромагнитного поля. Излучение происходит и при переходе атома из возбуждённого состояния в основное, а также при распаде ядра. Совершенно разные источники являются источниками излучения одной и той же физической природы — электромагнитных волн. Правда, диапазоны частот этих волн различны.

Подумайте, почему электромагнитное излучение считают свободным. Вспомните, как происходит распространение электромагнитной волны.

Вначале остановимся на одном из видов излучения — *тепловом излучении*.

Тепловое излучение. Наиболее простой и распространённый вид излучения — это тепловое излучение, происходящее за счёт энергии теплового движения атомов (или молекул) излучающего тела.

Запомни **Тепловое излучение** — это излучение нагретых тел.

Важно Чем выше температура тела, тем быстрее движутся в нём атомы. При их столкновении друг с другом часть кинетической энергии, которой они обладают, идёт на возбуждение, затем атомы излучают и переходят в невозбуждённое (основное) состояние.

Как, согласно вашим наблюдениям, излучаемая телом энергия и цвет тела зависят от температуры?

Тепловое излучение — это единственное существующее в природе равновесное излучение. Если нагретое тело поместить в оболочку с идеально отражающими излучение стенками, то спустя некоторое время распределение энергии между излучением (электромагнитного поля) и телом будет оставаться неизменным. Энергия, излучаемая телом за время t, будет равна энергии, поглощаемой телом за тот же промежуток времени.

Если тело дополнительно нагреть, то оно начнёт излучать больше энергии, чем поглощать. Затем излучение и тело придут опять в состояние равновесия.

Тепловыми источниками излучения являются, например, Солнце и обычная лампа накаливания. Лампа очень удобный, но малоэкономичный источник

света. Лишь около 5 % всей энергии, выделяемой в нити лампы электрическим током, преобразуется в энергию света. Наконец, тепловым источником света является также пламя. Крупинки сажи (не успевшие сгореть частицы топлива) раскаляются за счёт энергии, выделяющейся при сгорании топлива, и испускают свет.

Вспомните, с какими источниками теплового излучения вы сталкиваетесь в повседневной жизни. Все ли источники для вас полезны?

Электролюминесценция. Энергия, необходимая атомам для излучения света, может поступать и из нетепловых источников. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию. Быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами. Часть кинетической энергии электронов идёт на возбуждение атомов. Возбуждённые атомы отдают энергию в виде световых волн, происходит разряд.

Подумайте, можно ли сказать, что источники теплового излучения — это источники света.

Запомни **Электролюминесценция** — это свечение, сопровождающее разряд в газе.

Северное сияние тоже проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Они возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоёв атмосферы, из-за чего эти слои светятся. Явление электролюминесценции используется в трубках для рекламных надписей.

Катодолюминесценция.

Запомни **Катодолюминесценция** — это свечение твёрдых тел, вызванное бомбардировкой их электронами.

Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электронно-лучевых трубок телевизора.

Хемилюминесценция. При некоторых химических реакциях происходит излучение света. Источник света остаётся холодным (он имеет температуру окружающей среды).

Запомни **Хемилюминесценция** — это свечение, происходящее за счёт выделения энергии при некоторых химических реакциях.

Почти каждый из вас, вероятно, знаком с таким свечением. Летом в лесу можно ночью увидеть насекомое — светлячка. На теле у него «горит» маленький зелёный «фонарик». Вы не обожжёте пальцев, поймав светлячка. Светящееся пятнышко на его спинке имеет почти ту же температуру, что и окружающий воздух. Светятся и другие живые организмы: бактерии, насекомые, многие рыбы, обитающие на большой глубине. Нередко светятся в темноте кусочки гниющего дерева.

Подумайте, почему хемилюминесценция — неравновесное излучение.

Фотолюминесценция. Падающий на вещество свет частично отражается и частично поглощается. Энергия поглощаемого света в большинстве случаев вызывает лишь нагревание тел. Однако некоторые тела сами начинают светиться.

Запомни

Фотолюминесценция — это явление свечения вещества после поглощения энергии падающего на него излучения.

Свет возбуждает атомы вещества (увеличивает их внутреннюю энергию), и после этого они светятся сами. Например, светящиеся краски, которыми покрывают ёлочные игрушки, излучают свет после их облучения.

Излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, бóльшую длину волны, чем свет, возбуждающий свечение. Это можно наблюдать экспериментально. Если направить на сосуд с флюоресцеином (органический краситель) световой пучок, пропущенный через фиолетовый светофильтр, то эта жидкость начинает светиться зелёно-жёлтым светом, т. е. светом с большей длиной волны, чем у фиолетового света.

Изучением явления фотолюминесценции занимался советский физик Сергей Иванович Вавилов. Он исследовал зависимость длины волны люминесцентного излучения от длины волны возбуждающего излучения, а также множество иных явлений, связанных с темой излучения. В 1941 г. С. И. Вавилов сделал доклад, основной идеей которого являлось эффективное использование люминесцентных источников света. Он предложил покрывать внутреннюю поверхность разрядной трубки веществами, способными ярко светиться под действием коротковолнового излучения газового разряда.



С. И. Вавилов (1891—1951)

В настоящее время явление фотолюминесценции широко используется в лампах дневного света. Они в несколько раз экономичнее и дольше служат, чем обычные лампы накаливания, являющиеся тепловыми источниками света.

Излучение электромагнитных волн. Источники излучения — Найти

1. Какие источники света вы знаете?
2. Что такое равновесное излучение?
3. При каких температурах тела имеет место тепловое излучение?
4. Какова природа фото- и электролюминесценции?
5. Какие виды излучений действовали на вас в прошедшие сутки?

§ 67 СПЕКТРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Что такое спектр?
Вспомните опыт Ньютона по разложению белого света в спектр.

Распределение энергии в спектре. Ни один из источников не даёт *монохроматического света*, т. е. света строго определённой длины волны. В этом нас убеждают опыты по разложению света в спектр с помощью призмы, а также опыты по интерференции и дифракции.

Та энергия, которую несёт с собой свет от источника теплового излучения, распределена неравномерно по волнам всех длин волн (или частотам), входящим в состав светового пучка, или на единичном интервале длин волн. Плотность потока электромагнитного излучения, или интенсивность I, как известно из § 36, определяется энергией ΔW, приходящейся на все частоты. Для характеристики распределения излучения по частотам нужно ввести новую величину — *спектральную плотность потока излучения.*

Запомни **Спектральной плотностью потока излучения** называют интенсивность излучения, приходящегося на единичный интервал частот.

Обозначим её через $I(\nu)$. Тогда интенсивность излучения, приходящегося на небольшой спектральный интервал $\Delta\nu$, равна $I(\nu)\Delta\nu$. Суммируя подобные выражения по всем частотам спектра, мы получим плотность потока излучения I.

Спектральную плотность потока излучения на разных частотах можно найти экспериментально. Для этого надо с помощью призмы получить спектр излучения, например электрической дуги, и измерить плотность потока излучения, приходящегося на небольшие спектральные интервалы шириной $\Delta\nu$.

Зрительно оценить (приблизительно) распределение энергии нельзя, так как глаз обладает избирательной чувствительностью к свету: максимум его чувствительности лежит в жёлто-зелёной области спектра. Лучше всего воспользоваться свойством чёрного тела почти полностью поглощать свет всех длин волн.

При этом энергия падающего на поверхность тела излучения (света) вызывает его нагревание. Поэтому достаточно измерить температуру тела и по ней судить о количестве поглощённой в единицу времени энергии и соответственно об энергии, которую тело может излучать.

По результатам таких опытов построена кривая зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты (рис. 9.1). Эта кривая даёт наглядное представление о распределении энергии в *видимой* части спектра электрической дуги.

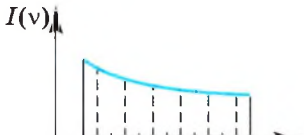


Рис. 9.1

Спектральные аппараты. Приборы, дающие чёткий спектр, т. е. хорошо разделяющие волны различной длины волны и не допускающие (или почти не допускающие) перекрывания отдельных участков

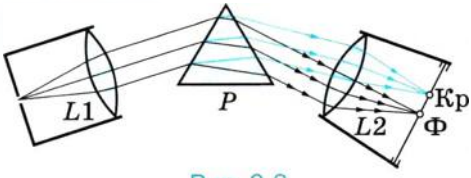


Рис. 9.2

спектра, называют *спектральными аппаратами*. Их основной частью является призма или дифракционная решётка.

Рассмотрим, например, схему устройства призменного спектрального аппарата (рис. 9.2). Исследуемое излучение поступает вначале в часть прибора, называемую *коллиматором*. Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза $L1$. Щель находится на фокусном расстоянии от линзы. Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из неё параллельным пучком и падает на призму P.

Как называется явление, на котором основано устройство описанного спектрального аппарата?

Так как разным частотам соответствуют различные показатели преломления, то из призмы выходят параллельные пучки, не совпадающие по направлению. Они падают на линзу $L2$. На фокусном расстоянии от этой линзы располагается экран — матовое стекло или фотопластинка. Линза $L2$ фокусирует параллельные пучки лучей на экране, и вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждой частоте (точнее, узкому спектральному интервалу) соответствует своё изображение. Все эти изображения вместе и образуют спектр.

Этот прибор называется *спектрографом*. Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для визуального наблюдения спектров, то такой прибор называется *спектроскопом*.

Виды спектров. Все спектры, как показывает опыт, можно разделить на три типа.

Непрерывные (или сплошные) спектры. Солнечный спектр и спектр дугового фонаря являются *непрерывными*.

Запомни

Непрерывным (или **сплошным**) называют спектр, в котором представлены волны всех длин волн в данном диапазоне.

В спектре нет разрывов, и на экране спектрографа можно видеть сплошную разноцветную полосу (см. рис. V, *1* на цветной вклейке).

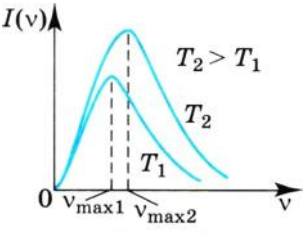


Рис. 9.3

Распределение энергии по частотам, т. е. спектральная плотность интенсивности излучения, для разных тел различно. Например, тело с очень чёрной поверхностью (в идеале *абсолютно чёрное тело*) излучает электромагнитные волны всех частот, но кривая зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты имеет максимум при определённой частоте ν_{max} (рис. 9.3). Энергия излучения, приходящегося на очень малые ($\nu \to 0$) и очень большие ($\nu \to \infty$) частоты, ничтожно мала. При повышении температуры тела максимум

спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн (*закон Вина*, см. § 102).

Понаблюдайте за остывающими углями костра. Как изменяется их цвет?

Непрерывные (или сплошные) спектры дают тела, находящиеся в твёрдом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Непрерывный спектр даёт также высокотемпературная плазма. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры. Полная излучательная способность тела (абсолютно чёрного тела) прямо пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры (*закон Стефана-Больцмана*, см. § 102): $I \sim T^4$.

Характер непрерывного спектра в сильной степени зависит от взаимодействия атомов друг с другом.

Линейчатые спектры. Внесём в бледное пламя газовой горелки кусочек асбеста, смоченный раствором обыкновенной поваренной соли. При наблюдении пламени в спектроскоп увидим, как на фоне едва различимого непрерывного спектра пламени вспыхнет яркая жёлтая линия (см. рис. V, *2* на цветной вклейке). Эту жёлтую линию дают пары натрия, которые образуются при расщеплении молекул поваренной соли в пламени. На цветной вклейке приведены также спектры водорода и гелия.

Запомни Спектры, представляющие собой цветные линии различной яркости, разделённые широкими тёмными полосами, называют **линейчатыми**.

Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определённых длин волн (точнее, в определённых очень узких спектральных интервалах). На рисунке 9.4 показано примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре. Каждая линия имеет конечную ширину.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Важно Изолированные атомы излучают свет строго определённых длин волн.

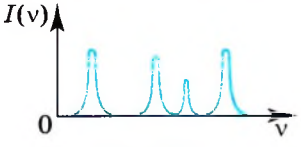


Рис. 9.4

Интересно Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

Полосатые спектры.

Запомни **Полосатый спектр** — это спектр, состоящий из отдельных полос, разделённых тёмными промежутками.

С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий.

Важно В отличие от линейчатых спектров, *полосатые спектры* образуются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров, так же как и для наблюдения линейчатых спектров, используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда.

Вспомните, как называется излучение, содержащее волны только одной длины волны.

Спектры поглощения. Все вещества, атомы которых находятся в возбуждённом состоянии, излучают световые волны. Энергия этих волн определённым образом распределена по длинам волн. Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$ см), и поглощает все остальные.

Если пропускать белый свет сквозь холодный, не излучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются тёмные линии (см. рис. V, *5—8* на цветной вклейке). Газ поглощает наиболее интенсивно свет именно тех длин волн, которые он сам испускает в сильно нагретом состоянии.

Запомни Тёмные линии на фоне непрерывного спектра — это линии поглощения, образующие в совокупности **спектр поглощения.**

Спектральный анализ. Линейчатые спектры имеют большое значение, потому что их структура тесно связана со строением атома.

Важно Главное свойство линейчатых спектров в том, что длины волн (или частоты) линейчатого спектра вещества зависят только от свойств атомов этого вещества, но совершенно не зависят от способа возбуждения свечения атомов.

Подумайте, как можно установить сложный состав исследуемого вещества.

Атомы любого химического элемента дают спектр, непохожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определённый набор длин волн.

Запомни **Спектральный анализ** — метод определения химического состава вещества по его спектру.

Интересно Линейчатые спектры различных элементов имеют неповторимую индивидуальность, благодаря которой можно определить, из каких элементов состоит тело.

С помощью спектрального анализа можно обнаружить любой элемент в составе сложного вещества, даже если его масса не превышает 10^{-10} г. Это очень чувствительный метод.

В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены таблицы спектров. С помощью спектрального анализа были открыты многие новые элементы: рубидий, цезий и др. Элементам часто давали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий их спектров. Рубидий даёт тёмно-красные, рубиновые линии. Слово *цезий* означает «небесно-голубой». Это цвет основных линий спектра цезия. Именно с помощью спектрального анализа узнали химический состав Солнца и звёзд.

Благодаря сравнительной простоте и универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии. С помощью спектрального анализа определяют химический состав руд и минералов.

Спектральный анализ можно проводить не только по спектрам испускания, но и по спектрам поглощения. Именно линии поглощения в спектрах Солнца и звёзд позволяют исследовать химический состав этих небесных тел. Ярко светящаяся поверхность Солнца — *фотосфера* — даёт непрерывный спектр. Солнечная атмосфера поглощает избирательно свет от фотосферы, что приводит к появлению линий поглощения на фоне непрерывного спектра фотосферы. Но и сама атмосфера Солнца излучает свет.

Подумайте, почему во многих случаях для анализа предпочитают исследовать спектры поглощения, а не излучения.

В астрофизике под спектральным анализом понимают не только определение химического состава звёзд, газовых облаков и т. д., но и методы нахождения по спектрам многих других физических характеристик этих объектов: температуры, давления, скорости движения, магнитной индукции.

Спектры. Спектральный анализ. Абсолютно чёрное тело Найти

1. Что надо изменить в спектральном аппарате, если вместо призмы использовать дифракционную решётку?
2. Как зависит интенсивность излучения от частоты в видимой части спектра?
3. Является ли спектр лампы накаливания непрерывным?
4. В чём главное отличие линейчатых спектров от непрерывных и полосатых?
5. Какие операции нужно проделать с крупицей вещества, чтобы узнать её химический состав при помощи спектрального анализа?
6. Что определяют по линиям поглощения в солнечном спектре: состав атмосферы Солнца или же состав его глубинных слоёв?

§ 68 ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В каком диапазоне находятся длины волн видимого света и радиоволны?

Мы знаем, что длина электромагнитных волн бывает самой различной: от 10^3 м (радиоволны) до 10^{-10} м (рентгеновские лучи). Свет составляет ничтожную часть широкого спектра электромагнитных волн. При изучении этой малой части спектра были открыты другие излучения с необычными свойствами.

На форзацах учебника изображена полная шкала электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений, а также устройства, с помощью которых получают электромагнитные волны разных диапазонов частот.

Принято выделять *низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи* и *γ-излучение*. Границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны.

Принципиального различия физической природы между отдельными излучениями нет. Все они представляют собой электромагнитные волны с присущими им свойствами. В вакууме электромагнитное излучение любой длины волны распространяется со скоростью 300 000 км/с.

Излучения различных длин волн отличаются друг от друга по способам их получения (излучение антенны, излучение нагретых тел, излучение при торможении быстрых электронов и др.) и по методам регистрации.

Инфракрасное излучение.

Запомни Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне от $3 \cdot 10^{11}$ до $3{,}75 \cdot 10^{14}$ Гц называют **инфракрасным излучением.**

Его испускает любое нагретое тело даже в том случае, когда оно не светится. Например, батареи отопления в квартире испускают инфракрасные волны, вызывающие заметное нагревание окружающих тел. Поэтому инфракрасные волны часто называют *тепловыми*.

Интересно Инфракрасное излучение применяют для сушки лакокрасочных покрытий, овощей, фруктов и т. д. Созданы приборы, в которых не видимое глазом инфракрасное изображение объекта преобразуется в видимое. Изготовляются бинокли и оптические прицелы, позволяющие видеть в темноте.

Не воспринимаемые глазом инфракрасные волны имеют длины волн, превышающие длину волны красного света (длина волны 780 нм — 1 мм). Максимум энергии излучения электрической дуги и лампы накаливания приходится на инфракрасные лучи.

Ультрафиолетовое излучение.

Запомни Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц называют **ультрафиолетовым излучением** (длина волны 10—380 нм).

Обнаружить ультрафиолетовое излучение можно с помощью экрана, покрытого люминесцирующим веществом. Экран начинает светиться в той части, на которую падают лучи, лежащие за фиолетовой областью спектра.

Ультрафиолетовое излучение отличается высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотоэмульсия. В этом можно убедиться, спроецировав спектр в затемнённом помещении на фотобумагу. После проявления бумага почернеет за фиолетовым концом спектра сильнее, чем в области видимого спектра.

Интересно

В малых дозах ультрафиолетовые лучи способствуют росту и укреплению организма, образованию защитного пигмента — загара, витамина D_2, стимулируют ряд важных жизненных функций в организме, оказывают бактерицидное действие, убивая болезнетворные бактерии.

Почему следует носить тёмные очки со стеклом, а не с пластмассой?

Ультрафиолетовые лучи не вызывают зрительных образов: они невидимы. Но действие их на сетчатку глаза и кожу велико и разрушительно. Ультрафиолетовое излучение Солнца недостаточно поглощается верхними слоями атмосферы. Поэтому высоко в горах нельзя оставаться длительное время без одежды и без тёмных очков. Стеклянные очки, прозрачные для видимого спектра, защищают глаза от ультрафиолетового излучения, так как стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи.

Рентгеновское излучение.

Запомни

Рентгеновское излучение — это излучение с частотами в диапазоне от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{20}$ Гц.

Более подробно остановимся на этом виде излучения, так как, помимо интересной истории открытия, оно имеет широчайшее практическое применение.

В конце XIX в. всеобщее внимание физиков привлёк газовый разряд при малом давлении. При этих условиях в газоразрядной трубке создавались потоки очень быстрых электронов. В то время их называли *катодными лучами*. Природа таких лучей ещё не была с достоверностью установлена. Известно было лишь, что они берут начало на катоде трубки.

Занявшись исследованием катодных лучей, немецкий физик Вильгельм Рентген скоро заметил, что фотопластинка вблизи разрядной трубки оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завёрнута в чёрную бумагу.

Учёный понял, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное ранее сильно проникающее излучение. Он назвал его *X*-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи».



В. Рентген (1845—1923)

Рентген обнаружил, что новое излучение появлялось в том месте, где катодные лучи (потоки быстрых электронов) сталкивались со стеклянной стенкой трубки. В этом месте стекло светилось зеленоватым светом.

Последующие опыты показали, что X-лучи возникают при торможении быстрых электронов любым препятствием, в частности металлическими электродами.

Важно Лучи, открытые Рентгеном, действовали на фотопластинку, вызывали ионизацию воздуха, но заметным образом не отражались от каких-либо веществ и не испытывали преломления. Электромагнитное поле не оказывало никакого влияния на направление их распространения.

Сразу же возникло предположение, что рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, которые излучаются при резком торможении электронов. Большая проникающая способность рентгеновских лучей и прочие их особенности связывались с малой длиной волны. Но эта гипотеза нуждалась в доказательствах, и доказательства были получены спустя 15 лет после смерти Рентгена.

Вспомните, в каком случае мы наблюдаем чёткую дифракционную картину. Благодаря какому свойству рентгеновских лучей можно исследовать пространственное расположение атомов и «увидеть» молекулярные структуры?

Если рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, то оно должно обнаруживать *дифракцию* — явление, присущее всем видам волн. Немецкий физик Макс Лауэ предположил, что длина волны рентгеновских лучей слишком мала и единственная возможность их обнаружить — использовать кристаллы. Они представляют собой упорядоченные структуры, где расстояния между отдельными атомами по порядку величины равны размерам самих атомов, т. е. 10^{-8} см.

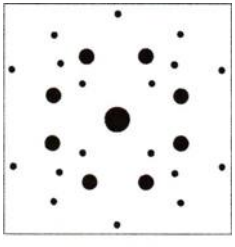


Рис. 9.5

И вот узкий пучок рентгеновских лучей был направлен на кристалл, за которым располагалась фотопластинка. Результат полностью согласовался с самыми оптимистическими ожиданиями! Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли регулярно расположенные небольшие пятнышки вокруг центрального пятна (рис. 9.5). Появление этих пятнышек можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.

Исследование дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновских лучей. Она оказалась меньше длины волны ультрафиолетового излучения и по порядку величины была равна размерам атома.

Рентгеновские лучи широко используют на практике.

Почему врач, делающий рентгеновский снимок, выходит из помещения или встаёт за экран?

В *медицине* они применяются для постановки правильного диагноза заболевания, а также для лечения раковых заболеваний.

Важно Поглощение рентгеновских лучей пропорционально плотности вещества.

Поэтому с помощью рентгеновских лучей можно получать фотографии внутренних органов человека. На этих фотографиях хорошо различимы кости скелета (рис. 9.6) и места перерождений мягких тканей.

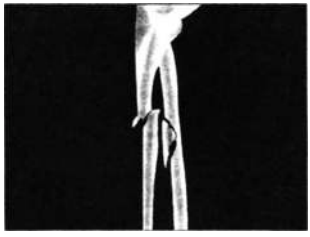


Рис. 9.6

Весьма обширны области применения рентгеновских лучей в *научных исследованиях*. По дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удаётся установить порядок расположения атомов в пространстве — структуру кристаллов, с помощью рентгеноструктурного анализа можно расшифровать также строение сложнейших органических соединений, в том числе белков. В частности, была определена структура молекулы гемоглобина, содержащей десятки тысяч атомов.

Из других областей применения рентгеновских лучей отметим ещё рентгеновскую *дефектоскопию* — метод обнаружения раковин в отливках, трещин в рельсах, проверки качества сварных швов и т. д. Рентгеновская дефектоскопия основана на изменении поглощения рентгеновских лучей в изделии при наличии в нём полостей или инородных включений.

Для получения рентгеновских лучей разработаны устройства, называемые *рентгеновскими трубками*. На рисунке 9.7 изображена упрощённая схема электронной рентгеновской трубки. Катод *1* представляет собой вольфрамовую спираль, испускающую электроны за счёт термоэлектронной эмиссии. Цилиндр *3* фокусирует поток электронов, которые затем соударяются с металлическим электродом (анодом) *2*, при этом испытывая резкое торможение. Так появляются рентгеновские лучи. Напряжение между анодом и катодом достигает нескольких десятков киловольт. В трубке создаётся глубокий вакуум; давление газа в ней не превышает 10^{-5} мм рт. ст.

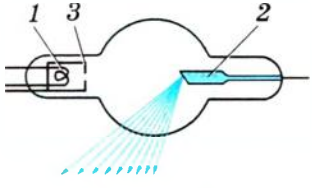


Рис. 9.7

Гамма-лучи. По своим свойствам γ-лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводило на мысль, что γ-лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ-лучей на кристаллах и измерена их длина волны.

Запомни **Гамма-лучи** — это электромагнитное излучение с очень малой длиной волны — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн γ-лучи следуют непосредственно за рентгеновскими. Скорость распространения γ-лучей такая же, как у всех электромагнитных волн, — около 300 000 км/с.

Мы уже упоминали источники разного вида излучения, отметим, что все перечисленные виды электромагнитного излучения порождаются также космическими объектами и успешно исследуются с помощью ракет, искусственных спутников Земли и космических кораблей. В первую очередь это относится к рентгеновскому и γ-излучениям, сильно поглощаемым атмосферой.

Важно По мере уменьшения длины волны количественные различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям.

Излучения различной длины волны очень сильно отличаются друг от друга по поглощению их веществом. Коротковолновые излучения (рентгеновское и особенно γ-лучи) поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений.

Коэффициент отражения электромагнитных волн также зависит от длины волны.

Рентгеновские лучи. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучения

Найти

1. Почему солнечный свет, прошедший сквозь оконное стекло, не вызывает загара?
2. Известен ли вам какой-либо источник ультрафиолетового излучения?
3. Какое основное свойство инфракрасного излучения используется в быту?
4. Как устроена рентгеновская трубка?
5. Почему трудно изготовить рентгеновский микроскоп?
6. Какими способами регистрируются радиоволны? излучения оптического диапазона? рентгеновские лучи?
7. Чем различаются виды электромагнитных излучений при их взаимодействии с веществом?

Повторите материал главы 9 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и дайте им определение.
2. Опишите основные опыты по изучению различных видов излучений.

«Излучение, источники и свойства»

1. Законы теплового излучения. Значение изучения законов теплового излучения в истории физики — ультрафиолетовая катастрофа.
2. Области применения ультрафиолетового и инфракрасного излучений.
3. Видимый свет. Процессы, определяющие видение человека и животных.
4. История открытия рентгеновских лучей, их применение.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Величайшая революция в физике совпала с началом XX в. Попытки объяснить наблюдаемые на опытах закономерности распределения энергии в спектрах *теплового излучения* (электромагнитного излучения нагретого тела, в частности абсолютно чёрного тела), описанного в § 66, 67, оказались несостоятельными. Многократно проверенные законы электромагнетизма Максвелла неожиданно «забастовали», когда их попытались применить к проблеме излучения веществом коротких электромагнитных волн. И это было тем более удивительно, что эти законы превосходно описывали излучение радиоволн антенной и что в своё время само существование электромагнитных волн было предсказано на основе этих законов.

Согласно теории Максвелла, колеблющиеся электрические заряды испускают электромагнитные волны. Тогда излучение нагретых тел может быть объяснено колебаниями электрических зарядов в молекулах вещества. При этом плотность излучаемой энергии должна увеличиваться с частотой. Однако опыт показывал, что при больших частотах плотность энергии становится малой, о чём свидетельствовал характер спектра электромагнитного излучения (см. рис. 9.3).

Уменьшение спектральной плотности излучения при малых длинах волн, необъяснимое с точки зрения теории Максвелла, было настолько сложно трактуемым, что в истории физики это явление было названо *ультрафиолетовой катастрофой*.

В поисках выхода из этого противоречия между теорией и опытом немецкий физик Макс Планк предположил, что

Важно атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями — **квантами.** Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu.$$

Запомни Коэффициент пропорциональности h получил название **постоянной Планка.**

Предположение Планка фактически означало, что законы классической физики совершенно неприменимы к явлениям микромира.

Разработанная Планком теория теплового излучения превосходно согласовывалась с экспериментом. По известному из опыта распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

После открытия Планка начала развиваться новая, самая современная и глубокая физическая теория — *квантовая теория.* Развитие её не завершено и по сей день.



М. Планк
(1858—1947)

ГЛАВА 10 СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Квантовым законам подчиняется поведение всех микрочастиц. Но впервые квантовые свойства материи были обнаружены именно при исследовании излучения и поглощения света.

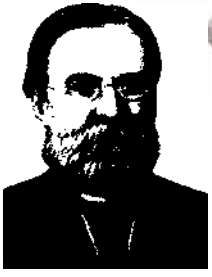
§ 69 ФОТОЭФФЕКТ

Вспомните распределение молекул газа по скоростям.
Для чего было введено понятие средней квадратичной скорости?

Интересно Г. Герц в 1886 г. обнаружил явление электризации металлов при их освещении.

В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Явление это получило название фотоэффекта.

Запомни **Фотоэффект** — это явление вырывания электронов из вещества под действием падающего на него света.



А. Г. Столетов (1839—1896)

Наблюдение фотоэффекта. Для обнаружения фотоэффекта на опыте можно использовать электроскоп с присоединённой к нему цинковой пластиной (рис. 10.1). Если зарядить пластину положительно, то её освещение, например электрической дугой, не влияет на быстроту разрядки электроскопа. Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает электроскоп очень быстро.

Объяснить это можно так. Свет вырывает электроны с поверхности пластины. Если пластина заряжена отрицательно, вылетевшие с поверхности электроны отталкиваются от неё, и электроскоп разряжается. При положительном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электроскопа в этом случае не изменяется.

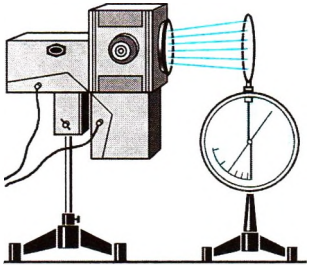


Рис. 10.1

Однако когда на пути света поставлено обыкновенное стекло, отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, какова бы ни была интенсивность излучения. Так как известно, что стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, то из этого опыта можно заключить: именно ультрафиолетовый участок спектра, т. е. волна с большой частотой, вызывает фотоэффект. Этот простой факт

нельзя объяснить на основе волновой теории света. Ведь непонятно, почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если амплитуда этих волн велика и, следовательно, велика энергия, передаваемая электроном.

Законы фотоэффекта. Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно было выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия. С этой целью были продолжены экспериментальные исследования.

Как действует электромагнитная волна на электроны металла? Как должны зависеть энергия и частота колебаний электронов от параметров волны?

В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещают два электрода (рис. 10.2). Внутрь баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое окошко, прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На электроды подают напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром.

К освещаемому электроду присоединяется отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода. Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока возрастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестаёт увеличиваться (рис. 10.3).

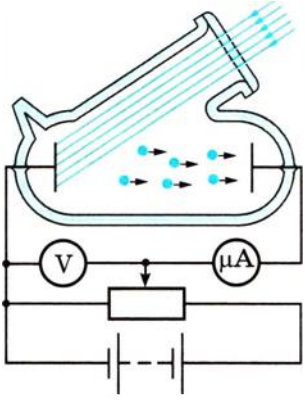


Рис. 10.2

Запомни Максимальное значение силы тока $I_н$ называется **током насыщения.** Сила тока насыщения определяется числом электронов, испускаемых за 1 с освещаемым электродом.

Изменяя в этом опыте интенсивность излучения (средний по времени световой поток через поверхность единичной площади, перпендикулярную скорости распространения световой волны), удалось установить, что число электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с при токе насыщения, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

На основании результатов этого опыта был сформулирован *первый закон фотоэффекта.*

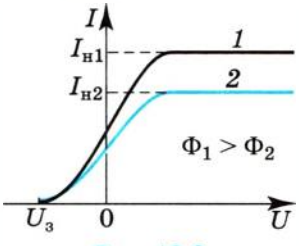


Рис. 10.3

Первый закон фотоэффекта Фототок насыщения прямо пропорционален падающему световому потоку Ф.

Какой ключ вы бы взяли и как предложили бы включить его в цепь на рисунке 10.2, чтобы можно было изменять полюса подаваемого на электроды напряжения, не отключая источник?

Теперь остановимся на измерении кинетической энергии (или скорости) электронов. Из вольт-амперной характеристики фотоэффекта, приведённой на рисунке 10.3, видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого (см. рис. 10.2) электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить подключение к цепи батареи на обратное, т. е. катод присоединить к положительному полюсу батареи, а анод к отрицательному, то сила тока уменьшится, и при некотором *задерживающем напряжении* $U_з$ обратной полярности она станет равной нулю. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.

Важно

Задерживающее напряжение $U_з$ зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют вырванные светом электроны.

Измеряя задерживающее напряжение и применяя теорему об изменении кинетической энергии (см. учебник физики для 10 класса), можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_з.$$

Подумайте, как изменится вольт-амперная характеристика фотоэффекта при увеличении или уменьшении частоты падающего излучения, если при этом световой поток не изменяется.

При изменении интенсивности света (падающего светового потока) задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Значит, не меняется кинетическая энергия электронов. С точки зрения волновой теории света этот факт непонятен. Ведь чем больше интенсивность света, тем бóльшие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля световой волны и тем бóльшая энергия, казалось бы, должна передаваться электронам.

На опытах было обнаружено, что кинетическая энергия вырываемых светом электронов зависит только от частоты света.

Второй закон фотоэффекта

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего на катод излучения и не зависит от интенсивности этого излучения.

Если частота света меньше определённой для данного вещества минимальной частоты ν_{min}, то фотоэффекта не происходит.

Все попытки объяснить экспериментально наблюдаемые зависимости при изучении фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которым свет — это электромагнитная волна, непрерывно распределённая в пространстве, оказались безрезультатными. Было абсолютно

не ясно, почему энергия фотоэлектронов определяется только частотой света и почему лишь при достаточно малой длине волны свет вырывает электроны.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идеи Планка о прерывистом испускании света.

Для объяснения законов теплового излучения, как мы знаем, М. Планк предположил, что свет испускается порциями (квантами). Энергия E каждой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте:

$$E = h\nu, \qquad (10.1)$$

где h — постоянная Планка.

В законах фотоэффекта, сформулированных на основании экспериментов, Эйнштейн увидел убедительное доказательство того, что

Важно свет имеет прерывистую структуру: излучается и поглощается отдельными порциями.

Из того, что свет излучается порциями, ещё не вытекает вывода о прерывистости структуры самого света. Ведь и минеральную воду продают в бутылках, но отсюда не следует, что вода состоит из неделимых частей.

Лишь явление фотоэффекта показало, что

Важно свет имеет прерывистую структуру: излучённая порция световой энергии $E = h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем. Поглотиться может только вся порция целиком.

Кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света $h\nu$ идёт на совершение *работы выхода* A и на сообщение электрону кинетической энергии:

$$h\nu = A + \frac{mv_m^2}{2}. \qquad (10.2)$$

Запомни **Работа выхода** — это минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул металл.

Запомни Равенство (10.2) называется **уравнением Эйнштейна.**

Заметим, что формула (10.2) справедлива для электронов, находящихся у поверхности металла. Если энергию поглощает электрон на некоторой глубине в металле, то часть поглощённой энергии теряется вследствие неизбежных столкновений электрона в веществе.

Объясним, почему свободные электроны, движущиеся с большими скоростями, не покидают металл.



Как вы думаете, почему в формуле (10.2) фигурирует максимальная кинетическая энергия электрона?

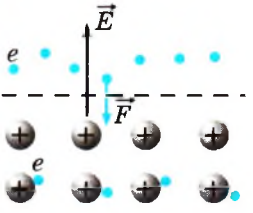


Рис. 10.4

Благодаря тепловому движению часть электронов выходит за пределы кристаллической решётки металла. Электроны, оставшиеся в металле, уходят вглубь кристаллической решётки вследствие явления электростатической индукции. Поверхностный слой оказывается заряженным положительно. Образуется так называемый двойной электрический слой, напряжённость поля которого направлена вверх (рис. 10.4). На электрон, вылетевший из металла и попавший в область поля, действует сила, возвращающая его назад. Только электроны, имеющие достаточно большую энергию, могут преодолеть это поле и покинуть металл. Обычно этого не происходит. Именно поэтому электрону надо сообщить дополнительную энергию, которую и несёт порция электромагнитного излучения.

Уравнение (10.2) объясняет основные факты, касающиеся фотоэффекта. Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии $h\nu$ в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла. Скорость v_m электронов согласно формуле (10.2) определяется только частотой ν света и работой выхода A, зависящей от типа металла и состояния его поверхности. От интенсивности света скорость не зависит.

Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота ν света больше некоторого минимального значения ν_{min}. Ведь для того, чтобы электрон мог выйти из металла, необходимо, чтобы электрон обладал энергией, равной работе выхода. Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы или равна ей:

$$h\nu \geqslant A.$$

В последнем случае энергия вырванного электрона равна нулю, но поле, созданное между электродами, его ускорит, и электрон долетит до анода, фототок будет отличен от нуля.

Запомни Предельную частоту ν_{min} и предельную длину волны λ_{max} называют **красной границей фотоэффекта.**

Они выражаются так:

$$\nu_{min} = \frac{A}{h}, \qquad \lambda_{max} = \lambda_{кр} = \frac{hc}{A}, \tag{10.3}$$

где λ_{max} ($\lambda_{кр}$) — максимальная длина волны, при которой фотоэффект ещё наблюдается.

Это название связано со световыми волнами, так как максимальная длина волны видимого света соответствует *красному* цвету.

Работа выхода A зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота ν_{min} фотоэффекта (красная граница) для разных веществ различна.

Обсудите причину того, что фототок идёт по цепи и в том случае, когда напряжение между катодом и анодом равно нулю.

Третий закон фотоэффекта

Для каждого вещества существует максимальная длина волны падающего на него излучения, при которой фотоэффект ещё наблюдается. При бóльших длинах волн излучения фотоэффекта нет.

Для цинка красной границе соответствует длина волны $\lambda_{max} = 3{,}7 \cdot 10^{-7}$ м (ультрафиолетовое излучение).

Подумайте, как можно измерить кинетическую энергию электронов.

Именно этим объясняется опыт по прекращению фотоэффекта с помощью стеклянной пластинки, поставленной на пути луча и задерживающей ультрафиолетовые лучи. Работа выхода у алюминия или железа больше, чем у цинка. У щелочных металлов работа выхода, напротив, меньше, а длина волны λ_{max}, соответствующая красной границе, больше. Так, для натрия $\lambda_{max} = 6{,}8 \cdot 10^{-7}$ м.

Пользуясь уравнением Эйнштейна (10.2), можно найти постоянную Планка h. Для этого нужно экспериментально определить частоту ν света, работу выхода A и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов.

Подобные измерения и расчёты дают $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Точно такое же значение было найдено и самим Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления — теплового излучения.

Важно

Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами, дополнительно подтверждает правильность предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

Интересно

А. Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии за работы по теории фотоэффекта.

Мы рассмотрели явление *внешнего фотоэффекта*. Помимо этого явления, наблюдается *внутренний фотоэффект* в диэлектриках и полупроводниках, который заключается в том, что при поглощении света увеличивается их проводимость (фоторезисторы).

Фотоэффект. Красная граница фотоэффекта. Работа выхода — Найти

1. Чему равна постоянная Планка?
2. В чём состоят основные законы фотоэффекта?
3. Какие факты свидетельствуют о наличии у света корпускулярных свойств?
4. Что такое красная граница фотоэффекта?

§ 70 ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

В чём состоит явление фотоэффекта?
Можно ли разделить заряды с помощью фотоэффекта?

Открытие фотоэффекта имело очень большое значение для более глубокого понимания природы света. Но ценность науки состоит не только в том, что она выясняет сложное и многообразное строение окружающего нас мира, но и в том, что она даёт нам в руки средства, используя которые можно совершенствовать производство, улучшать условия материальной и культурной жизни общества.

С помощью фотоэффекта «заговорило» кино, стала возможной передача движущихся изображений (телевидение). Применение фотоэлектронных приборов позволило создать станки, которые без участия человека изготовляют детали по заданным чертежам. Приборы, действие которых основано на фотоэффекте, контролируют размеры изделий лучше человека, вовремя включают и выключают маяки и уличное освещение и т. п.

Всё это оказалось возможным благодаря изобретению особых устройств — *фотоэлементов*, в которых энергия света управляет энергией электрического тока или преобразуется в неё.

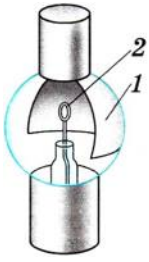


Рис. 10.5

Вакуумные фотоэлементы. Одним из первых применений фотоэффекта было создание вакуумных фотоэлементов. Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта тонким слоем металла с малой работой выхода (рис. 10.5). Это катод *1*. Через прозрачное окошко свет проникает внутрь колбы.

В её центре расположена проволочная петля или диск — анод *2*, который служит для улавливания фотоэлектронов. Анод присоединяют к положительному полюсу батареи. Фотоэлементы реагируют на видимое излучение и даже на инфракрасные лучи. При попадании света на катод фотоэлемента в цепи возникает электрический ток, который включает или выключает реле. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество различных «видящих» автоматов. Одним из них является автомат в метро. Он срабатывает (выдвигает перегородку) при пересечении светового пучка, если предварительно не оплачен проезд.

Подобные автоматы могут предотвращать аварии. На заводе фотоэлемент почти мгновенно останавливает мощный пресс, если рука человека оказывается в опасной зоне. С помощью фотоэлементов воспроизводится звук, записанный на киноплёнке.

В наши дни вакуумный фотоэлемент редко встречается в аппаратах и приборах. Внешний фотоэффект до сих пор используется в фотоумножителях — приборах, в которых слабый световой сигнал преобразуется в электрический ток.

Полупроводниковые фотоэлементы. На явлении *внутреннего фотоэффекта* в полупроводниках основано устройство фоторезисторов — приборов. сопротивление которых, как мы уже говорили, зависит от освещённости.

Вспомните, от чего зависит собственная проводимость полупроводников.

Кроме того, сконструированы полупроводниковые фотоэлементы, создающие ЭДС и непосредственно преобразующие энергию излучения в энергию электрического тока. ЭДС, называемая в данном случае фотоЭДС, возникает в области p—n-перехода двух полупроводников при облучении этой области светом.

Вспомните, где вы видели солнечные батареи, как они используются. Есть ли у вас прибор, в котором находится солнечная батарея?

Под действием света образуются пары электрон — дырка. В области p—n-перехода существует электрическое поле. Это поле заставляет неосновные носители полупроводников перемещаться через контакт. Дырки из полупроводника n-типа перемещаются в полупроводник p-типа, а электроны из полупроводника p-типа — в область n-типа, что приводит к накоплению основных носителей в полупроводниках n- и p-типов. В результате потенциал полупроводника p-типа увеличивается, а n-типа уменьшается. Это происходит до тех пор, пока ток неосновных носителей через p—n-переход не сравняется с током основных носителей через этот же переход. Между полупроводниками устанавливается разность потенциалов, равная фотоЭДС.

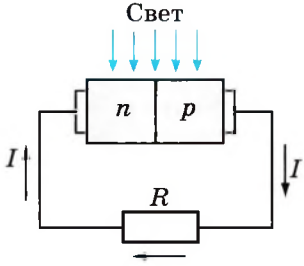


Рис. 10.6

Если замкнуть цепь через внешнюю нагрузку, то в цепи пойдёт ток, определяемый разностью токов неосновных и основных носителей через p—n-переход (рис. 10.6). Сила тока зависит от интенсивности падающего света и сопротивления нагрузки R. Фотоэлементы с p—n-переходом создают ЭДС порядка 1—2 В. Их выходная мощность достигает сотен ватт при коэффициенте полезного действия до 20 %.

Фотоэлементы малой мощности используются, например, в фотоэкспонометрах.

Множество соединённых последовательно p—n-переходов образуют солнечную батарею. Солнечные батареи используются на космических кораблях и спутниках для питания электроприборов (рис. 10.7). Кроме этого, в настоящее время солнечные батареи стали широко использоваться в быту как альтернативные источники электроэнергии.

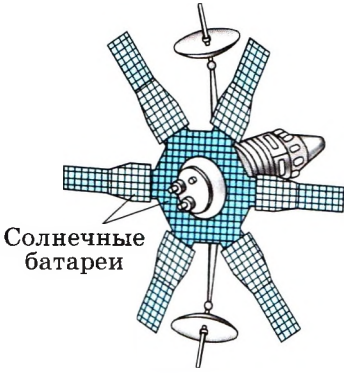


Рис. 10.7

§ 71 ФОТОНЫ. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Вспомните свойства частиц и связь энергии и массы в теории относительности.

В современной физике фотон рассматривается как безмассовая элементарная частица.

Энергия и импульс фотона. При испускании и поглощении свет ведёт себя подобно потоку частиц с энергией $E = h\nu$, зависящей от частоты. Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей.

Запомни Свойства света, обнаруживаемые при его излучении и поглощении, назвали **корпускулярными.** Сама же световая частица была названа **фотоном** или **квантом электромагнитного излучения.**

Вспомните, что такое модель физического явления и как создаются модели.

Фотон, подобно частице, обладает определённой порцией энергии $h\nu$. Энергию фотона часто выражают не через частоту ν, а через циклическую частоту $\omega = 2\pi\nu$. При этом в формуле для энергии фотона в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины h используют величину $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (читается: аш с чертой), равную, по современным данным, $1{,}0545726 \cdot 10^{-34}$ Дж · с (последние два знака в первом сомножителе определены с точностью до ± 40). Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \qquad (10.4)$$

Согласно теории относительности энергия всегда связана с массой соотношением $E = mc^2$. Так как энергия фотона равна $h\nu$, то, следовательно, его масса m получается равной:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \qquad (10.5)$$

У фотона нет массы покоя, он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость c. Масса, определяемая формулой (10.5), — это масса движущегося фотона. По известной массе и скорости фотона можно найти его импульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \qquad (10.6)$$

Интересно В своих замечательных опытах С. И. Вавилов установил, что человеческий глаз, этот точнейший из «приборов», способен реагировать на различие освещённостей, измеряемое единичными квантами.

Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча.

Чем больше частота ν, тем больше энергия E и импульс p фотона и тем отчётливее проявляются корпускулярные свойства света. Из-за того что постоянная Планка мала, энергия

фотонов видимого излучения крайне незначительна. Фотоны, соответствующие зелёному свету, имеют энергию $3{,}5 \cdot 10^{-19}$—$4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Интересно Корпускулярно-волновой дуализм — общее свойство материи, проявляющееся на микроскопическом уровне.

Корпускулярно-волновой дуализм. Законы теплового излучения и фотоэффекта можно объяснить только на основе представления, согласно которому свет — это поток частиц-фотонов. Однако явления интерференции и дифракции света свидетельствуют и о волновых свойствах света. Свет обладает, таким образом, своеобразным *дуализмом* (двойственностью) свойств. При распространении света проявляются его волновые свойства, а при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении) — корпускулярные.

Обсудите, чем различаются свойства волны и частицы и что между ними общего.

Мы не имеем возможности представлять себе наглядно в полной мере процессы в микромире, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые люди наблюдали на протяжении миллионов лет и основные законы которых были сформулированы к концу XIX в.

Свет оказался очень сложным явлением. Мы не в силах наглядно представить сочетание волновых и корпускулярных свойств в одном объекте, так как волна и частица имеют разные свойства. Следует просто смириться с тем, что волновые и корпускулярные свойства — это различные стороны природы света, которые мы хотим объяснить на основе известных нам моделей.

Опыты Вавилова. Свет выглядит непрерывным потоком, если интенсивность его достаточно велика. Квантовые свойства света должны проявляться тогда, когда невелики интенсивность и время излучения, т. е. наблюдаются отдельные вспышки.

В 20-е г. XX в. советский физик Сергей Иванович Вавилов провёл интересные эксперименты с целью проверки утверждения о наличии у света квантовых свойств. Группа С. И. Вавилова занималась в то время исследованием поглощения и испускания света элементарными молекулярными системами.

Опыты состояли в следующем. Перед наблюдателем ставили вращающийся диск с маленьким отверстием. За диском размещался молекулярный источник света, интенсивность (яркость) излучения которого можно было регулировать. При ярком свете наблюдатель через отверстие во вращающемся диске каждый раз видел вспышку. При уменьшении интенсивности излучения наблюдатель видел вспышку не каждый раз. Чем меньше была интенсивность, тем меньше вспышек видел наблюдатель.

Это свидетельствовало о том, что свет не является сплошным потоком. Излучение отдельным атомом или молекулой кратковременно. При большой интенсивности число излучаемых частиц света (квантов) велико и растянуто во времени. При снижении интенсивности уменьшается число излучаемых квантов и существует большая вероятность того, что выстреливаемые атомами кванты не пройдут через отверстие.

Интересно Н. Бор сформулировал *принцип дополнительности*, согласно которому для объяснения эксперимента следует использовать одну из моделей света, но нельзя использовать их одновременно.

Гипотеза де Бройля. Если с электромагнитным полем длительное время связывалось представление о материи, непрерывно распределённой в пространстве, то электроны, напротив, представлялись как некоторые крохотные комочки материи. Это подчёркивалось уже самим названием «частица», постоянно присутствующим рядом со словом «электрон».

Не допускаем ли мы здесь ошибки, обратной той, которая была сделана со светом? Может быть, электрон и другие частицы обладают также и волновыми свойствами? Такую необычную мысль высказал в 1923 г. французский учёный Луи де Бройль.

Предположив, что с движением частиц связано распространение некоторых волн, де Бройль сумел найти длину волны этих волн. Связь длины волны с импульсом частицы оказалась точно такой же, как и у фотонов (см. формулу (10.6)). Если длину волны обозначить через λ, а импульс — через p, то

$$\lambda = \frac{h}{p}. \qquad (10.7)$$

Эта знаменитая формула для *длины волны де Бройля* — одна из основных в физике микромира.

Предсказанные де Бройлем волновые свойства частиц впоследствии были обнаружены экспериментально. Наблюдалась, в частности, дифракция электронов и других частиц на кристаллах. В этих случаях получалась картина, подобная той, которая характерна для рентгеновских лучей, причём справедливость формулы де Бройля (10.7) была доказана экспериментально.

Принцип неопределённости Гейзенберга. Экспериментально обнаруженная дифракция частиц привела нас к тому же положению, как и при рассмотрении оптических явлений. При определённых условиях частицы проявляют волновые свойства, а раз так, то уже нельзя говорить об определённых траекториях частиц. Вспомним аналогичную ситуацию в оптике, мы наблюдаем нарушение закона прямолинейного распространения света при огибании волной препятствия.

Важно **Принцип неопределённости Гейзенберга** указывает на то, что невозможно с абсолютной точностью одновременно определить и положение, и импульс частицы.

Обсудите с одноклассниками, почему при рассмотрении движения макрообъектов, например человека или машины, мы не учитываем принцип неопределённости.

Чем точнее мы определяем координату частицы, тем больше мы ошибаемся при определении её импульса:

$$\Delta x \Delta p_x \geqslant \frac{h}{2\pi},$$

где Δx — неопределённость значения координаты x, а Δp_x — неопределённость значения проекции её импульса.

Данное соотношение справедливо для любой координаты частицы. Попытаемся объяснить его.

Предположим, мы хотим определить положение микрочастицы. Для этого поставим на её пути перпендикулярно скорости щель шириной Δx. Мы знаем,

что до щели проекция импульса частицы на ось, перпендикулярную её скорости, равна нулю, но абсолютно не знаем, где она находится. Однако когда мы её обнаруживаем в щели, проекция импульса имеет неопределённые значения вследствие явления дифракции. Чем у́же мы сделаем щель, т. е. чем точнее мы определим x, тем больше будет проявляться дифракция и тем менее точно мы будем знать значение проекции импульса.

В дальнейшем подробные вычисления позволили Гейзенбергу получить ещё одно соотношение: $\Delta E \Delta t \geqslant \frac{h}{2\pi}$ — и сформулировать ещё одно утверждение:

Важно энергия микрочастицы может быть определена с точностью ΔE в течение промежутка времени $\Delta t \approx \frac{h}{2\pi \Delta E}$.

Эти необычные свойства микрообъектов описываются с помощью ***квантовой механики*** — современной теории движения микрочастиц. Механика Ньютона здесь в большинстве случаев неприменима.

Фотон. Корпускулярно-волновой дуализм. Волна де Бройля

Найти

1. Как определить энергию, массу и импульс фотона, зная частоту световой волны?
2. Что понимается под словами *корпускулярно-волновой дуализм*?
3. Можно ли сказать, что электрон обладает волновыми свойствами?
4. Приведите экспериментальное доказательство существования волн де Бройля.
5. Перечислите явления, объясняемые с точки зрения волновой теории, и явления, подтверждающие квантовые свойства света.

1. Чему равна энергия фотона, соответствующая световой волне частотой $6{,}3 \cdot 10^{14}$ Гц?
1) 10^{-27} Дж 2) $1{,}35 \cdot 10^{23}$ Дж 3) $3 \cdot 10^{-19}$ Дж 4) $4{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж

2. Модуль импульса фотона в первом пучке света в 2 раза больше, чем во втором. Отношение частоты света первого пучка к частоте второго равно
1) 1 2) 2 3) $\sqrt{2}$ 4) 1/2

3. Два источника света излучают волны, длины волн которых $\lambda_1 = 3{,}75 \cdot 10^{-7}$ м и $\lambda_2 = 7{,}5 \cdot 10^{-7}$ м. Чему равно отношение импульсов p_1/p_2 фотонов, излучаемых первым и вторым источниками?
1) 1/4 2) 2 3) 1/2 4) 4

4. Электрон и протон движутся с одинаковыми скоростями. У какой из этих частиц бóльшая длина волны де Бройля?
1) у электрона
2) у протона
3) длины волн этих частиц одинаковы
4) частицы нельзя характеризовать длиной волны

5. Электроны пролетают через щель шириной $\Delta x = 0{,}1$ мм. Неопределённость при определении их импульса равна
1) $\approx 10^{-30}$ кг·м/с 2) $\approx 6{,}63 \cdot 10^{-33}$ кг·м/с 3) $\approx 10^{-31}$ кг·м/с 4) $\approx 6{,}63 \cdot 10^{-30}$ кг·м/с

§ 72 ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЕТА

Вспомните структуру электромагнитной волны.
Как волна действует на заряженную частицу?

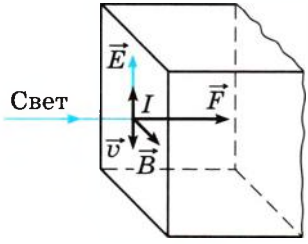


Рис. 10.8

Давление света. Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствия.

Под действием электрического поля волны, падающей на поверхность тела, например металла, свободный электрон движется в сторону, противоположную вектору $\vec{E}$ (рис. 10.8). На движущийся электрон действует сила Лоренца $\vec{F}$, направленная в сторону распространения волны.

Важно Суммарная сила, действующая на электроны поверхности металла, и определяет *силу светового давления*.

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Многие учёные пытались это сделать, но безуспешно, так как световое давление очень мало. В яркий солнечный день на поверхность площадью 1 м^2 действует сила, равная всего лишь $4 \cdot 10^{-6}$ Н.

Впервые давление света измерил русский физик Пётр Николаевич Лебедев в 1900 г. Прибор Лебедева состоял из очень лёгкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были приклеены лёгкие крылышки, с одной стороны зеркальные, отражающие свет, с другой стороны зачернённые, в основном поглощающие свет (рис. 10.9). Свет падал на крылышки от дуговой лампы.


П. Н. Лебедев
(1866—1912)

Вследствие того что крылышки по-разному отражали и поглощали свет, на стерженёк действовал момент сил, определяющий закручивание нити.

Трудности точного измерения давления света были связаны с невозможностью выкачать из сосуда весь воздух. Неодинаковый нагрев крылышек и стенок сосуда приводит к возникновению конвективных потоков оставшегося в сосуде воздуха и вследствие этого дополнительных вращающих моментов. Кроме того, на закручивание нити влияет тот факт, что сторона крылышек, обращённая к источнику света, нагревается сильнее, чем противоположная сторона. Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны.

Интересно Имя П. Н. Лебедева носит физический институт РАН (ФИАН).

Лебедев сумел преодолеть все эти трудности, несмотря на низкий

уровень экспериментальной техники того времени, взяв очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. В конце концов существование светового давления на твёрдые тела было доказано. Оно даже было измерено. Полученное значение совпало с предсказанным Максвеллом.

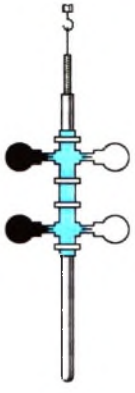


Рис. 10.9

Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину светового давления. Фотоны, подобно частицам вещества, имеющим массу покоя, обладают импульсом.

При отражении изменение импульса фотона в 2 раза больше изменения импульса фотона при поглощении. Согласно второму закону Ньютона изменение импульса равно импульсу подействовавшей на фотон силы. Точно такой же по модулю импульс передаётся крылышку, отразившему или поглотившему фотон.

Суммарный момент сил, действующих на прибор, отличен от нуля, и нить закручивается.

Докажите, что импульс силы, действующей на поверхность при отражении фотона, в 2 раза больше, чем при поглощении фотона.

Интересно

Лебедеву удалось осуществить ещё один очень тонкий эксперимент: измерить давление света на газы.

Опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство существования давления света и того, что фотоны обладают импульсом.

Расчёты силы давления света на основе фотонной и электромагнитной теорий света дают одинаковые результаты.

Хотя световое давление очень мало в обычных условиях, его действие тем не менее может оказаться существенным. Внутри звёзд при температуре в несколько десятков миллионов кельвинов давление электромагнитного излучения должно достигать громадных значений. Силы светового давления наряду с гравитационными силами играют значительную роль во внутризвёздных процессах.

Какое из объяснений светового давления, на основе фотонной или электромагнитной теории света, кажется вам более очевидным?

Химическое действие света. Отдельные молекулы поглощают световую энергию порциями — квантами $h\nu$. В случае видимого и ультрафиолетового излучений эта энергия достаточна для расщепления многих молекул. В этом проявляется химическое действие света.

Запомни

Под действием света происходят химические реакции, которые называются **фотохимическими**.

Фотохимические реакции определяют восприятие глазом света. Поглощение фотона в светочувствительной клетке сетчатки глаза приводит к разложению родопсина (молекулы белка). При этом процессе возникает сигнал, передаваемый по нервным волокнам мозгу. Родопсин в темноте

Интересно Любое превращение молекул есть химический процесс. Выцветание тканей на солнце и образование загара — это примеры химического действия света.

восстанавливается, и клетки сетчатки глаза снова могут реагировать на свет.

Важнейшие химические реакции под действием света происходят в зелёных листьях деревьев и траве, в иглах хвои, во многих микроорганизмах. В зелёном листе под действием Солнца осуществляются процессы, необходимые для жизни на Земле. Они дают нам не только пищу, но и кислород для дыхания.

Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Происходит это, как установил русский биолог Климент Аркадьевич Тимирязев, в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Пристраивая к углеродной цепочке атомы других элементов, извлекаемых корнями из земли, растения строят молекулы белков, жиров и углеводов.

Вспомните, как явление фотосинтеза объясняли на уроках биологии.

Всё это происходит за счёт энергии солнечных лучей. Причём здесь особенно важна не только сама энергия, но и та форма, в которой она поступает. Фотосинтез (так называют этот процесс) может протекать только под действием света определённого спектрального состава.

Механизм фотосинтеза ещё не выяснен до конца. Когда это произойдёт, для человечества, возможно, наступит новая эра. Белки и другие сложные органические вещества можно будет получать на фабриках под голубым небосводом.

Давление света. Фотосинтез. Фотохимические реакции — Найти

1. Дайте объяснение давления света на основе волновой теории света.
2. Как объяснить давление света на основе квантовой теории света?
3. Какой свет — красного или фиолетового цвета — оказывает большее давление на идеально отражающую поверхность?
4. Какие реакции называются фотохимическими?
5. Что такое фотосинтез?

§ 73 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ФОТОЭФФЕКТ»

Решение задач на законы фотоэффекта в основном требует использования уравнения Эйнштейна для фотоэффекта, в которое входит такое понятие, как работа выхода. Обратите внимание на то, что в правой части уравнения Эйнштейна только работа выхода постоянна, а кинетическая энергия и соответственно задерживающее напряжение зависят от частоты падающего излучения.

Работа выхода определяется свойствами данного вещества, поэтому её значение можно найти в таблице.

Рассматривая свет как поток частиц, мы объясняем давление света изменением импульса падающего на поверхность фотона и делаем расчёты согласно законам классической механики.

При решении задач на химическое действие света учтите, что при превращении углекислого газа в кислород под действием света (фотосинтез) поглощается определённая энергия, а при обратном превращении энергия выделяется.

Задача 1. Определите массу фотона красного света, длина волны которого $\lambda = 6{,}3 \cdot 10^{-5}$ см.

Р е ш е н и е. Согласно теории относительности Эйнштейна энергия и масса связаны соотношением $E = mc^2$.

Энергия фотона $E = mc^2 = \frac{hc}{\lambda}$, откуда $m = \frac{h}{c\lambda} = 3{,}5 \cdot 10^{-36}$ кг.

Задача 2. На рисунке 10.10, *а* показана вольт-амперная характеристика фотоэффекта. Начертите вольт-амперные характеристики: 1) при увеличении частоты падающего излучения; 2) при увеличении падающего светового потока.

Р е ш е н и е. 1) При увеличении частоты растёт скорость электронов и соответственно увеличивается задерживающее напряжение. При том же световом потоке сила тока насыщения остаётся прежней (рис. 10.10, *б*, кривая *1*).

2) При увеличении падающего светового потока и при той же частоте растёт ток насыщения, задерживающее напряжение остаётся прежним (рис. 10.10, *б*, кривая *2*).

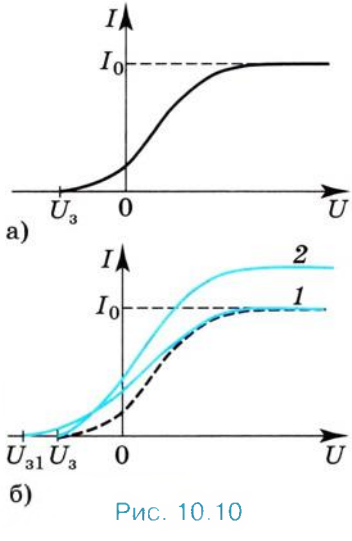


Рис. 10.10

Задача 3. Отрицательно заряженная цинковая пластинка освещалась монохроматическим светом длиной волны 300 нм. Красная граница для цинка — $\lambda_{кр} = 332$ нм. Какой максимальный потенциал приобретёт цинковая пластинка?

Р е ш е н и е. Согласно формуле Эйнштейна $\frac{mv_{max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_{вых}$.

Максимальный потенциал цинковой пластинки $U_з$ определяется из выражения $\frac{mv_{max}^2}{2} = q_e U_з$ (условие прекращения фототока):

$$U_з = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A_{вых}}{q_e} = \frac{hc}{q_e}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{кр}}\right) = 0{,}4 \text{ В}.$$

Задача 4. Покажите, что свободный электрон не поглощает фотон.

Р е ш е н и е. В металле электрон, строго говоря, не является свободным, так как он взаимодействует с ионами кристаллической решётки и с другими электронами, обеспечивающими проводимость металла. Поэтому система электрон—фотон не является замкнутой. Если же электрон — отдельная частица, то при его взаимодействии с фотоном должны выполняться законы сохранения импульса и энергии. Предположим, что свободный покоящийся электрон поглотил фотон. По закону сохранения энергии энергия электрона равна энергии фотона:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2}, \qquad (1)$$

где ν — частота электромагнитной волны, m — масса электрона, v — его скорость.

Система фотон—электрон — изолированная система, и закон сохранения импульса для неё имеет вид

$$\frac{h\nu}{c} = mv. \qquad (2)$$

Из уравнения (1) имеем $v = \sqrt{\frac{2h\nu}{m}}$, а из уравнения (2): $v = \frac{h\nu}{mc}$.

Мы получили два разных выражения для скорости электрона, откуда следует, что свободный электрон не может поглотить фотон.

Задача 5. Перпендикулярно поверхности площадью 100 см^2 каждую минуту падает энергия, переносимая светом, $W = 72$ Дж/мин. Определите световое давление в случаях: 1) свет полностью поглощается поверхностью; 2) свет полностью отражается; 3) половина падающей энергии поглощается, а половина отражается.

Р е ш е н и е. Считаем, что свет — это поток фотонов с энергией $E_ф$. Тогда число падающих за время Δt на поверхность фотонов $N = \frac{W\Delta t}{E_ф}$. Импульс фотона $p = mc = \frac{E_ф}{c}$.

1) При поглощении изменение импульса фотона $\Delta p = 0 - \frac{E_ф}{c} = -\frac{E_ф}{c}$. Изменение импульса фотона равно импульсу подействовавшей на фотон силы

$f_ф\tau = -\frac{E_ф}{c}$, соответственно импульс силы, подействовавшей на поверхность вследствие поглощения фотона, $f_п\tau = \frac{E_ф}{c}$.

За время Δt на поверхность падает N фотонов, и суммарный импульс силы, действующей на поверхность, $F_п\Delta t = N\frac{E_ф}{c} = \frac{W\Delta t}{E_ф}\frac{E_ф}{c} = \frac{W}{c}\Delta t$.

Тогда давление на стенку $p = \frac{F_п}{S} = \frac{W}{Sc} = 4 \cdot 10^{-7}$ Па.

2) В случае когда свет полностью отражается, изменение импульса падающего на поверхность фотона $\Delta p = -2\frac{E_ф}{c}$.

Давление на стенку будет в 2 раза больше: $p = 8 \cdot 10^{-7}$ Па.

3) В случае когда половина фотонов поглощается, а половина отражается:

$$F_п\Delta t = \frac{N}{2}\frac{E_ф}{c} + \frac{N}{2}\frac{2E_ф}{c} = \frac{3W\Delta t}{2E_ф}\frac{E_ф}{c} = \frac{3W}{2c}\Delta t.$$

Окончательно $p = \frac{F_п}{S} = \frac{3}{2}\frac{W}{Sc} = 6 \cdot 10^{-7}$ Па.

Задача 6. Известно, что на превращение одной молекулы углекислого газа в кислород и углеводород необходимо 9 фотонов. Хлорофилл лучше всего поглощает падающие на растение волны в диапазоне длин волн от 650 до 700 нм. Определите КПД фотосинтеза. При обратной химической реакции выделяется энергия, равная 4,9 эВ на одну молекулу.

Р е ш е н и е. Возьмём среднее значение длины волны в указанном диапазоне $\lambda = 675$ нм. Энергия фотона $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$.

Тогда падающая и вызывающая реакцию превращения энергия

$$E = 9h\frac{c}{\lambda} = 2{,}65 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 16{,}5 \text{ эВ}.$$

КПД фотосинтеза $\eta = (4{,}9/16{,}5) \cdot 100\ \% = 29{,}6\ \%$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Изобразите график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света. Как с помощью такого графика определить постоянную Планка?

2. Определите абсолютный показатель преломления среды, в которой свет с энергией фотона $E = 4{,}4 \cdot 10^{-19}$ Дж имеет длину волны $\lambda = 3{,}0 \cdot 10^{-7}$ м.

3. Определите энергию фотона, соответствующую длине волны $\lambda = 5{,}0 \cdot 10^{-7}$ м.

4. Определите энергию и массу фотонов, соответствующих границам видимого спектра (длины волн 0,76 мкм и 0,38 мкм).

5. Определите длину волны ультрафиолетового света, падающего на пластинку из цинка, если скорость вылетающих из неё электронов равна 2000 км/с. Работа выхода электронов из цинка равна $6{,}4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

6. Красная граница фотоэффекта $\lambda_{max} = 700$ нм. Отношение скоростей вылетающих электронов при освещении светом с длинами волн λ_1 и λ_2 равно 3/4. Определите λ_2, если $\lambda_1 = 600$ нм.

7. Какой максимальный заряд приобретает золотой шарик радиусом $r = 0{,}1$ м при освещении его поверхности светом с длиной волны $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$ м? Работа выхода электронов из золота 4,59 эВ.

8. Определите давление света на стенки электрической лампочки мощностью 100 Вт. Диаметр колбы лампы 5 см. Стенки лампы пропускают 85 % излучаемого спиралью света, остальное поглощают. Считайте, что на излучение идёт 9 % потребляемой лампой мощности.

1. Чему равна максимальная скорость фотоэлектронов, вылетающих с поверхности цезия под действием света с длиной волны $\lambda = 500$ нм, если красная граница фотоэффекта для цезия соответствует $\lambda_{кр} = 620$ нм?

2. Фотон с длиной волны, соответствующей красной границе фотоэффекта, выбивает электрон из металлической пластинки (катода) в сосуде, из которого откачан воздух. Электрон разгоняется однородным электрическим полем с напряжённостью $E = 5 \cdot 10^4$ В/м. Какой должна быть длина пути электрона s в электрическом поле, чтобы он разогнался до скорости, составляющей 10 % от скорости света в вакууме? Релятивистские эффекты не учитывайте.

3. Для разгона космических аппаратов и коррекции их орбит предложено использовать солнечный парус — скреплённый с аппаратом лёгкий экран большой площади из тонкой плёнки, которая зеркально отражает солнечный свет. Определите ускорение, сообщаемое аппарату массой 500 кг (включая массу паруса), если парус имеет форму квадрата размерами 100 × 100 м. Мощность солнечного излучения, падающего на 1 м^2 поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, составляет 1370 Вт/м^2.

ЕГЭ

Повторите материал главы 10 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Различные свойства света»

1. Корпускулярно-волновой дуализм. Эффект Комптона.
2. Фотоэффект и его применение при создании солнечных батарей как альтернативных источников энергии.
3. Фотосинтез с точки зрения физики, химии и биологии. Определяющая роль фотосинтеза для жизни на Земле.
4. История фотографии. Современный подход к получению изображения.

«Проектирование установки, основанной на фотоэффекте, обеспечивающей безопасность человека при работе на мощном прессе»

ГЛАВА 11 АТОМНАЯ ФИЗИКА

Открытие сложного строения атома — важнейший этап становления современной физики, наложивший отпечаток на всё её дальнейшее развитие. В процессе создания количественной теории строения атома, позволившей объяснить атомные спектры, были открыты новые законы движения микрочастиц — законы квантовой механики.

§ 74 СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА

Из каких частиц состоит атом?
Вспомните, что вам известно об атоме, какие вещества излучают линейчатый спектр.

В начале XX в. было известно, что: 1) в состав атома входят электроны; 2) атом электронейтрален; 3) атом устойчив; 4) спектр атома состоит из отдельных линий (линейчатый спектр).

Последнее свойство особенно важно, так как явилось ключом к построению модели атома. В 1885 г. Дж. Бальмером было показано, что в видимой части спектра атома водорода имеются четыре линии, соответствующие длинам волн 656, 486, 434 и 410 нм. На основе экспериментальных данных им была получена формула, по которой можно было вычислять значения этих частот (длин волн) в видимой части спектра атома:

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

где m — целое число, $m > 2$, R — постоянная величина, называемая *постоянной Ридберга*, $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}$ 1/с.

Линии в ультрафиолетовой области спектра были обнаружены в 1904 г. Т. Лайманом. Частоты этой серии линий можно определить по формуле

$$\nu = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{k^2}\right), \; k > 1.$$

В инфракрасной области спектра атома водорода, как показали исследования Ф. Пашена (1908), частоты можно определить по аналогичной формуле:

$$\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m > 3.$$

Напишите формулу Бальмера—Ридберга для вычисления длин волн, соответствующих линиям спектра атома водорода.

Была предложена формула, обобщающая полученные результаты, объединяющая все линии спектра атома, — формула Бальмера—Ридберга:

$$\nu = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right), \; m > n.$$

Модель Томсона. Не сразу учёные пришли к правильным представлениям о строении атома. Первая модель атома была предложена английским физиком Дж. Дж. Томсоном, открывшим электрон. По мысли Томсона, положительный заряд атома занимает весь объём атома и распределён в этом объёме с постоянной плотностью. Простейший атом — атом водорода — представляет собой положительно заряженный шар радиусом около 10^{-8} см, внутри которого находится электрон. У более сложных атомов в положительно заряженном шаре находится несколько электронов, так что атом подобен кексу, в котором роль изюминок выполняют электроны.

Интересно Теорему о том, что система электрических зарядов не может находиться в состоянии устойчивого равновесия лишь под действием электростатических сил, сформулировал и доказал в XIX в. английский физик С. Ирншоу.

Однако модель атома Томсона оказалась в полном противоречии с известными уже к тому времени свойствами атома, одним из которых является *устойчивость*.

Нарисуйте систему трёх зарядов, находящихся в состоянии равновесия. Сместите один из них, нарисуйте силы, действующие на заряды, и убедитесь в том, что под действием этих сил заряды не вернутся в прежнее положение.

Известно, что система электрических зарядов не может находиться в состоянии устойчивого равновесия лишь под действием электростатических сил. Томсон это понимал, поэтому впоследствии предположил, что электроны в атоме движутся по замкнутым траекториям.



Э. Резерфорд (1871—1937)

Опыты Резерфорда. Масса электронов в несколько тысяч раз меньше массы атомов. Так как атом в целом нейтрален, то, следовательно, основная масса атома приходится на его положительно заряженную часть.

Для экспериментального исследования распределения положительного заряда, а значит, и массы внутри атома Эрнест Резерфорд предложил в 1906 г. применить зондирование атома с помощью α-частиц. Эти частицы возникают при распаде радия и некоторых других элементов. Их масса примерно в 8000 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен по модулю удвоенному заряду электрона. Это не что иное, как полностью ионизированные атомы гелия. Скорость α-частиц очень велика: она составляет 1/15 скорости света.

Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжёлых элементов. Электроны вследствие своей малой массы не могут заметно изменить траекторию α-частицы, подобно тому как камушек в несколько десятков граммов при столкновении с автомобилем не может значительно изменить его скорость.

Рассеяние (изменение направления движения) α-частиц может вызвать только положительно заряженная часть атома. Таким образом, по рассеянию α-частиц можно определить характер распределения положительного заряда и массы внутри атома. Схема опытов Резерфорда показана на рисунке 11.1, *а*.

Радиоактивный препарат, например радий, помещался внутри свинцового цилиндра *1*, вдоль которого был высверлен узкий канал. Пучок α-частиц из канала, пройдя через отверстия в свинцовых экранах *2*, падал на тонкую фольгу *3* из исследуемого материала (золото, медь и пр.). После рассеяния α-частицы попадали на полупрозрачный экран *4*, покрытый сульфидом цинка. Столкновение каждой частицы с экраном сопровождалось вспышкой света (сцинтилляцией), которую можно было наблюдать в микроскоп *5*. Весь прибор размещался в сосуде, из которого был откачан воздух. При хорошем вакууме внутри прибора в отсутствие фольги на экране возникал светлый кружок, состоящий из вспышек, вызванных падающим на экран тонким пучком α-частиц. Но когда на пути пучка помещали фольгу, α-частицы из-за рассеяния распределялись на экране по кружку большей площади.

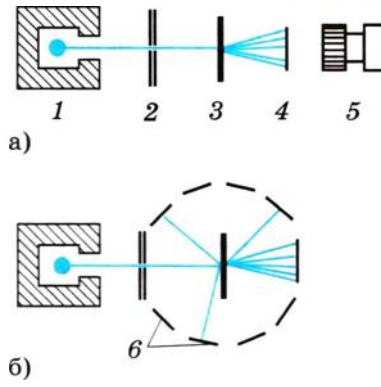


Рис. 11.1

Модифицируя экспериментальную установку, Резерфорд попытался обнаружить отклонение α-частиц на бóльшие углы. Для этого он окружил фольгу сцинтилляционными экранами *6* (рис. 11.1, *б*) и определил число вспышек на каждом экране. Совершенно неожиданно оказалось, что небольшое число α-частиц (примерно одна из двух тысяч) отклонилось на углы, бóльшие 90°. Позднее Резерфорд признался, что, предложив своим ученикам провести эксперимент по наблюдению за рассеянием α-частиц на бóльшие углы, он сам не верил в положительный результат. «Это почти столь же невероятно, — говорил Резерфорд, — как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд возвратился бы к вам и нанёс вам удар».

Резерфорд понял, что α-частица могла быть отброшена назад лишь в том случае, если положительный заряд атома и его масса сконцентрированы в очень малой области пространства. Действительно, если положительный заряд распределён по большому объёму, приблизительно равному размеру атома, то он не может создать достаточно сильное электрическое поле, способное отбросить α-частицу назад. Максимальная сила отталкивания может быть определена по закону Кулона:

$$F_{max} = k\frac{q_\alpha q}{R^2}, \qquad (11.1)$$

где q_α — заряд α-частицы; q — положительный заряд атома; R — его радиус; k — коэффициент пропорциональности. Напряжённость поля равномерно заряженного шара и соответственно сила, действующая на частицы, максимальны на поверхности шара и убывают до нуля по мере приближения к центру. Поэтому чем меньше радиус R, тем больше сила, отталкивающая α-частицы (рис. 11.2).

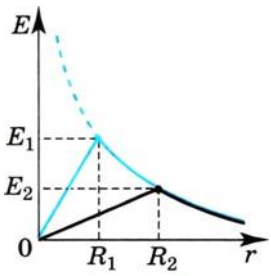


Рис. 11.2

Определение размеров атомного ядра. Анализируя результаты экспериментов, Резерфорд пришёл к мысли о существовании *атомного ядра.*

Запомни

Атомное ядро — это тело малых размеров, находящееся в центре атома, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.

Подумайте, почему в определении ядра атома говорится «почти вся масса», но «весь положительный заряд».

На рисунке 11.3 показаны траектории α-частиц, пролетающих на различных расстояниях от ядра.

Подсчитывая число α-частиц, рассеянных на различные углы, Резерфорд смог оценить размеры ядра. Оказалось, что ядро имеет диаметр порядка 10^{-12}—10^{-13} см (у разных ядер диаметры различны). Размер же самого атома 10^{-8} см, т. е. в 10—100 тысяч раз превышает размеры ядра. Впоследствии удалось определить и заряд ядра. При условии, что заряд электрона принят за единицу, заряд ядра в точности равен номеру данного химического элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.



Рис. 11.3

Планетарная модель атома. На основе своих опытов Резерфорд создал *планетарную модель атома (модель Резерфорда).*

Важно

В центре атома расположено положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома.

В целом атом нейтрален. Поэтому число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равно порядковому номеру элемента в периодической системе.

Ясно, что покоиться электроны внутри атома не могут, так как они упали бы на ядро. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон предположил, что электроны в атоме движутся.

Важно

Электроны движутся вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца, отсюда и название этой модели.

Такой характер движения электронов определяется действием кулоновских сил притяжения со стороны ядра.

В атоме водорода вокруг ядра обращается всего лишь один электрон. Ядро атома водорода имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, и массу, примерно в 1836,1 раза бóльшую массы электрона.

Запомни

Ядро водорода было названо **протоном** и стало рассматриваться как элементарная частица.

Размер атома водорода — это радиус орбиты его электрона (рис. 11.4).

Простая и наглядная планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Она кажется совершенно необходимой для объяснения опытов по рассеиванию α-частиц. Но на основе этой модели нельзя объяснить факт долгого существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с большим ускорением.

Посчитайте ускорение электрона, движущегося по орбите радиусом 10^{-8} см вокруг ядра атома водорода.

Ускоренно движущийся заряд по законам электродинамики Максвелла должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра. Излучение сопровождается потерей энергии. Теряя энергию, электроны должны постепенно приближаться к ядру, подобно тому как спутник приближается к Земле при торможении в верхних слоях атмосферы.

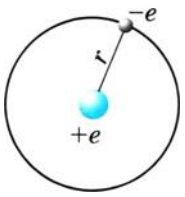


Рис. 11.4

Как показывают строгие расчёты, основанные на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, электрон за ничтожно малое время (порядка 10^{-8} с) должен упасть на ядро. Атом должен прекратить своё существование. Спектр излучения атома согласно этой модели должен быть сплошным.

В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбуждённом состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны, а если излучают, то это волны строго определённых частот.

Не согласующийся с опытом вывод о неизбежной гибели атома вследствие потери энергии на излучение — это результат применения законов классической физики к явлениям, происходящим внутри атома. Отсюда следует, что к таким явлениям законы классической физики неприменимы.

Подумайте, почему согласно планетарной модели спектр излучения атома должен быть сплошным.

Планетарная модель атома. Ядро атома

Найти

1. Могут ли отрицательно заряженные частицы атома не оказывать заметного влияния на рассеяние α-частиц?
2. Почему α-частицы не могли бы рассеиваться на большие углы, если бы положительный заряд атома был распределён по всему его объёму?
3. Какие положения планетарной модели атома не согласуются с законами классической физики?

§ 75 КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА. МОДЕЛЬ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

Какие свойства атома не описывала планетарная модель атома?
Какие свойства можно было объяснить на основе планетарной модели?



Н. Бор
(1885—1962)

Выход из крайне затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором на пути дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе.

Эйнштейн оценивал проделанную Бором работу «как высшую музыкальность в области мысли», всегда его поражавшую. Основываясь на разрозненных опытных фактах, Бор благодаря гениальной интуиции правильно предугадал путь развития теории атома.

Постулаты Бора. Последовательной теории атома Бор, однако, не разработал. Он в виде постулатов сформулировал основные положения новой теории. Причём и законы классической физики не отвергались им безоговорочно. Новые постулаты скорее налагали лишь некоторые ограничения на рассматриваемые классической физикой движения.

Успех теории Бора был тем не менее поразительным, и всем учёным стало ясно, что Бор нашёл правильный путь развития теории. Этот путь привёл впоследствии к созданию стройной теории движения микрочастиц — *квантовой механики.*

Первый постулат Бора В атоме существуют орбиты, называемые стационарными, двигаясь по которым электрон не излучает энергию.

Второй постулат Бора Излучение и поглощение энергии атомом происходит при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую. Энергия излучённого или поглощённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n, \qquad (11.2)$$

где m и n — номера стационарных электронных орбит, а E_m и E_n — энергии электрона на этих орбитах.

Если электрон переходит с более удалённой от ядра орбиты на более близкую к ядру, то при этом происходит излучение фотона, обратный переход может произойти при поглощении фотона.

Отсюда частоту излучения или поглощения можно выразить так:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h}. \qquad (11.3)$$

Согласно теории Бора энергия электрона в атоме водорода, находящегося на n-й электронной орбите, равна:

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}\frac{1}{n^2}. \qquad (11.4)$$

Если электрон обращается вокруг ядра по n-й стационарной орбите, то атом находится в стационарном состоянии, которому соответствует энергия, определяемая по формуле (11.4). Переход электрона с одной стационарной орбиты на другую согласно теории Бора — это переход атома из одного стационарного (разрешённого) состояния в другое, при этом происходит излучение или поглощение энергии.

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Первый постулат противоречит нашим представлениям о движении в классической механике, так как мы знаем, что скорость тел изменяется постепенно и может принимать любые значения. Бор вводит понятие *квантования* скоростей и орбит электрона. Это понятие явилось абсолютно новым в физике.

Важно Скорости и радиусы орбит могут изменяться не непрерывно, а имеют только определённый дискретный набор значений.

О каких особенностях движения электрона идёт речь во втором постулате Бора?

Второй постулат, так же как и первый, противоречит классической физике, и в частности электродинамике Максвелла, так как согласно этому постулату частота излучения света свидетельствует не об особенностях движения электрона (в частности, его ускорения), а лишь об изменении энергии (состояния) атома.

Важно Энергия электрона в атоме, как мы видим из формулы (11.4), так же как скорость и радиус орбиты электрона, принимает дискретный набор значений, т. е. *квантуется*.

Обсудите, какие свойства атома можно объяснить, исходя из модели атома Бора.

Свои постулаты Бор применил для построения теории простейшей атомной системы — атома водорода. Основная задача состояла в нахождении частот электромагнитных волн, излучаемых водородом. Эти частоты можно найти на основе второго постулата и правила определения стационарных значений энергии атома. Это правило (так называемое *правило квантования*) Бору опять-таки пришлось постулировать.

Модель атома водорода по Бору. Используя законы механики Ньютона и правило квантования, на основе которого определяются возможные стационарные состояния атома, Бор смог вычислить радиусы орбит электрона и энергии стационарных состояний атома. Минимальный радиус орбиты определяет размеры атома. Считается, что атом находится в основном (невозбуждённом) состоянии, если электрон находится на самой близкой к ядру

орбите ($n = 1$), при этом его энергия, как мы видим из формулы (11.4), минимальна и соответствует низшему энергетическому уровню для водорода. На рисунке 11.5 значения энергий стационарных состояний (энергий электрона в атоме водорода) отложены на вертикальной оси.

Запомни В атомной физике энергия электрона в определённом стационарном состоянии называется **энергетическим уровнем**.

При переходе электрона с одной орбиты на другую мы говорим, что он перешёл с одного энергетического уровня на другой. На рисунке 11.5 показаны возможные энергетические уровни для электрона в атоме водорода и возможные переходы электрона с одного энергетического уровня на другой. Заметим, что энергия электрона в атоме имеет отрицательное значение.

Важно Если электрон принадлежит атому, то он имеет отрицательную энергию, которая, в свою очередь, имеет дискретный набор значений.

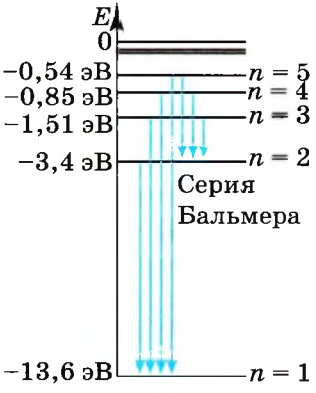


Рис. 11.5

Свободные электроны имеют положительную энергию, и её значения могут быть любыми, энергия свободных электронов не квантуется.

Второй постулат Бора позволяет вычислить по известным значениям энергий стационарных состояний частоты излучений атома водорода.

Согласно модели Бора найдём формулу для определения частот излучения атома водорода. Согласно формуле $h\nu = E_m - E_n$ с учётом формулы (11.4) получим $h\nu = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$. Тогда частоту излучения определим по формуле

$$\nu = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

совпадающей с формулой Бальмера—Ридберга, если учесть, что постоянная Ридберга $R = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3}$. Вычисления показывают хорошее совпадение постоянной Ридберга, определённой по написанной формуле и найденной из эксперимента.

Теория Бора приводит к количественному согласию с экспериментом для значений этих частот.

Переходы в первое возбуждённое состояние (на второй энергетический уровень), как мы знаем, с верхних уровней образуют *серию Бальмера*.

Обсудите, что значит квантование какой-либо физической величины.

Интересно В атомной физике энергии малы, поэтому энергию принято выражать в электронвольтах (эВ). 1 эВ равен энергии, приобретаемой электроном, прошедшим ускоряющую разность потенциалов 1 В: $1\text{эВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

На рисунке 11.5 переходы электрона с одного энергетического уровня на другой изображены стрелками. Красная, зелёная и две синие линии в видимой части спектра водорода (см. рис. V, *3* на цветной вклейке) соответствуют переходам

Пользуясь рисунком 11.5, определите энергию фотона, излучённого атомом водорода при переходе электрона с пятого на четвёртый и с третьего на второй энергетические уровни.

$$E_3 \to E_2, \quad E_4 \to E_2, \quad E_5 \to E_2, \quad E_6 \to E_2.$$

Для вырывания электрона из атома необходимо сообщить энергию, равную энергии первого энергетического уровня.

Запомни

Энергия ионизации — это минимальная энергия, которую надо сообщить атому, чтобы электрон из основного состояния перешёл в свободное с энергией $E = 0$.

Трудности теории Бора. Наибольший успех теория Бора имела в применении к атому водорода, для которого оказалось возможным построить количественную теорию спектра.

Обсудите, почему при определении энергии ионизации мы говорим о минимальной энергии.

Однако разработать количественную теорию для следующего за водородом атома гелия на основе боровских представлений не удалось. Относительно атома гелия и более сложных атомов теория Бора позволяла делать лишь качественные (хотя и очень важные) заключения.

Это и неудивительно. Ведь теория Бора является половинчатой, внутренне противоречивой. С одной стороны, при разработке теории атома водорода использовались привычные законы механики Ньютона и давно известный закон Кулона, а с другой — вводились квантовые постулаты, никак не связанные с механикой Ньютона и электродинамикой Максвелла. Введение в физику квантовых представлений требовало радикального изменения взглядов на законы природы и механики, и электродинамики. Новые физические теории: квантовая механика и квантовая электродинамика — были созданы в начале XX в.

Постулаты Бора оказались совершенно правильными. Но рассматривались не как постулаты, а как следствия основных принципов этих теорий. Правило же квантования Бора, как выяснилось, применимо далеко не всегда.

Представление об определённых орбитах, по которым движется электрон в атоме Бора, оказалось весьма условным. На самом деле движение электрона в атоме имеет очень мало общего с движением планет по орбитам. Если бы атом водорода в его основном состоянии, когда энергия электрона минимальна, можно было сфотографировать с большой выдержкой, то мы увидели бы облако с переменной плотностью. Бóльшую часть времени электрон находится на определённом расстоянии от ядра. Это расстояние можно принять за грубое подобие радиуса орбиты. Фотография атома совсем не походила бы на привычный рисунок Солнечной системы, а скорее напоминала бы расплывчатое пятно, полученное при фотографировании бабочки, порхающей около фонаря.

В настоящее время с помощью квантовой механики можно ответить практически на любой вопрос, относящийся к строению и свойствам электронных оболочек атомов. Но количественная теория оказывается весьма сложной и требует знания определённых разделов высшей математики. С качественным описанием электронных оболочек атомов вы познакомились в курсе химии.

Постулаты Бора. Квантование радиусов, скоростей, энергии — Найти

1. В чём заключаются противоречия между постулатами Бора и законами классической механики и классической электродинамики?
2. Какое излучение наблюдается при переходах электрона в атоме водорода на второй энергетический уровень?
3. Какие электронные орбиты являются стационарными?
4. Чем сопровождается переход атома из одного стационарного состояния в другое?

1. Чему равна энергия фотона, излучаемого при переходе атома из возбуждённого состояния с энергией E_1 в основное с энергией E_0?

1) $\frac{E_1 - E_0}{h}$ 2) $\frac{E_1 + E_0}{h}$ 3) $E_1 - E_0$ 4) $E_1 + E_0$

А2. Частота фотона, поглощаемого атомом при переходе атома из основного состояния с энергией E_0 в возбуждённое с энергией E_1, равна

1) $\frac{E_0 - E_1}{h}$ 2) $\frac{E_1 - E_0}{h}$ 3) $\frac{h}{E_1 - E_0}$ 4) $\frac{ch}{E_0 - E_1}$

А3. Длина волны фотона, излучаемого атомом при переходе атома из возбуждённого состояния с энергией E_1 в основное с энергией E_0, равна

1) $\frac{E_0 - E_1}{h}$ 2) $\frac{E_1 - E_0}{h}$ 3) $\frac{ch}{E_1 - E_0}$ 4) $\frac{ch}{E_0 - E_1}$

4. Атом испустил фотон с энергией $6 \cdot 10^{-18}$ Дж. Какой импульс приобрёл атом?

1) 0
2) $2 \cdot 10^{-26}$ кг · м/с
3) $1{,}8 \cdot 10^{-9}$ кг · м/с
4) $5 \cdot 10^{-25}$ кг · м/с

5. Чему равен импульс, полученный атомом при поглощении фотона частотой $1{,}5 \cdot 10^{14}$ Гц?

1) $3{,}3 \cdot 10^{6}$ кг · м/с
2) $3{,}3 \cdot 10^{-28}$ кг · м/с
3) $3 \cdot 10^{-12}$ кг · м/с
4) $5 \cdot 10^{-29}$ кг · м/с

§ 76 ЛАЗЕРЫ

Как согласно модели Бора происходит излучение атома?
Как долго атом может находиться в возбуждённом состоянии?

Спонтанное излучение. Из возбуждённого состояния атом может перейти в основное состояние, которому соответствует более низкий энергетический уровень. При этом происходит излучение.

Запомни **Спонтанное излучение** — это самопроизвольное излучение возбуждённых атомов.

В возбуждённом состоянии атом может находиться примерно 10^{-8} с. Процесс излучения случаен, поэтому электромагнитные волны, излучаемые различными атомами, некогерентны.

Вспомните, как получают когерентные волны при наблюдении интерференционной картины.

Индуцированное излучение. В 1917 г. Эйнштейн предсказал возможность так называемого *индуцированного* (вынужденного) излучения света атомами.

Запомни **Индуцированное излучение** — это излучение возбуждённых атомов под действием падающего на них света.

Характерной особенностью этого излучения является то, что возникшая при индуцированном излучении световая волна не отличается от волны, падающей на атом, ни частотой, ни фазой, ни поляризацией; таким образом, падающая и излучённая волны являются когерентными.

На языке квантовой теории вынужденное излучение означает переход атома из высшего энергетического состояния в низшее, но не самопроизвольный, как при обычном излучении, а под влиянием падающего электромагнитного излучения.

Ещё в 1940 г. советский физик В. А. Фабрикант указал на возможность использования явления вынужденного излучения для усиления электромагнитных волн.

В 1954 г. советские учёные Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американский физик Ч. Таунс использовали явление индуцированного излучения для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1{,}27$ см. Приборы, созданные этими учёными и работающие в диапазоне сантиметровых волн, получили название *мазеров*.

В 1960 г. в США был создан первый *лазер* — квантовый генератор волн в видимой части спектра.

Интересно Слово *мазер* образовано сочетанием первых букв слов английского выражения «Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation» (усиление микроволн при помощи индуцированного излучения), а слово *лазер* — выражения «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» (усиление света при помощи индуцированного излучения).

Используя приведённые в п. 1 цифры, рассчитайте, какой диаметр пятна будет на экране, находящемся от лазера на расстоянии 2 м. Расстояние от Земли до Луны 384 000 км.

Свойства лазерного излучения. Лазерные источники света обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками света.

1. Лазеры способны создавать пучки света с очень малым углом расхождения (около 10^{-5} рад). На Луне такой пучок, испущенный с Земли, даёт пятно диаметром 3 км.

2. Свет лазера обладает исключительной монохроматичностью. В отличие от обычных источников света, атомы которых излучают свет независимо друг от друга, в лазерах атомы излучают свет согласованно. Поэтому фаза волны не испытывает нерегулярных (случайных) изменений.

3. Лазеры являются самыми мощными источниками света. В узком интервале спектра кратковременно (в течение промежутка времени продолжительностью порядка 10^{-13} с) у некоторых типов лазеров достигается мощность излучения 10^{17} Вт/см^2, в то время как мощность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см^2, причём суммарно по всему спектру. На узкий же интервал $\Delta\lambda = 10^{-6}$ см (ширина спектральной линии лазера) приходится у Солнца всего 0,2 Вт/см^2. Напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, превышает напряжённость поля внутри атома.

Интересно За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн Н. Г. Басову и А. М. Прохорову в 1959 г. была присуждена Ленинская премия. В 1963 г. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

Принцип действия лазеров. В обычных условиях большинство атомов находится в основном состоянии, соответствующем минимальной энергии. Поэтому при обычных температурах вещества не светятся.

При прохождении электромагнитной волны сквозь вещество её энергия поглощается. За счёт поглощённой энергии волны часть атомов возбуждается, т. е. переходит на более высокий энергетический уровень. При этом у светового пучка отнимается энергия, равная разности энергий между уровнями *2* и *1*:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

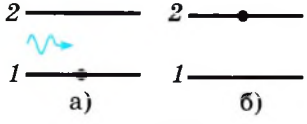


Рис. 11.6

На рисунке 11.6, *а* схематически представлены невозбуждённый атом и электромагнитная волна в виде отрезка синусоиды. Электрон находится на нижнем (основном) уровне. На рисунке 11.6, *б* изображён возбуждённый атом, поглотивший энергию. Возбуждённый атом может отдать свою энергию соседним атомам при столкновении или испустить фотон.

Теперь представим себе, что каким-либо способом мы возбудили бóльшую часть атомов среды. Тогда при прохождении через вещество электромагнитной волны с частотой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

эта волна будет не ослабляться, а, напротив, усиливаться за счёт индуцированного излучения. Под её воздействием атомы согласованно переходят

в основное невозбуждённое состояние, излучая волны, совпадающие по частоте и фазе с падающей волной. На рисунке 11.7, *а* изображён процесс возбуждения атома падающей волной, а на рисунке 11.7, *б* схематично показано, что при облучении атом переходит в основное состояние, при этом происходит усиление излучения.

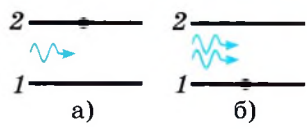


Рис. 11.7

Трёхуровневая система. Существуют различные методы получения среды с возбуждёнными состояниями атомов. В рубиновом лазере для этого используется специальная мощная лампа. Атомы возбуждаются за счёт поглощения света.

Но двух уровней энергии для работы лазера недостаточно. Каким бы мощным ни был свет лампы, число возбуждённых атомов не будет больше числа невозбуждённых. Ведь свет одновременно и возбуждает атомы, и вызывает в них индуцированные переходы с верхнего уровня на нижний.

Усиление излучения будет происходить тогда, когда число переходов, определяющих индуцированное излучение, будет больше числа переходов, ответственных за поглощение.

Интересно

В электрических полях лазера показатель преломления среды начинает зависеть от напряжённости, волны начинают влиять друг на друга (нарушается принцип суперпозиции), возникают явления, изучаемые в нелинейной оптике, существенно отличающиеся от тех, которые мы изучали.

Выход был найден в использовании трёх энергетических уровней (общее число уровней всегда велико, но речь идёт о «работающих» уровнях). На рисунке 11.8 изображены три энергетических уровня. Существенно, что в отсутствие внешнего воздействия время, в течение которого атомная система находится в различных энергетических состояниях («время жизни»), неодинаково. На уровне *3* система «живёт» очень мало, порядка 10^{-8} с, после чего самопроизвольно переходит в состояние *2* без излучения света. (Энергия при этом передаётся кристаллической решётке.) «Время жизни» в состоянии *2* в 100 000 раз больше, т. е. составляет около 10^{-3} с.

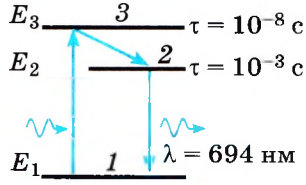


Рис. 11.8

Переход из состояния *2* в состояние *1* под действием внешней электромагнитной волны сопровождается излучением. Это используется в лазерах. После вспышки мощной лампы система переходит в состояние *3* и спустя промежуток времени около 10^{-8} с оказывается в состоянии *2*, в котором «живёт» сравнительно долго. Таким образом и создаётся «перенаселённость» возбуждённого уровня *2* по сравнению с невозбуждённым уровнем *1*.

Необходимые энергетические уровни имеются в кристаллах рубина. Рубин — это красный кристалл оксида алюминия Al_2O_3 с примесью атомов хрома (около 0,05 %). Именно уровни ионов хрома в кристалле обладают требуемыми свойствами.

Интересно

Состояние *2* называется *метастабильным состоянием*, это возбуждённое состояние атома, в котором он может находиться существенно дольше, чем в обычном возбуждённом состоянии.

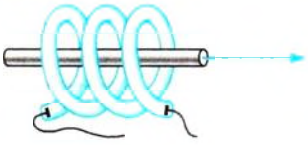


Рис. 11.9

Устройство рубинового лазера. Из кристалла рубина изготовляют стержень с плоскопараллельными торцами. Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — полупрозрачным. Газоразрядная лампа, имеющая форму спирали (рис. 11.9), даёт сине-зелёный свет. Кратковременный импульс тока от батареи конденсаторов ёмкостью в несколько тысяч микрофарад вызывает яркую вспышку лампы, происходит так называемая накачка лазера. Спустя малое время энергетический уровень *2* становится «перенаселённым». В результате самопроизвольных переходов $2 \rightarrow 1$ начинают излучаться волны всевозможных направлений. Те из них, которые идут под углом к оси кристалла, выходят из него и не играют в дальнейших процессах никакой роли. Но волна, идущая вдоль оси кристалла, многократно отражается от его торцов. Она вызывает индуцированное излучение возбуждённых ионов хрома и быстро усиливается.

Через полупрозрачный торец выходит мощный кратковременный (длительностью около сотни микросекунд) импульс красного света, обладающий теми феноменальными свойствами, о которых было рассказано в начале параграфа.

Волны, излучаемые атомами, когерентны и совпадают по фазе, происходит сложение амплитуд.

Именно поэтому излучение лазера оказывается очень мощным, отчасти ещё и потому, что вся запасённая энергия выделяется за очень малое время.

Другие типы лазеров. Рубиновый лазер, с которым мы ознакомились, работает в импульсном режиме. Внутри самого кристалла выделяется тепло, поэтому рубиновый лазер надо охлаждать.

Существуют также лазеры непрерывного действия. В 1961 г. был создан газовый лазер, работающий на смеси гелия с неоном. Атомы рабочего вещества в нём возбуждаются электрическим разрядом.

Применяются и полупроводниковые лазеры непрерывного действия. Они созданы впервые в нашей стране. В них энергия для излучения заимствуется от электрического тока.

Созданы очень мощные газодинамические лазеры непрерывного действия на сотни киловатт. В этих лазерах «перенаселённость» верхних энергетических уровней возникает при расширении и адиабатном охлаждении сверхзвуковых газовых потоков, нагретых до нескольких тысяч кельвинов.

Применение лазеров. Очень перспективно применение лазерного луча для связи, особенно в космическом пространстве, где нет поглощающих свет облаков. Лазеры используются для записи и хранения информации (лазерные диски). Огромная мощность лазерного луча используется для испарения различных материалов в вакууме, для сварки и т. д. С помощью луча лазера проводят хирургические операции: например, «приваривают» отслоившуюся от глазного дна сетчатку; помогают человеку получать объёмные изображения предметов (голограммы), используя когерентность лазерного луча.

Лазеры позволили создать светолокатор, с помощью которого расстояния до предметов измеряются с точностью до нескольких миллиметров. Такая точность недоступна для радиолокаторов.

Возбуждая лазерным излучением атомы или молекулы, можно вызвать между ними химические реакции, которые в обычных условиях не идут.

Создание лазеров — пример того, как развитие фундаментальной науки (квантовой теории) приводит к гигантскому прогрессу в самых различных областях техники и технологии.

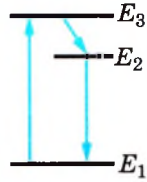
Лазер. Спонтанное и вынужденное излучение — Найти

1. Чем отличается излучение лазера от излучения лампы накаливания?
2. Перечислите основные применения лазеров.

1. Излучение лазера — это
1) тепловое излучение
2) вынужденное излучение
3) спонтанное излучение
4) люминесценция

2. В настоящее время широко распространены лазерные указки, авторучки, брелоки. При неосторожном обращении с таким (полупроводниковым) лазером можно
1) вызвать пожар
2) прожечь костюм и повредить тело
3) получить опасное облучение организма
4) повредить сетчатку глаза при прямом попадании лазерного луча в глаз

3. Для генерации лазерного света используют вещество, атомы которого могут находиться в основном состоянии с энергией E_1, метастабильном состоянии с энергией E_2 и возбуждённом состоянии — E_3 (см. рисунок). При этом $E_1 < E_2 < E_3$. Излучение лазера имеет частоту, равную



1) $\frac{E_2 - E_3}{h}$
2) $\frac{E_3 - E_1}{h}$
3) $\frac{E_2 - E_1}{h}$
4) $\frac{E_2 + E_3 - E_1}{h}$

4. Интерференцию света с помощью лазерной указки показать легче, чем с обычным источником, так как пучок света, даваемый лазером, более
1) мощный
2) когерентный
3) расходящийся
4) яркий

«Лазеры, их устройство и применение»

1. Газовый лазер.
2. Полупроводниковый лазер.
3. Голография.
4. Применения лазеров в некоторых областях техники.
5. Использование лазера — путь к осуществлению управляемой термоядерной реакции.

§ 77 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «АТОМНАЯ ФИЗИКА»

Для решения задач по атомной физике надо знать постулаты Бора, понимать, как происходит излучение и поглощение энергии атомом. Обратите внимание на то, что практически во все выражения атомной физики входит постоянная Планка.

Задача 1. Определите радиус n-й стационарной орбиты электрона в атоме водорода и энергию электрона на этой орбите.

Р е ш е н и е. Согласно первому постулату Бора стационарными являются те орбиты, для которых момент импульса кратен приведённой постоянной Планка:

$$m_e v_n r_n = n\frac{h}{2\pi}. \qquad (1)$$

Электрон движется по орбите под действием кулоновской силы притяжения к ядру. Согласно второму закону Ньютона запишем

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = k\frac{q_e^2}{r_n^2}. \qquad (2)$$

Уравнения (1) и (2) образуют систему двух уравнений относительно двух неизвестных r_n и v_n. Решая её, получим

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{k(2\pi)^2 m_e q_e^2}. \qquad (3)$$

Радиус первой стационарной орбиты электрона в атоме водорода $r_1 = 0{,}529 \cdot 10^{-10}$ м, а радиус n-й орбиты $r_n = r_1 n^2$.

Энергия электрона на n-й орбите равна сумме его потенциальной и кинетической энергий: $E_n = E_{\text{пот } n} + E_{\text{кин } n} = -k\frac{q_e^2}{r_n} + \frac{m_e v_n^2}{2}$. Потенциальная энергия электрона в атоме отрицательна, так как нулевой уровень отсчёта на бесконечности, а по мере приближения электрона к ядру его потенциальная энергия уменьшается. Из уравнения (2) следует $\frac{m_e v_n^2}{2} = k\frac{q_e^2}{2r_n}$, откуда $E_n = -k\frac{q_e^2}{2r_n}$. Подставив в это выражение r_n из формулы (3), получим

$$E_n = -k^2\frac{(2\pi)^2 m_e q_e^4}{2h^2}\frac{1}{n^2}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \ldots . \qquad (4)$$

Полная энергия электрона, движущегося по первой боровской орбите, $E_1 = -2{,}17 \cdot 10^{-18}$ Дж $= -13{,}6$ эВ, $E_n = \frac{E_1}{n^2}$.

Задача 2. Докажите, что на длине стационарных орбит укладывается целое число n волн де Бройля. Нарисуйте такие орбиты для $n = 2$ и $n = 3$.

Р е ш е н и е. Длина волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{m_e \upsilon_n}$.

Если радиус электронной орбиты r_n, то длина окружности, по которой движется электрон в атоме, должна быть равна $2\pi r_n = n\lambda$, $n = 1, 2, \ldots$.

Подставив в это уравнение λ, получим $2\pi r_n = n\frac{h}{m_e \upsilon_n}$.

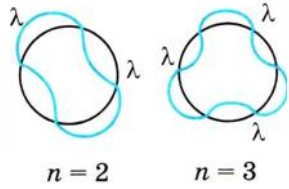


Рис. 11.10

Преобразуя это выражение, получаем условие стационарности орбит электрона в атоме (первый постулат Бора): $m_e \upsilon_n r_n = n\frac{h}{2\pi}$.

На рисунке 11.10 показаны эти орбиты. Мы видим, что волны как бы замыкаются на себя. Если этого нет, то волна быстро затухает, орбита нестационарная.

Задача 3. В результате поглощения атомом фотона электрон в атоме водорода перешёл с первой боровской орбиты на вторую. Определите частоту этого фотона.

Р е ш е н и е. Длину волны поглощённого фотона можно определить по формуле Бальмера: $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$.

Частота фотона $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света, равная $3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, следовательно, $\nu = cR\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) = 2{,}5 \cdot 10^{15}$ Гц.

Задача 4. Электрон в атоме водорода с первой орбиты переходит на орбиту, радиус которой в девять раз больше. Какую энергию ΔE должен поглотить атом?

Р е ш е н и е. Радиусы разрешённых орбит $r_n = r_1 n^2$, следовательно, электрон переходит на третью боровскую орбиту. Атом при этом должен поглотить энергию (см. формулу (4) задачи 1) $\Delta E = E_3 - E_1 = -k^2\frac{(2\pi)^2 m_e q_e^4}{2h^2}\frac{1}{9} + k^2\frac{(2\pi)^2 m_e q_e^4}{2h^2}\frac{1}{1} = k^2\frac{(2\pi)^2 m_e q_e^4}{2h^2}\frac{8}{9} \approx 1{,}926 \cdot 10^{-18}$ Дж ≈ 12 эВ.

Задача 5. Определите максимальную и минимальную длины волн, излучаемых атомом в серии Бальмера.

Р е ш е н и е. Согласно формуле Бальмера—Ридберга $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$. Отсюда $\lambda = \frac{1}{R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$.

Очевидно, что максимальная длина волны соответствует минимальному значению разности $\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$, т. е. $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} = \frac{5}{36}$.

Минимальная длина волны соответствует максимальному значению этой разности, т. е. $n \to \infty$. Окончательно

$$\lambda_{max} = \frac{36}{5R} = 6{,}56 \cdot 10^{-7}\ \text{м} = 656\ \text{нм},\quad \lambda_{min} = \frac{4}{R} = 3{,}65 \cdot 10^{-7}\ \text{м} = 365\ \text{нм}.$$

Волна с максимальной длиной λ_{max} излучается в видимой части спектра (красная линия), волна с минимальной длиной волны λ_{min} излучается в ультрафиолетовой части спектра.

Задача 6. На рисунке 11.11 представлена схема энергетических уровней атомов хрома в кристалле рубидия. Определите: 1) какой длины волны должно быть излучение для так называемой «накачки»; 2) чему равна длина волны, излучаемой рубиновым лазером.

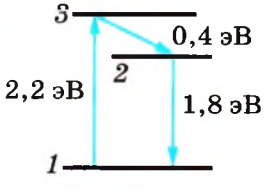


Рис. 11.11

Р е ш е н и е. Поглощаемый атомом хрома фотон должен иметь энергию $h\nu = \frac{hc}{\lambda_1} = E_3 - E_1 = \Delta E_1$, откуда $\lambda_1 = \frac{hc}{\Delta E_1} \approx 5{,}64 \cdot 10^{-7}$ м.

Длина излучаемой волны $\lambda_2 = \frac{hc}{E_2 - E_1} \approx 6{,}9 \times 10^{-7}$ м. Генерируемое лазером излучение красного цвета.

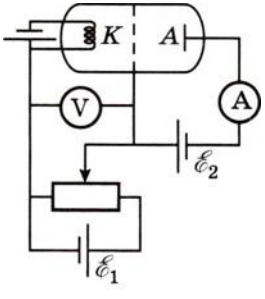


Рис. 11.12

Задача 7. На рисунке 11.12 показана схема установки Д. Франка и Г. Герца. Стеклянный сосуд заполнен парáми ртути. Источник $\mathscr{E}_1$ подключён между подогреваемым катодом и сеткой через потенциометр, регулирующий подаваемое напряжение. Между сеткой и анодом подключена небольшая ЭДС $\mathscr{E}_2$, создающая задерживающее поле. Амперметр показывает силу тока в анодной цепи. На рисунке 11.13 показана зависимость силы тока от напряжения между катодом и сеткой. Объясните эту зависимость, исходя из положения, что энергетические уровни атома могут принимать только дискретные значения.

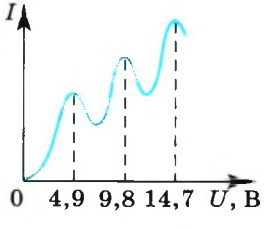


Рис. 11.13

Р е ш е н и е. Электроны излучаются катодом вследствие термоэлектронной эмиссии, затем они попадают в ускоряющее их электрическое поле (разность потенциалов U_1), создаваемое между катодом и сеткой. Если соударения с атомами ртути упругие, то в результате этих ударов кинетическая энергия электронов изменяется слабо, так как масса атома ртути много больше массы электрона ($m_{ат} >> m_э$). Вследствие удара об

атом электрон только отклоняется от направленного движения. Чем больше подаваемое напряжение, тем больше электронов достигнет анода. Напряжение U_2 между сеткой и анодом не может существенно повлиять на анодный ток, так как оно небольшое.

До значения напряжения U_1, равного 4,9 В, атомы ртути от электронов получают только небольшую порцию энергии, увеличивающую кинетическую энергию их теплового движения. Однако, как мы видим, начиная с $U_1 = 4{,}9$ В, анодный ток в цепи резко уменьшается. Это можно объяснить тем, что энергия, потерянная электроном при ударе, идёт на возбуждение атома ртути, разность энергии возбуждённого и основного состояния которого равна 4,9 В. Взаимодействие электрона с атомом становится неупругим, электрон теряет большую порцию своей энергии при ударе, и даже слабое поле между сеткой и анодом задерживает электроны, сила тока уменьшается.

При увеличении напряжения энергия электрона увеличивается и её хватает и на возбуждение атома, и на преодоление задерживающего поля, сила тока увеличивается. При напряжении $U_1 = 9{,}8$ В сила тока опять уменьшается, так как энергии одного электрона хватает на возбуждение уже двух атомов ртути, и он полностью теряет свою энергию, затем при дальнейшем увеличении напряжения U_1 сила тока вновь увеличивается и т. д.

Опыт Франка и Герца показывает, что атомы могут поглощать энергию не непрерывно, а только определёнными порциями.

Задача 8. Определите энергию ионизации иона гелия He^+.

Р е ш е н и е. Теория Бора справедлива для атома водорода и для водородоподобных атомов, т. е. для атомов, у которых на внешней орбите находится один электрон.

У атома гелия два электрона, заряд ядра равен $2|q_e|$. У иона гелия на орбите один электрон, следовательно, его можно считать водородоподобным атомом.

Электрон в атоме гелия, находящийся на ближайшей к ядру орбите ($n = 1$), имеет энергию $E_1 = -k^2 \dfrac{(2\pi)^2 Z^2 q_e^4 m_e}{2h^2} \dfrac{1}{1^2}$ $(Z = 2)$.

Будем считать, что энергия электрона, вырванного из атома, равна 0. Следовательно, энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул атом (энергия ионизации), равна $E_и = 0 - E_1 \approx 55$ эВ.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите скорость v и ускорение a электрона на первой боровской орбите, радиус которой $r_1 = 5{,}29 \cdot 10^{-11}$ м; $k = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

2. Определите длину волны света, испускаемого атомом водорода при его переходе из стационарного состояния с энергией $E_4 = -0{,}85$ эВ $(m = 4)$ в состояние с энергией $E_2 = -3{,}4$ эВ $(n = 2)$.

3. Определите напряжённость и потенциал поля ядра атома водорода на расстоянии, соответствующем первой боровской орбите.

4. В каких пределах должна находиться энергия $W_{эл}$ электронов, бомбардирующих атомы водорода, чтобы спектр возбуждённых атомов водорода имел только одну спектральную линию?

5. Минимальная частота линии спектральной серии Бальмера для атома водорода $2{,}5 \cdot 10^{15}$ Гц. Чему равны частоты двух ближайших линий этой серии?

6. При какой частоте падающего излучения электрон в атоме водорода перейдёт с первой боровской орбиты на вторую?

7. При каком значении потенциала между катодом и сеткой будет наблюдаться резкое падение анодного тока в опыте Франка и Герца, если трубку наполнить атомарным водородом?

1. В сосуде находится разреженный атомарный водород. Атом водорода в основном состоянии ($E_1 = -13{,}6$ эВ) поглощает фотон и ионизуется. Электрон, вылетевший из атома в результате ионизации, движется вдали от ядра со скоростью 1000 км/с. Чему равна частота поглощённого фотона? Энергию теплового движения атомов водорода не учитывайте.

2. Покоящийся атом водорода в основном состоянии ($E_1 = -13{,}6$ эВ) поглощает в вакууме фотон с длиной волны $\lambda = 80$ нм. С какой скоростью движется вдали от ядра электрон, вылетевший из атома в результате ионизации? Кинетическую энергию образовавшегося иона не учитывайте.

3. Значение энергии электрона в атоме водорода задаётся формулой $E_n = -\dfrac{13{,}6\text{ эВ}}{n^2}$, где $n = 1, 2, 3, \ldots$. При переходе атома из состояния E_2 в состояние E_1 атом испускает фотон. Попав на поверхность фотокатода, фотон выбивает фотоэлектрон. Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта для материала поверхности фотокатода, $\lambda_{кр} = 300$ нм. Чему равна максимальная возможная скорость фотоэлектрона?

Повторите материал главы 11 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Способы экспериментальных исследований атома»

1. Э. Резерфорд и созданная им школа физиков. Опыты Резерфорда. Способ изучения строения атома.
2. Особенности рассмотрения движения частиц в квантовой и классической механике. Атом Бора — соединение двух разных подходов к изучению движения.
3. Газовые и полупроводниковые лазеры.
4. Голография. Голографические изображения.

«Сравнение идей классической и квантовой физики в объяснении строения атома. Детерминизм и вероятность»

ГЛАВА 12 ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Выражения *атомное ядро* и *элементарные частицы* уже неоднократно упоминались. Атомное ядро состоит из элементарных частиц, нейтронов и протонов. Раздел физики, в котором исследуется строение и превращение атомных ядер, называется *ядерной физикой*.

Первоначально разделения на ядерную физику и физику элементарных частиц не было, так как частиц было мало и для исследований использовались одинаковые методы. С многообразием мира элементарных частиц физики столкнулись при изучении ядерных процессов. Выделение *физики элементарных частиц* в самостоятельную область исследования произошло около 1950 г. Сегодня существуют два самостоятельных раздела физики: содержание одного из них составляет изучение атомных ядер, а содержание другого — изучение природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.

§ 78 СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Вспомните, из каких частиц состоит атом.
Каковы размеры ядра атома и чему равен заряд атома?

Исследования Резерфорда показали, что в центре атома находится положительно заряженное ядро. В дальнейшем встала задача определения состава атомного ядра. Резерфорд при бомбардировке ядра атома азота α-частицами обнаружил появление *протонов* — ядер атома водорода. Был сделан вывод, что ядро состоит из протонов.

Запомни **Протон** — частица, имеющая положительный заряд, равный модулю заряда электрона: $q_p = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, и массу $m_p = 1{,}6726231 \times 10^{-27}$ кг $\approx 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг.

Однако было выяснено, что масса ядер существенно больше, чем суммарная масса протонов в ядре.

В 1932 г. учеником Резерфорда английским физиком Д. Чедвиком был открыт *нейтрон*.

По энергии и импульсу ядер, сталкивающихся с нейтронами, была определена масса новой частицы.

Запомни **Нейтрон** — частица, не имеющая электрического заряда и имеющая массу $m_n = 1{,}6749286 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг.

Масса нейтрона больше массы протона примерно на 2,5 массы электрона.

Подумайте, к какому типу частиц согласно теории относительности относится протон.

Свободный нейтрон нестабилен и за время около 15 мин распадается на протон, электрон и нейтрино — очень лёгкую нейтральную частицу.

Сразу же после открытия нейтрона советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий учёный В. Гейзенберг в том же 1932 г. предложили *протонно-нейтронную модель ядра*. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является общепризнанной.

Протонно-нейтронная модель ядра. Согласно протонно-нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух видов — протонов и нейтронов.

Так как в целом атом электрически нейтрален, а заряд протона равен модулю заряда электрона, то число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента Z в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Интересно Существование нейтрона предсказывал Резерфорд более чем за 10 лет до опытов Чедвика.

Запомни Сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют **массовым числом** и обозначают буквой A:

$$A = Z + N. \qquad (12.1)$$

Массы протона и нейтрона близки друг к другу, и каждая из них примерно равна атомной единице массы.

В ядерной физике в связи с тем, что массы частиц малы, за единицу массы принимают 1/12 часть массы атома углерода: 1 а. е. м. = $1{,}661 \cdot 10^{-27}$ кг.

Таким образом, масса нейтрона $m_n = 1{,}008665$ а. е. м., а масса протона $m_p = 1{,}007276$ а. е. м.

Масса электронов в атоме много меньше массы его ядра. Поэтому массовое число ядра равно округлённой до целого числа относительной атомной массе элемента.

Запомни Протоны и нейтроны, составляющие ядро атома, называют **нуклонами**.

${}^{1}_{0}n$ — символ нейтрона; его заряд равен нулю, а относительная масса — примерно единице; ${}^{1}_{1}p$ — символ протона; его заряд равен единице, относительная масса также равна примерно единице.

Для обозначения ядер применяется символ ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, где X — символ химического элемента, A — массовое число, Z — атомный номер (зарядовое число, или число протонов).

Радиус ядра определяется по формуле $r \approx 1{,}3 \cdot 10^{-13} A^{1/3}$ см. Таким образом, объём ядра прямо пропорционален корню кубическому из массового числа, т. е. числа нуклонов в ядре.

В настоящее время известно больше 1500 ядер, различающихся зарядовым и массовым числами или одним из них.

Запомни **Изотопы** — это ядра с одним и тем же значением Z (числом протонов), но с различными массовыми числами A, т. е. с различным числом N нейтронов.

Например, изотопы водорода: ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ — обычный водород, ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ — дейтерий, ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ — тритий.

Часть ядер являются устойчивыми, а часть распадающимися (радиоактивными).

Определите, сколько нейтронов и протонов входит в состав изотопов водорода. Подумайте, различаются ли изотопы одного элемента по химическим свойствам.

Изотопы одного и того же элемента могут быть устойчивыми и неустойчивыми (радиоактивными).

Устойчивость ядер зависит от отношения числа нейтронов к числу протонов в ядре.

Для лёгких ядер ($A < 30$) отношение N/Z порядка единицы. При больших значениях массового числа стабильные ядра содержат больше нейтронов, чем протонов. При увеличении числа протонов возрастает кулоновское отталкивание, именно поэтому у стабильных ядер возрастает число нейтронов, которые обеспечивают только силу притяжения.

Посчитайте значение электрической силы отталкивания двух протонов, находящихся в ядре, и определите ускорение, которое она может им сообщить.

При Z, бóльших 82, стабильных ядер вообще не существует, так как велико кулоновское отталкивание.

Предположите, чем можно объяснить устойчивость и неустойчивость ядер одного элемента.

Ядерные силы. Так как большинство существующих в природе ядер устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причём очень большими. Что это за силы? Сразу можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабы. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами, так как между одноимённо заряженными протонами действует электрическое отталкивание. А нейтроны не имеют электрического заряда.

Интересно Нестабильность ядер была открыта в конце XIX в.

Запомни Между нуклонами ядра действуют особые силы, называемые **ядерными силами.**

Перечислим некоторые свойства ядерных сил.

1) Ядерные силы примерно в 100 раз превышают электрические (кулоновские) силы. Это *самые мощные силы* из всех существующих в природе. Поэтому

Важно взаимодействия нуклонов в ядре часто называют *сильными взаимодействиями.*

Заметим, что сильные взаимодействия проявляются не только во взаимодействиях нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействий, присущий большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Обсудите, какое взаимодействие отвечает за ковалентную связь атомов в молекулах. Проявляется ли здесь свойство насыщения?

2) Особенностью ядерных сил является *зарядовая независимость*, т. е. силы взаимодействия протонов, нейтронов или протона с нейтроном равны.

3) Другая важная особенность ядерных сил — их *короткодействие*. Электромагнитные силы сравнительно медленно ослабевают с увеличением расстояния. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях, равных размерам ядра (10^{-12}—10^{-13} см), что показали уже опыты Резерфорда по рассеянию α-частиц атомными ядрами. Ядерные силы — это, так сказать, «богатырь с очень короткими руками».

Сравните электромагнитные, гравитационные и ядерные силы. Составьте таблицу, в которой будут отражены их свойства.

4) Ядерные силы обладают ещё одним интересным свойством — *свойством насыщения*. Каждый нуклон в ядре взаимодействует не со всеми нуклонами ядра, а с их конечным числом.

Ядро. Протон. Нейтрон. Нуклоны. Ядерные силы

Найти

1. Какая частица называется нуклоном?
2. Каковы главные особенности ядерных сил?

1. По современным представлениям ядро атома углерода состоит из

1) электронов и протонов
2) нейтронов и позитронов
3) одних протонов
4) протонов и нейтронов

2. Ядро аргона $^{40}_{18}Ar$ содержит

1) 18 протонов и 40 нейтронов
2) 18 протонов и 22 нейтрона
3) 40 протонов и 22 нейтрона
4) 40 протонов и 18 нейтронов

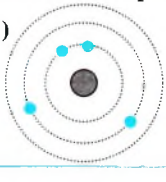
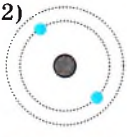
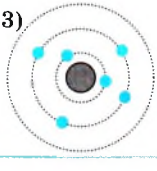
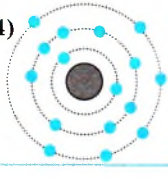
3. Электронная оболочка в нейтральном атоме фосфора $^{31}_{15}P$ содержит

1) 46 электронов
2) 31 электрон
3) 16 электронов
4) 15 электронов

4. Ядро атома содержит 10 нейтронов и 9 протонов, и вокруг него обращается 8 электронов. Эта система частиц —

1) ион фтора $^{19}_{9}F$
2) ион неона $^{19}_{10}Ne$
3) атом фтора $^{19}_{9}F$
4) атом неона $^{19}_{10}Ne$

5. На рисунке изображены схемы четырёх атомов. Цветными кружочками обозначены электроны. Атому $^{12}_{6}C$ соответствует схема

1) 
2) 
3) 
4) 

§ 79 ОБМЕННАЯ МОДЕЛЬ ЯДЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Вспомните, как объясняется согласно теории близкодействия взаимодействие заряженных частиц в электростатике.

Мы знаем, что в классической физике взаимодействие электрических зарядов происходит посредством электромагнитного поля. Поле считается непрерывным.

Вспомните, какое определение поля мы давали и как графически изображали поля.

В квантовой физике считается, что поле квантуется так же, как и все физические величины, поле представляется как совокупность квантов-фотонов. Согласно законам классической электродинамики электрон излучает фотон, если он движется с ускорением. В квантовой физике это не так. Частица создаёт вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Однако это не обычные фотоны, а *виртуальные*.

Запомни

Виртуальные частицы — это частицы, которые существуют столь малое время, что не могут быть экспериментально обнаружены.

Излучение и поглощение, например, электрона происходит по схеме

$$e \rightleftarrows e + h\nu. \qquad (12.2)$$

Образовавшийся фотон поглощает другая частица. Считается, что взаимодействие заряженных частиц происходит благодаря обмену *виртуальными* фотонами ($h\nu$), между заряженными частицами происходит так называемое *обменное взаимодействие*.

Не нарушается ли в модели обменного взаимодействия закон сохранения энергии? Ведь то справа, то слева в соотношении (12.2) энергия отличается на значение, равное энергии поглощённого или испущенного фотона.

Обсудите, на какой модели (близкодействия или дальнодействия) основана модель обменного взаимодействия.

В классической физике такие процессы испускания и поглощения фотонов невозможны. Однако в модели обменного взаимодействия нет нарушения закона сохранения энергии, так как согласно принципу неопределённости Гейзенберга энергию состояния, существующего в течение времени Δt, можно определить с точностью до ΔE, причём $\Delta E \Delta t \geqslant h$. Энергия виртуального фотона равна $h\nu$. Следовательно, взаимодействие (12.2) может быть реализовано без нарушения закона сохранения энергии, если виртуальный фотон существует не дольше времени $\Delta t = \frac{h}{h\nu} = \frac{1}{\nu}$.

Для объяснения ядерных сил также была предложена модель обменного взаимодействия виртуальными частицами. Однако встал

Объясните, как реализуется ковалентная связь молекул, например в молекулах метана CH_4.

Интересно В 1935 г. гипотезу о существовании частиц, которые могут осуществлять обменные взаимодействия нуклонов, высказал японский физик Х. Юкава. В 1936 г. в космических лучах были обнаружены μ-мезоны, которые по всем параметрам могли бы быть такими частицами, но оказалось, что они слабо взаимодействуют с нуклонами. Спустя 12 лет, в 1947 г., Дж. Оккиалини и С. Поуэлл открыли π-мезоны, которые и отвечают за взаимодействие нуклонов.

Как вы думаете, почему π-мезоны были обнаружены только спустя 12 лет после предсказания их существования?

вопрос, что это за частицы, которые могут осуществить обменное взаимодействие нуклонов в ядре, подобно тому как фотоны осуществляют электромагнитное взаимодействие.

В результате многолетних исследований в космическом излучении были обнаружены частицы, которые могут реализовать ядерное взаимодействие. Это π(пи)-мезоны. Существуют положительные, отрицательные и нейтральные π-мезоны. Эти частицы нестабильны, время жизни π^+ и π^--мезонов — $2{,}55 \cdot 10^{-8}$ с, а π^0-мезона — $2{,}1 \cdot 10^{-16}$ с.

Согласно модели обменного взаимодействия нуклон окружён облаком π-мезонов. Происходят процессы испускания и поглощения π-мезонов. Например, протон испускает положительно заряженный π^+-мезон, при этом превращаясь в нейтрон: $p \rightleftarrows n + \pi^+$. Затем нейтрон поглощает этот π^--мезон, превращаясь в протон. Схематически этот процесс взаимодействия протона и нейтрона можно изобразить так:

$$p + n \rightleftarrows n + \pi^+ + n \rightleftarrows n + p.$$

Так происходит взаимодействие протона и нейтрона. Аналогично происходит взаимодействие двух нейтронов.

Обсудите, чем различаются частицы, осуществляющие ковалентную связь в молекуле и связь нуклонов в ядре.

Напишите схему взаимодействия 1) двух нейтронов; 2) двух протонов.

Взаимодействие нейтрона и протона реализуется с помощью виртуального отрицательного π^--мезона. Нейтрон испускает отрицательный π-мезон, при этом превращаясь в протон, затем этот π^--мезон поглощается протоном, превращающимся в нейтрон.

Важно Итак, поглощение π-мезона нуклоном, испущенным другим нуклоном, обеспечивает ядерное взаимодействие нуклонов в ядре.

Заметим, что если нуклону сообщить достаточную энергию, например соответствующую массе покоя ($E = mc^2$), то виртуальный π-мезон может стать реальной частицей.

Взаимодействия нуклонов. Виртуальные частицы

1. Какая частица называется виртуальной?
2. В чём состоит обменное взаимодействие?

§ 80 ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Какие силы определяют связь нуклонов в ядре?
Можно ли посчитать значения этих сил?

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие энергии связи ядра. Энергия связи позволяет объяснить устойчивость ядер, выяснить, какие процессы ведут к выделению ядерной энергии. Нуклоны в ядре прочно удерживаются ядерными силами. Для того чтобы удалить нуклон из ядра, надо совершить довольно большую работу, т. е. сообщить ядру значительную энергию.

Энергия связи атомных ядер очень велика. Но как её определить?

В настоящее время рассчитать энергию связи теоретически, подобно тому как это можно сделать для электронов в атоме, не удаётся. Выполнить соответствующие расчёты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \qquad (12.3)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что

Важно

масса покоя ядра $M_я$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_я < Zm_p + Nm_n.$$

Запомни

Разность этих масс, называемая **дефектом масс**, равна:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я \qquad (12.4)$$

и всегда положительна.

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия этой системы нуклонов на значение энергии связи $E_{св}$:

$$E_{св} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_я)c^2. \qquad (12.5)$$

Энергией же связи электронов с ядрами можно пренебречь.

Например, подсчитаем энергию связи для ядра $^4_2$He. Ядро гелия состоит из 2 протонов и 2 нейтронов, его масса $M_{He} = 4{,}002603$ а. е. м. Дефект масс определим по формуле

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{He},$$

$$\Delta m = 2 \cdot 1{,}007276 + 2 \cdot 1{,}008665 - 4{,}002603 = 0{,}029279 \text{ а. е. м.}$$

Мы видим, что масса ядра почти на 0,75 % меньше суммы масс 2 протонов и 2 нейтронов.

Энергию связи удобно определять, пользуясь соотношением 1 а. е. м. = $= 1{,}6606 \cdot 10^{-27}$ кг или используя связь энергии и массы:

$$1 \text{ а. е. м.} = 931{,}5 \frac{\text{МэВ}}{c^2},$$

где c — скорость света.

Согласно формуле (12.5) энергия связи ядра гелия $E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = 0{,}029279 \times 931{,}5$ (МэВ) $\approx 27{,}3$ МэВ.

Но куда при образовании ядра из нуклонов исчезают энергия $E_{\text{св}}$ и масса ΔM?

При образовании ядра из частиц последние за счёт действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ-кванты как раз обладают энергией $E_{\text{св}}$ и массой $\Delta M = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}$.

Запомни

Энергия связи — это энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц, и соответственно это та энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие его частицы.

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и при сгорании 1,5—2 вагонов каменного угля.

Важную информацию о свойствах ядер содержит зависимость *удельной энергии связи от массового числа A*.

Запомни

Удельная энергия связи — это полная энергия связи ядра, делённая на число A нуклонов в ядре.

Удельную энергию связи определяют экспериментально. На рисунке 12.1 представлена кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа. Экспериментальные значения дают небольшие отклонения от этой кривой. Из рисунка 12.1 хорошо видно, что, не считая самых лёгких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона и ядра в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше этого значения. Кривая на рисунке 12.1 имеет слабо выраженный максимум. Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

Определите удельную энергию связи ядра гелия He, используя приведённые в тексте результаты для энергии связи. Сравните полученный результат со значением на графике рисунка 12.1.

У тяжёлых ядер удельная энергия связи уменьшается, как мы уже знаем, за счёт возрастающей с увеличением числа Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

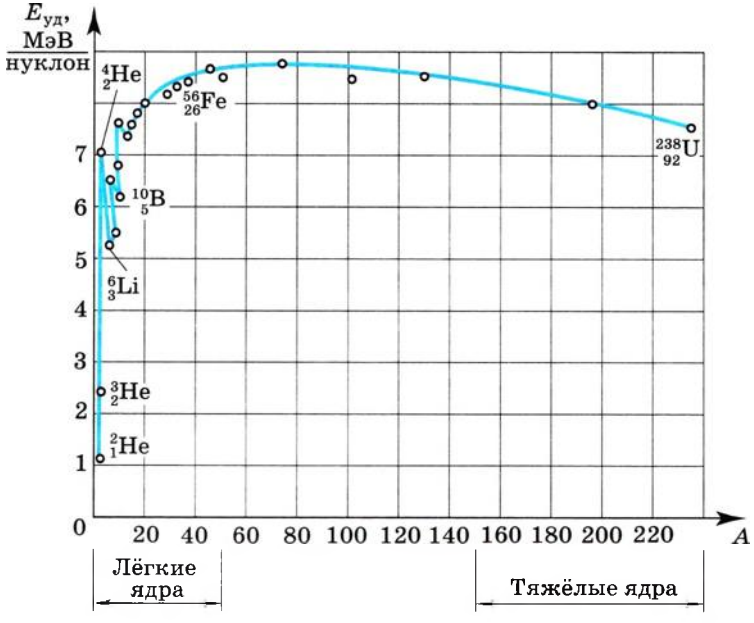


Рис. 12.1

Если внимательно проанализировать этот график, то станет очевидно, что может выделяться энергия при делении тяжёлых ядер и при синтезе (соединении) лёгких.

Дефект масс. Энергия связи. Удельная энергия связи

Найти

1. Что называют энергией связи ядра?
2. Почему ядро меди более устойчиво, чем ядро урана?

1. Два протона удерживаются в ядре атома гелия за счёт
1) гравитационного взаимодействия
2) электромагнитного взаимодействия
3) сильного взаимодействия
4) слабого взаимодействия

2. Удельные энергии связи нуклонов в ядрах плутония $^{240}_{94}$Pu, кюрия $^{245}_{96}$Cm и америция $^{246}_{95}$Am равны соответственно 0,21; 0,22 и 0,23 МэВ/нуклон. Из какого ядра труднее выбить нейтрон?

1) из ядра $^{240}_{94}$Pu
2) из ядра $^{245}_{96}$Cm
3) из ядра $^{246}_{95}$Am
4) все ядра одинаково устойчивы

§ 81 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР»

При решении задач значение массового числа берём из периодической системы химических элементов. При этом мы, естественно, пренебрегаем массой электронов, которая существенно меньше массы ядра.

При расчётах дефекта масс массу протона заменяем массой атома водорода, а массу ядра массой атома, эта замена не изменит результат, так как масса электронов, входящих в атом водорода, затем вычитается с массой самого атома.

Если в задаче говорится об изотопе какого-то элемента, которого нет в таблице, то всегда приводится значение его массового числа.

Энергию связи удобно считать, беря значение атомной единицы массы равным 931,5 $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$.

Задача 1. Какие элементы имеются в виду под символом X: ${}^{12}_{6}\text{X}$; ${}^{200}_{80}\text{X}$; ${}^{226}_{88}\text{X}$? Сколько протонов и нейтронов в ядре каждого из этих элементов?

Р е ш е н и е. По таблице Менделеева находим элемент с соответствующим атомным номером. Затем сравниваем массовые числа найденного элемента с массовым числом, данным в задаче.

Итак, ${}^{12}_{6}\text{X} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C}$ (углерод), ${}^{200}_{80}\text{X} \rightarrow {}^{200}_{80}\text{Hg}$ (ртуть); ${}^{226}_{88}\text{X} \rightarrow {}^{226}_{88}\text{Ra}$ (радий).

Зарядовое число ядра атома углерода, определяющее число протонов в ядре, $Z = 6$, число нейтронов $N = A - Z = 6$.

Зарядовое число ядра атома ртути $Z = 80$, число нейтронов $N = A - Z = 120$.

Зарядовое число ядра атома радия $Z = 88$, число нейтронов $N = A - Z = 138$.

Задача 2. Масса π-мезона равна 139 МэВ/c^2. Чему равна масса π-мезона в атомных единицах массы?

Р е ш е н и е. 1 а. е. м. = 931,5 МэВ/c^2. Следовательно, масса π-мезона в а. е. м. равна $m_\pi = \frac{139}{931{,}5}$ (а. е. м.) ≈ 0,149 а. е. м.

Задача 3. Определите энергию связи и удельную энергию связи в ядре атома ртути ${}^{200}_{80}\text{Hg}$. Масса покоя ядра 200,028 а. е. м.

Р е ш е н и е. Число протонов в ядре ртути $Z = 80$, число нейтронов $N = 200 - 80 = 120$.

Дефект масс определим по формуле $\Delta m = 80 \cdot 1{,}007276 + 120 \cdot 1{,}008665 - 200{,}028 = 1{,}594$ а. е. м. Отсюда, с учётом того, что 1 а. е. м. = 931,5 $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$, энергия связи равна: $\Delta E_{\text{св}} \approx 1485$ МэВ, $\Delta E_{\text{св. уд}} = \frac{\Delta E_{\text{св}}}{A}$, $\Delta E_{\text{св. уд}} = \frac{1485}{200}\left(\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}\right) \approx 7{,}43\left(\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}\right)$.

Задача 4. Энергия покоя ядра неона $^{20}_{10}\mathrm{Ne}$ равна 18617,7 МэВ. Определите энергию связи ядра неона. Массы нейтрона и протона равны соответственно 1,008665 и 1,007276 а. е. м.

Р е ш е н и е. Ядро неона состоит из 10 протонов и 10 нейтронов.
Дефект масс $\Delta m = 10m_p + 10m_n - m_я$.

Энергия связи, с учётом того, что 1 а. е. м. = 931,5 $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$, определяется из выражения $E_{св} = \Delta m c^2 = (10m_p + 10m_n - m_я)\,c^2 = 10(m_p + m_n)\,c^2 - E_я \approx$ $\approx$ 160,8 МэВ.

Задача 5. Определите энергию связи нейтрона, присоединившегося к ядру изотопа кислорода $^{15}_{8}\mathrm{O}$ (m_1 = 15,003076 а. е. м.), в результате чего образовался изотоп кислорода $^{16}_{8}\mathrm{O}$ (m_2 = 15,994915 а. е. м.).

Р е ш е н и е. Дефект масс при образовании ядра $^{16}_{8}\mathrm{O}$ $\Delta m = m_1 + m_n - m_2$. Энергию связи нейтрона, с учётом того, что 1 а. е. м. = 931,5 $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$, определим из формулы $E_{св} = \Delta m c^2 = (m_1 + m_n - m_2)c^2 \approx 15{,}67$ МэВ.

Задачи для самостоятельного решения

1. Радиус ядра атома с атомной массой A приблизительно равен $r \approx 1{,}3 \cdot 10^{-15}\, A^{1/3}$ м. Какое соотношение между радиусами ядер изотопа углерода $^{15}_{6}\mathrm{C}$ и изотопа азота $^{15}_{7}\mathrm{N}$?

2. По графику зависимости удельной энергии связи от массового числа (см. рис. 12.1) определите энергию связи ядра с массовым числом 100.

3. Пользуясь периодической системой элементов Д. И. Менделеева, определите число протонов и число нейтронов в ядрах атомов фтора, аргона, брома, цезия и золота.



4. Чему равна энергия связи ядра тяжёлого водорода — дейтрона? Атомная масса ядра дейтрона m_D = 2,01355 а. е. м., протона m_p = 1,007276 а. е. м., нейтрона m_n = 1,008665 а. е. м.

5. Вычислите дефект масс ядра атома кислорода $^{18}_{8}\mathrm{O}$. Масса атома кислорода 17,9992 а. е. м.

6. Вычислите энергию связи $^{6}_{3}\mathrm{Li}$. Масса атома лития 6,015123 а. е. м.



1. Чему равна энергия покоя α-частицы? Масса ядра гелия равна 4,00260 а. е. м.

1) 4,0026 МэВ/c^2
2) 3728,42 МэВ/c^2
3) $4{,}447 \cdot 10^{-19}$ Дж
4) $6{,}64 \cdot 10^{-26}$ кг

2. Энергия покоя протона 938,3 МэВ, нейтрона 939,6 МэВ, ядра неона $^{20}_{10}\mathrm{Ne}$ 18617,7 МэВ. Энергия связи ядра неона $^{20}_{10}\mathrm{Ne}$ составляет примерно

1) 25,0 пДж
2) 25,4 пДж
3) 25,8 пДж
4) 26,2 пДж

3. Полные энергии связи нуклонов в ядрах хрома Cr, ванадия V и скандия Sc равны соответственно 52,79; 49,93 и 44,50 МэВ. Из какого ядра труднее выбить нейтрон?

1) все ядра одинаково устойчивы
2) из ядра $^{57}_{24}\mathrm{Cr}$
3) из ядра $^{54}_{23}\mathrm{V}$
4) из ядра $^{48}_{21}\mathrm{Sc}$

§ 82 РАДИОАКТИВНОСТЬ

Что понимают под энергией связи атомного ядра?
Как объяснить стабильность атомных ядер?

Открытие *радиоактивности* — явления, доказывающего сложный состав атомного ядра, — произошло благодаря счастливой случайности. Рентгеновские лучи, как вы помните, впервые были получены при столкновениях быстрых электронов со стеклянной стенкой разрядной трубки. Одновременно наблюдалось свечение стенок трубки. Антуан Анри Беккерель долгое время исследовал подобное явление — свечение веществ, облучённых солнечным светом. К таким веществам относятся, в частности, соли урана, с которыми экспериментировал учёный.

И вот у него возник вопрос: не появляются ли после облучения солей урана наряду с видимым светом и рентгеновские лучи? Беккерель завернул фотопластинку в плотную чёрную бумагу, положил сверху крупинки урановой соли и выставил на яркий солнечный свет. После проявления фотопластинка почернела на тех участках, где лежала соль. Следовательно, уран создавал какое-то излучение, которое, подобно рентгеновскому, пронизывает непрозрачные тела и действует на фотопластинку. Беккерель думал, что это излучение возникает под влиянием солнечных лучей.

Но однажды, в феврале 1896 г., провести очередной опыт ему не удалось из-за облачной погоды. Беккерель убрал пластинку в ящик стола, положив на неё сверху медный крест, покрытый солью урана. Проявив на всякий случай фотопластинку два дня спустя, он обнаружил на ней почернение в форме отчётливой тени креста. Это означало, что *соли урана самопроизвольно*, без каких-либо внешних влияний, *создают какое-то излучение*.

Начались интенсивные исследования. Конечно, не будь этой счастливой случайности, радиоактивные явления всё равно были бы открыты, но, возможно, значительно позже.

Вскоре Беккерель обнаружил, что излучение урановых солей ионизирует воздух, подобно рентгеновским лучам, и разряжает электроскоп. Испробовав различные химические соединения урана, он установил очень важный факт:

Важно интенсивность самопроизвольного излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его атомам.

Естественно было попытаться обнаружить, не обладают ли способностью к самопроизвольному излучению другие химические элементы, кроме урана. В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри во Франции и другие учёные открыли излучение *тория*. В дальнейшем главные усилия в поисках новых элементов были предприняты Марией Склодовской-Кюри и её мужем — Пьером Кюри. Систематическое исследование руд, содержащих уран

и торий, позволило им выделить новый, неизвестный ранее химический элемент — *полоний*, названный так в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши.

Наконец, был открыт ещё один элемент, дающий очень интенсивное излучение. Его назвали *радием* (т. е. лучистым). Наблюдаемые явления превращения ядер Кюри назвали *радиоактивностью*.



М. Склодовская-Кюри (1867—1934)

Подумайте, как можно разделить компоненты, из которых состоит урановая руда.

Запомни

Радиоактивность — это способность нестабильных ядер превращаться в другие ядра, при этом процесс превращения сопровождается испусканием различных частиц.

Самопроизвольный распад нестабильных ядер называется **естественной радиоактивностью**.

Радий имеет относительную атомную массу, равную 226, и занимает в таблице Д. И. Менделеева клетку под номером 88. До открытия Кюри эта клетка пустовала. По своим химическим свойствам радий принадлежит к щелочноземельным элементам.

Впоследствии было установлено, что все химические элементы с порядковым номером более 83 являются радиоактивными.

Виды радиоактивного распада. После открытия радиоактивных элементов началось исследование физической природы их излучения. Кроме Беккереля и супругов Кюри, этим занялся Резерфорд.

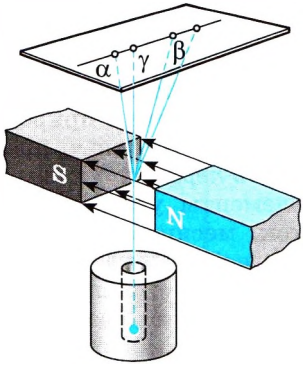


Рис. 12.2

Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, состоял в следующем. Препарат радия помещали на дно узкого канала в куске свинца. Против канала находилась фотопластинка. На выходившее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны лучу (рис. 12.2). Вся установка размещалась в вакууме.

В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно тёмное пятно точно напротив канала. В магнитном поле пучок распадался на три пучка. Две составляющие первичного потока отклонялись в противоположные стороны. Это указывало на наличие у этих излучений электрических зарядов противоположных знаков. При этом отрицательный

Подумайте, какая сила действует на движущийся электрический заряд. Применяя правило левой руки, определите знаки зарядов (см. рис. 12.2) отклонившихся в магнитном поле частиц.

компонент излучения отклонялся магнитным полем гораздо сильнее, чем положительный. Третья составляющая совсем не отклонялась магнитным полем.

Запомни Положительно заряженный компонент получил название **альфа-лучей**, отрицательно заряженный — **бета-лучей** и нейтральный — **гамма-лучей** (α-лучи, β-лучи, γ-лучи).

Эти три вида излучения очень сильно различаются по проникающей способности, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей проникающей способностью обладают α-лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1 мм для них уже непрозрачен. Если прикрыть отверстие в свинцовой пластинке листочком бумаги, то на фотопластинке не обнаружится пятна, соответствующего α-излучению.

Гораздо меньше поглощаются при прохождении через вещество β-лучи. Алюминиевая пластинка полностью их задерживает только при толщине в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ-лучи.

Интенсивность поглощения γ-лучей усиливается с увеличением атомного номера вещества-поглотителя. Но и слой свинца толщиной в 1 см не является для них непреодолимой преградой. При прохождении γ-лучей через такой слой свинца их интенсивность ослабевает лишь вдвое.

Физическая природа α-, β- и γ-лучей, очевидно, различна.

Радиоактивные превращения обладают рядом необычных свойств.

Во-первых, удивительным было постоянство, с которым радиоактивные элементы уран, торий и радий испускают излучения. На протяжении суток, месяцев и даже лет интенсивность излучения заметно не изменялась. На неё не оказывали никакого влияния такие обычные воздействия, как нагревание, облучение электромагнитными волнами и увеличение давления. Химические реакции, в которые вступали радиоактивные вещества, также не влияли на интенсивность излучения.

Во-вторых, очень скоро после открытия радиоактивности выяснилось, что радиоактивность сопровождается выделением энергии. Пьер Кюри поместил ампулу с хлоридом радия в калориметр. В нём поглощались α-, β- и γ-лучи, и за счёт их энергии калориметр нагревался. Кюри определил, что радий массой 1 г выделяет за 1 ч энергию, примерно равную 582 Дж. И такая энергия выделяется непрерывно на протяжении многих лет!

Естественная радиоактивность. α-, β- и γ-излучение Найти

1. Какой опыт позволил обнаружить разные виды излучения?
2. Чем отличаются α- и β-излучение от γ-излучения?
3. Что называется естественной радиоактивностью?

§ 83 ВИДЫ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С какими видами радиоактивного излучения вы познакомились?

Альфа-частицы. Труднее было выяснить природу α-частиц, так как они слабее отклоняются магнитным и электрическим полями. Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду. Он измерил отношение заряда q частицы к её массе m по отклонению в магнитном поле. Оно оказалось примерно в 2 раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода. Заряд протона равен элементарному, а его масса очень близка к атомной единице массы. Следовательно, у α-частицы на один элементарный заряд приходится масса, равная двум атомным единицам массы.

Но заряд α-частицы и её масса оставались тем не менее неизвестными. Следовало измерить либо заряд, либо массу α-частицы. С появлением счётчика Гейгера (см. § 86) стало возможным проще и точнее измерить заряд. Сквозь очень тонкое окошко α-частицы могут проникать внутрь счётчика и регистрироваться им.

Резерфорд поместил на пути α-частиц счётчик Гейгера, который измерял число частиц, испускавшихся радиоактивным препаратом за определённое время. Затем он поставил на место счётчика металлический цилиндр, соединённый с чувствительным электрометром (рис. 12.3). Электрометром Резерфорд измерял заряд α-частиц, испущенных источником внутрь цилиндра за такое же время (радиоактивность многих веществ почти не меняется со временем). Зная суммарный заряд α-частиц и их число, Резерфорд определил отношение этих величин, т. е. заряд одной α-частицы. Этот заряд оказался равным двум элементарным.

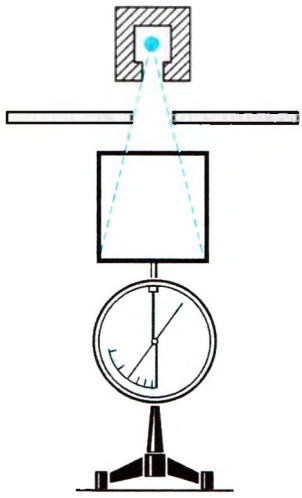


Рис. 12.3

Таким образом, он установил, что у α-частицы на каждый из двух элементарных зарядов приходится две атомные единицы массы. Следовательно, на два элементарных заряда приходится четыре атомные единицы массы.

Такой же заряд и такую же относительную атомную массу имеет ядро гелия. Из этого следует, что α-частица — это ядро атома гелия.

Не довольствуясь достигнутым результатом, Резерфорд затем ещё прямыми опытами доказал, что при радиоактивном α-распаде образуется именно гелий. Собирая α-частицы внутри специального резервуара на протяжении нескольких дней, он с помощью спектрального анализа убедился в том, что в сосуде накапливается гелий (каждая α-частица захватывала два электрона и превращалась в атом гелия).

Превращения ядер подчиняются так называемому *правилу смещения*, сформулированному впервые английским химиком Ф. Содди.

Правило смещения для α распада При α-распаде ядро теряет положительный заряд $2e$ и масса его убывает примерно на четыре атомные единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки *к началу* периодической системы.

Схему α-распада можно записать так:

$$^{M}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{M-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Примером α-распада является превращение радия в радон:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Необходимо отметить, что

Важно при всех ядерных превращениях сохраняются массовые (число нуклонов) и зарядовые числа, также выполняются все известные законы сохранения: энергии, импульса, момента импульса, заряда.

Исследования, начатые Резерфордом и продолженные им совместно с Ф. Содди, показали, что превращения испытывали и другие радиоактивные элементы: уран, актиний, радий.

Резерфорд обнаружил, что *активность* тория остаётся неизменной в закрытой ампуле.

Запомни **Активность** радиоактивного вещества — это число распадов за 1 с.

Если же препарат обдувается даже очень слабыми потоками воздуха, то активность тория сильно уменьшается. Учёный предположил, что одновременно с α-частицами торий испускает какой-то радиоактивный газ.

Удаляя насосом воздух из ампулы, содержащей торий, Резерфорд выделил радиоактивный газ и исследовал его ионизирующую способность. Оказалось, что активность этого газа (в отличие от активности тория, урана и радия) очень быстро убывает со временем. Каждую минуту активность убывает вдвое, и через десять минут она становится практически равной нулю. Содди исследовал химические свойства этого газа и установил, что он не вступает ни в какие реакции, т. е. является инертным газом. Впоследствии этот газ был назван радоном и помещён в периодической системе Д. И. Менделеева под порядковым номером 86.

Бета-лучи. С самого начала α- и β-лучи рассматривались как потоки заряженных частиц. Проще всего было экспериментировать с β-лучами, так как они сильнее отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле.

Основная задача экспериментаторов состояла в определении заряда и массы частиц. При исследовании отклонения β-частиц в электрических и магнитных полях было установлено, что они представляют собой не что иное, как электроны, движущиеся со скоростями, очень близкими к скорости света. Существенно, что скорости β-частиц, испущенных

Вспомните, от чего зависит радиус кривизны траектории частицы, влетевшей в магнитное поле под углом к линиям магнитной индукции.

каким-либо радиоактивным элементом, неодинаковы. Встречаются частицы с самыми различными скоростями. Это и приводит к расширению пучка β-частиц в магнитном поле (см. рис. 12.2).

Однако наблюдались и другие лучи, состоящие, как выяснилось, из «положительно заряженных электронов». В 1934 г. Фредерик и Ирен Жолио-Кюри, исследуя радиоактивный изотоп фосфора, обнаружили излучение частиц, названных *позитронами*.

Запомни **Позитрон** — это частица, заряд которой равен модулю заряда электрона и масса которой равна массе электрона.

Таким образом, существует два вида бета-распада: β^-- и β^+-распад.

Исследования показали, что при бета-распаде электрон, или позитрон, уносит не всю энергию, образующуюся при распаде, в связи с чем австрийский физик-теоретик В. Паули предположил, что при распаде образуется ещё одна частица. Чуть позже, создавая теорию β^+-распада, итальянский физик Э. Ферми назвал эту частицу *нейтрино*.



Рассмотрим сначала β^--распад. В его основе лежит способность нейтрона превращаться в протон. Примером β^--распада является превращение ядра углерода в ядро азота:

Интересно Слово «нейтрино» происходит от итальянского слова neutrino — нейтрончик, маленький нейтрон.

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}.$$

При β^--распаде из ядра вылетает электрон и *антинейтрино*. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остаётся почти неизменной. Общая схема β^--распада следующая:

Обсудите: если бы скорости и заряды всех частиц были одинаковыми, а массы — разными, то как бы выглядел пучок частиц в магнитном поле?

$$^{M}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{M}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e.$$

Здесь $^{0}_{-1}e$ обозначает электрон: индекс 0 вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с атомной единицей массы, $^{0}_{0}\tilde{\nu}_e$ — электронное антинейтрино — нейтральная частица с очень малой (возможно, нулевой) массой, уносящая при β^--распаде часть энергии. Образованием антинейтрино сопровождается β^--распад любого ядра, и в уравнениях соответствующих реакций эту частицу часто не указывают.

β^--распад также подчиняется *правилу смещения*.

Правило смещения для β^- распада В результате β^--распада элемент смещается на одну клетку *ближе к концу* периодической системы.

Второй вид бета-распада — β^+-распад с излучением позитрона можно объяснить так. Протон в ядре заимствует энергию у других нуклонов ядра, в этом случае его радиоактивное превращение в нейтрон становится возможным, при этом образуются три частицы — нейтрон, позитрон и нейтрино:

Запишите общую схему β^+-распада.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu.$$

Для β^+-распада также справедливо *правило смещения*.

Правило смещения для β^+-распада В результате β^+-распада элемент смещается на одну клетку *ближе к началу* периодической системы.

Существует ещё третий вид превращений ядер с участием β-частиц, который называется *K-захватом*. Ядро поглощает один из электронов атома, в результате чего протон превращается в нейтрон, при этом испускается нейтрино. Примером такого распада является превращение калия в аргон:

$$^{40}_{19}\mathrm{K} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}\mathrm{Ar} + \nu.$$

Запишите общую схему *K*-захвата.

Гамма-лучи. По своим свойствам γ-лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводило на мысль, что γ-лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ-лучей на кристаллах и измерена их длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

Скорость распространения γ-лучей такая же, как и всех электромагнитных волн, — около 300 000 км/с.

Важно Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда ядра; масса же ядра меняется ничтожно мало.

γ-Излучение сопровождает радиоактивный распад в том случае, если новое образовавшееся ядро, например в результате α-распада, находится в возбуждённом состоянии. Рассмотрим, например, распад ядра урана $^{238}_{92}\mathrm{U}$. Он может происходить последовательно в два этапа. Сначала образуются продукты распада — торий $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ и α-частица. Выделяющаяся при распаде энергия в основном расходуется на энергию ядра тория и кинетическую энергию α-частицы, оставшаяся же часть энергии идёт на возбуждение ядра тория. Возбуждённое ядро тория через короткое время переходит в невозбуждённое состояние, испуская γ-квант.

Интересно Существование возбуждённых состояний ядер с относительно большим «временем жизни» открыл советский физик И. В. Курчатов.

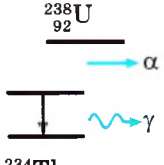


Рис. 12.4

Таким образом, ядро, так же как и атом, может находиться на разных энергетических уровнях.

На рисунке 12.4 показана схема энергетических уровней ядер урана и тория в возбуждённом и невозбуждённом состояниях. Самый низкий уровень соответствует невозбуждённому состоянию ядра тория. При переходе ядра тория с более высокого энергетического уровня на более низкий происходит излучение γ-кванта, энергия которого равна 0,05 МэВ.

Таким образом, спектр излучения ядра является линейчатым.

γ-Излучение возникает также при резком торможении электронов при прохождении их через вещество. В этом случае спектр излучения сплошной.

Общий *вывод*, который сделали учёные, был точно сформулирован Резерфордом: «Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным видоизменениям. В каждый момент небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома — α-частица. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением лучей, обладающих, подобно рентгеновским лучам, большой проникающей способностью и называемых γ-излучением.

Посчитайте частоту γ-излучения при распаде ядра урана с образованием ядра тория и α-частицы.

Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, само также неустойчиво и испытывает превращение с испусканием характерного радиоактивного излучения.

Таким образом, точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях».

Интересно

Слово «спонтанный» происходит от латинского слова spontaneus — самопроизвольный.

При спонтанных видоизменениях, описанных Резерфордом, могут образовываться и стабильные ядра.

Как вы считаете, о каком распаде говорит Резерфорд: о распаде атома или о распаде его ядра?

Виды распада ядер. Закон смещения

Найти

1. Почему выяснить природу α-лучей оказалось гораздо сложнее, чем в случае β-лучей?
2. Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивном распаде?

1. Фосфор $^{32}_{15}P$ испытал β^--распад. Какой заряд и массовое число будет у нового элемента? Какой это элемент?

1) $^{28}_{14}Si$ 2) $^{31}_{15}P$ 3) $^{32}_{16}S$ 4) $^{14}_{7}Na$

2. Какой порядковый номер в таблице Менделеева имеет элемент, который образуется в результате α-распада ядра элемента с порядковым номером Z?

1) $Z + 2$ 2) $Z + 1$ 3) $Z - 2$ 4) $Z - 1$

§ 84 ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

Что такое активность радиоактивного вещества?
Как она зависит от времени?

Резерфорд установил опытным путём, что активность вещества убывает с течением времени. Так, активность радона убывает в 2 раза уже через 1 мин. Активность таких элементов, как уран, торий и радий, тоже убывает со временем, но гораздо медленнее. Для каждого радиоактивного вещества существует определённый интервал времени, на протяжении которого активность убывает в 2 раза. Этот интервал носит название *периода полураспада*.

Запомни **Период полураспада** T — это время, в течение которого распадается половина начального числа радиоактивных атомов.

Спад активности, т. е. числа распадов в секунду, в зависимости от времени для одного из радиоактивных препаратов изображён на рисунке 12.5. Для разных веществ период полураспада разный.

Важно *Период полураспада* — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем быстрее уменьшается активность вещества.

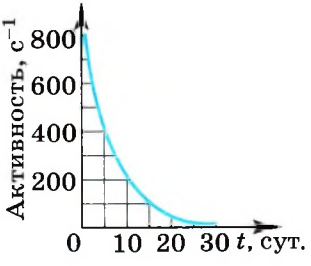


Рис. 12.5

Выведем теперь математическую форму закона радиоактивного распада. Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t = 0$) равно N_0. Тогда по истечении периода полураспада это число будет равно $\frac{N_0}{2}$.

Спустя ещё один такой же интервал времени это число станет равным:

$$\frac{1}{2}\frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

По истечении времени $t = nT$, т. е. спустя n периодов полураспада T, радиоактивных атомов останется:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Поскольку $n = \frac{t}{T}$, то, подставив это выражение в предыдущую формулу, получим основной *закон радиоактивного распада*.

Закон радиоактивного распада Число нераспавшихся радиоактивных ядер в любой момент времени определяется по формуле

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \qquad (12.6)$$

Закон радиоактивного распада можно представить в другой форме. Для этого запишем число 2 в виде $2 = e^{\ln 2}$, где e — основание натурального логарифма, $e \approx 2{,}718$, $\ln 2 = 0{,}693$. Тогда число радиоактивных ядер

$$N = N_0 e^{-\frac{0{,}693t}{T}}. \qquad (12.7)$$

Число распавшихся ядер определим по формуле

$$N_{\text{расп}} = N_0 - N_0 \cdot e^{-\frac{0{,}693t}{T}}.$$

Известно, что активность радиоактивного вещества определяется скоростью распада. Найдём производную по времени $N'_{\text{расп}}$, которая и будет равна активности вещества:

$$A = N'_{\text{расп}} = 0 - N_0\left(-\frac{0{,}693}{T}\right)e^{-\frac{0{,}693t}{T}} = \frac{0{,}693}{T}N_0 e^{-\frac{0{,}693t}{T}} = N\frac{0{,}693}{T}.$$

Единицей активности в СИ является *беккерель* (Бк). Беккерель — это активность вещества, в котором за 1 с распадается одно ядро.

Период полураспада урана $^{238}_{92}U$ равен 4,5 млрд лет. Именно поэтому активность урана на протяжении нескольких лет заметно не меняется. Период полураспада радия значительно меньше — он равен 1600 лет. Поэтому активность радия значительно больше активности урана. Есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Чтобы, пользуясь формулой (12.6), определить период полураспада, надо знать число N_0 атомов в начальный момент времени и число N нераспавшихся атомов спустя определённый интервал времени t.

Сам закон радиоактивного распада довольно прост. Но физический смысл этого закона уяснить себе нелегко. Действительно, согласно этому закону

Важно за любой интервал времени распадается *одна и та же доля* имеющихся ядер (за период полураспада — половина ядер).

Значит, с течением времени скорость распада нисколько не меняется?

Радиоактивные ядра «не стареют». Так, ядра радона, возникающие при распаде радия, претерпевают радиоактивный распад как сразу же после

Интересно

«Следует отметить, что закон превращений одинаков для всех радиоэлементов, являясь самым простым и в то же время практически необъяснимым. Этот закон имеет вероятностную природу. Его можно представить в виде духа разрушения, который в каждый данный момент наугад расщепляет определённое количество существующих атомов, не заботясь об отборе тех из них, которые близки к своему распаду». Ф. Содди.

Проанализируйте последнюю формулу и сделайте вывод, от чего зависит активность радиоактивного вещества.

Подумайте, можно ли сказать, что период полураспада — одна из характеристик радиоактивного вещества. Можно ли по периоду полураспада определить, с каким радиоактивным веществом мы имеем дело?

своего образования, так и спустя 10 мин после этого. Распад любого атомного ядра — это, так сказать, не «смерть от старости», а «несчастный случай» в его жизни. Для радиоактивных ядер не существует понятия возраста. Можно определить лишь их *среднее время жизни* τ.

Время существования отдельных ядер может варьироваться от долей секунды до миллиардов лет. Атом урана, например, может спокойно пролежать в земле миллиарды лет и внезапно взорваться, тогда как его соседи благополучно продолжают оставаться в прежнем состоянии. Среднее время жизни τ — это просто среднее арифметическое времени жизни достаточно большого количества атомов данного вида. Оно прямо пропорционально периоду полураспада. Предсказать, когда произойдёт распад ядра данного атома, невозможно. Смысл имеют только утверждения о поведении в среднем большой совокупности атомов.

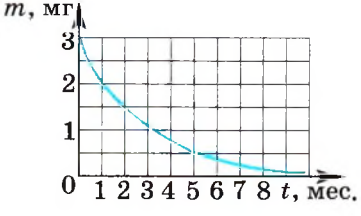
Важно Закон радиоактивного распада определяет *среднее число ядер атомов*, распадающихся за определённый интервал времени.

Всегда имеются неизбежные отклонения от среднего значения, и чем меньше количество радиоактивных ядер в препарате, тем больше эти отклонения. Закон радиоактивного распада является *статистическим законом*.

Период полураспада. Закон радиоактивного распада — Найти

1. Что называется периодом полураспада?
2. Можно ли предсказать момент распада данного ядра?
3. Почему закон радиоактивного распада считают статистическим законом?

1. Радиоактивный изотоп имеет период полураспада 2 мин. Сколько ядер из 1000 ядер этого изотопа испытает радиоактивный распад за 2 мин?
1) точно 500 ядер
2) 500 или немного меньше ядер
3) 500 или немного больше ядер
4) около 500 ядер, может быть, немного больше или немного меньше



2. На рисунке показан график изменения массы находящегося в пробирке радиоактивного изотопа с течением времени. Период полураспада этого изотопа равен
1) 1 мес. 2) 2 мес. 3) 4 мес. 4) 8 мес.

3. Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Чему равен период полураспада этого элемента?
1) 32 дня 2) 16 дней 3) 4 дня 4) 2 дня

4. Какая доля радиоактивных атомов останется нераспавшейся через интервал времени, равный двум периодам полураспада?
1) 25 % 2) 50 % 3) 75 % 4) 100 %

§ 85 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА»

Приведённые примеры относятся к явлению естественной радиоактивности. При радиоактивном распаде выполняются законы сохранения массового и зарядового чисел, позволяющие определить элемент, получившийся в результате известного распада, или, наоборот, вид распада.

При решении задач на закон радиоактивного распада период полураспада данного радиоактивного вещества определяется по таблице.

Задача 1. Какой химической элемент образуется после двух α-распадов, и двух β-распадов изотопа $^{232}_{90}\mathrm{Th}$?

Р е ш е н и е. Запишем уравнение распада: $^{232}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{-1}e$.

Массовое число ядра, образовавшегося в результате распадов, $A = 232 - 2 \cdot 4 = 224$.

Зарядовое число $Z = 90 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot (-1) = 88$.

По периодической таблице элементов находим элемент с атомным номером 88 — радий. В результате распада образуется изотоп радия $^{224}_{88}\mathrm{Ra}$.

Задача 2. Напишите недостающую частицу или ядро при следующих ядерных превращениях: $^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U} + \ldots$; $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + \ldots$.

Р е ш е н и е. Воспользовавшись законами сохранения массового и зарядового чисел, находим:

$$^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U} + {}^{0}_{-1}e; \qquad {}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Суммы массовых и зарядовых чисел в уравнении справа равны массовому и зарядовому числам элемента, испытывающего распад.

Заметим, что при β-распаде образуется электронное антинейтрино, но его массовое и зарядовое числа равны нулю — $^{0}_{0}\tilde{\nu}_{e}$.

Задача 3. Определите, в какой момент времени число нераспавшихся ядер изотопа углерода $^{14}_{6}\mathrm{C}$ станет равным 10^{11}, если в начальный момент число ядер равно 10^{22}. Период полураспада равен 5730 лет.

Р е ш е н и е. Закон радиоактивного распада имеет вид $N = N_0 \cdot 2^{-t/T}$, откуда $t = \dfrac{T \lg \dfrac{N_0}{N}}{\lg 2} \approx 2{,}09 \cdot 10^5$ лет.

Задача 4. Чему равно отношение числа распавшихся ядер двух порций радиоактивного вещества спустя четверть периода полураспада, если в одной порции было в начальный момент времени 10^6 ядер, а в другой — 10^8?

Р е ш е н и е. Число распавшихся ядер в первой порции в момент времени t найдём согласно закону радиоактивного распада:

$$N_1 = N_{01} - N_{01} \cdot 2^{-\frac{t}{T}} = N_{01}(1 - 2^{-\frac{t}{T}}).$$

Во второй порции $N_2 = N_{02}(1 - 2^{-\frac{t}{T}})$.

Отношение числа распавшихся к моменту времени t ядер

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{N_{01}\left(1 - 2^{-\frac{t}{T}}\right)}{N_{02}\left(1 - 2^{-\frac{t}{T}}\right)} = \frac{N_{01}}{N_{02}} = 0{,}01.$$

Задача 5. Массовые числа изотопов хлора 35 а. е. м. и 37 а. е. м. Обсудите, как определить процентное содержание этих изотопов в естественном состоянии.

Р е ш е н и е. В естественном состоянии относительная масса атома хлора равна примерно 35,5 а. е. м.

Обозначим часть хлора ^{35}Cl в естественном состоянии через x, тогда часть хлора ^{37}Cl равна $(1 - x)$.

Составим уравнение: $35x + 37(1 - x) = 35{,}5$. Решая это уравнение, получим $x = 0{,}75$. Следовательно, изотопа ^{35}Cl — 75 %, а ^{37}Cl — 25 %.

Задачи для самостоятельного решения

1. В результате последовательной серии радиоактивных распадов уран $^{238}_{92}U$ превращается в свинец $^{206}_{82}Pb$. Сколько α- и β-превращений он при этом испытывает?

2. Период полураспада радия $T = 1600$ лет. Через какое время число атомов уменьшится в 4 раза?

3. Во сколько раз уменьшится число атомов одного из изотопов радона за 1,91 сут.? Период полураспада этого изотопа радона $T = 3{,}82$ сут.

4. Радиоактивный азот $^{13}_{7}N$ при распаде превращается в изотоп углерода $^{13}_{6}C$. Напишите уравнение ядерной реакции. Какая частица при этом излучается?

5. Период полураспада изотопа водорода $^{3}_{1}H$ $T = 12{,}3$ года. Определите количество ядер, распавшихся за 24,6 года. Начальное число ядер было равно 1 млн.

1. Препарат активностью $1{,}7 \cdot 10^{11}$ частиц в секунду помещён в медный контейнер массой 0,5 кг. На сколько повысилась температура контейнера за 1 ч, если известно, что данное радиоактивное вещество испускает α-частицы энергией 5,3 МэВ? Считайте, что энергия всех α-частиц полностью переходит во внутреннюю энергию контейнера. Теплоёмкостью препарата и теплообменом с окружающей средой можно пренебречь. Удельная теплоёмкость меди 380 Дж/(кг · К).

2. Образец, содержащий радий, за 1 с испускает $3{,}7 \cdot 10^{10}$ α-частиц. За 1 ч выделяется энергия 100 Дж. Чему равна скорость α-частицы? Энергией отдачи ядер, γ-излучением и релятивистскими эффектами можно пренебречь. Молярная масса гелия 0,004 кг/моль.

§ 86 МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Какие частицы образуются в результате распада ядер? Как их разделяют?

На основе экспериментов был определён размер ядра атома, обнаружен нейтрон и мезоны, частицы, появляющиеся в результате радиоактивного распада.

Познакомимся с устройствами, благодаря которым возникла и начала развиваться физика атомного ядра и элементарных частиц. Это устройства для регистрации и изучения столкновений и взаимных превращений ядер и элементарных частиц. Именно они дают людям необходимую информацию о микромире.

Принцип действия приборов для регистрации элементарных частиц. Любое устройство, регистрирующее элементарные частицы или движущиеся атомные ядра, подобно заряженному ружью с взведённым курком. Небольшое усилие при нажатии на спусковой крючок ружья вызывает эффект, не сравнимый с затраченным усилием, — выстрел.

Важно

Регистрирующий прибор — это, как правило, сложная макроскопическая система, которая может находиться в неустойчивом состоянии. При небольшом возмущении, вызванном пролетевшей частицей, начинается процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние. Этот процесс и позволяет регистрировать частицу.

В настоящее время используется множество различных методов регистрации частиц.

В зависимости от целей эксперимента и условий, в которых он проводится, применяются те или иные регистрирующие устройства, отличающиеся друг от друга по основным характеристикам.

Газоразрядный счётчик Гейгера. Счётчик Гейгера — один из важнейших приборов для автоматического подсчёта частиц.

Счётчик (рис. 12.6) состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод). Трубка заполняется газом, обычно аргоном. Действие счётчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица (электрон, α-частица и т.д.), пролетая в газе, отрывает от атомов электроны и создаёт положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация.

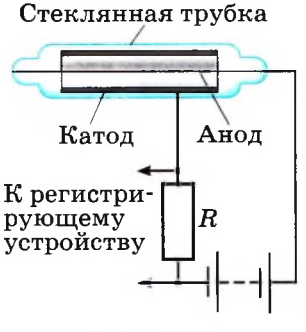


Рис. 12.6

Возникает лавина ионов, и ток через счётчик резко возрастает. При этом на нагрузочном резисторе R

Обсудите, в чём состоит явление ионизации атома. Что такое потенциал ионизации?

образуется импульс напряжения, который подаётся в регистрирующее устройство.

Для того чтобы счётчик мог регистрировать следующую попавшую в него частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически. Так как в момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, то напряжение между анодом и катодом резко уменьшается — настолько, что разряд прекращается.

Счётчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов и γ-квантов (фотонов большой энергии).

Оцените точность подсчёта частиц с помощью описанного устройства.

В настоящее время созданы счётчики, работающие на иных принципах.

Камера Вильсона. Счётчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать некоторые её характеристики. В камере же Вильсона, созданной в 1912 г., быстрая заряженная частица оставляет след, который можно наблюдать непосредственно или сфотографировать. Этот прибор можно назвать окном в микромир, т. е. мир элементарных частиц и состоящих из них систем.

Принцип действия камеры Вильсона основан на конденсации перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек воды. Эти ионы создаёт вдоль своей траектории движущаяся заряженная частица.

Вспомните процесс конденсации. Каким образом можно получить перенасыщенный пар? Что необходимо для начала конденсации пара?

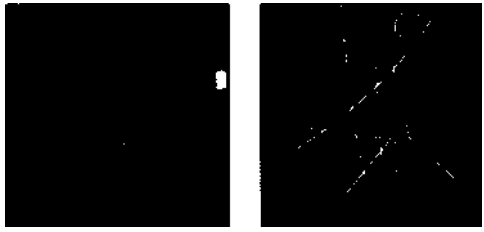
Камера Вильсона представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению (рис. 12.7). При резком опускании поршня, вызванном уменьшением давления под ним, пар в камере адиабатно расширяется. Вследствие этого происходит охлаждение, и пар становится перенасыщенным. Это — неустойчивое состояние пара: он легко конденсируется, если в сосуде появляются центры конденсации. Центрами конденсации становятся ионы, которые образует в рабочем пространстве камеры пролетевшая частица. Если частица проникает в камеру сразу после расширения пара, то на её пути появляются капельки воды. Эти капельки образуют видимый след пролетевшей частицы — *трек* (рис. 12.8, *а*). В этот момент происходит фотографирование рабочего объёма камеры из нескольких точек, чтобы получить пространственную картину. Затем камера возвращается в исходное состояние, и ионы удаляются электрическим полем.



Рис. 12.7

В зависимости от размеров камеры время восстановления рабочего режима варьируется от нескольких секунд до десятков минут.

Информация, которую дают треки в камере Вильсона, значительно богаче той, которую могут дать счётчики. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека — её скорость. Чем длиннее трек частицы, тем больше её энергия. А чем больше капелек воды образуется на единицу длины трека, тем меньше скорость частицы. Частицы с бóльшим зарядом оставляют трек большей толщины.



а) б)

Рис. 12.8

Обсудите, каким может быть соотношение рабочего и подготовительного промежутков времени работы камеры Вильсона.

Советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын предложили помещать камеру Вильсона в однородное магнитное поле. Магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу с определённой силой (силой Лоренца). Эта сила искривляет траекторию частицы, не изменяя модуля её скорости. Трек имеет тем бóльшую кривизну, чем больше заряд частицы и чем меньше её масса. По радиусу кривизны трека можно определить отношение заряда частицы к её массе. Если известна одна из этих величин, то можно вычислить другую. Например, по заряду частицы и радиусу кривизны её трека можно найти массу частицы.

Пузырьковая камера. В 1952 г. американским учёным Д. Глейзером было предложено использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах (центрах парообразования), образующихся при движении быстрой заряженной частицы, появляются пузырьки пара, дающие видимый трек. Камеры данного типа были названы *пузырьковыми*.

В исходном состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим её от закипания, несмотря на то что температура жидкости несколько выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой, и в течение небольшого времени она будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие именно в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара (рис. 12.8, *б*). В качестве жидкости используются главным образом жидкий водород и пропан. Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры невелика — около 0,1 с.

Вспомните, при каких условиях наблюдается процесс кипения жидкости и как он начинается.

Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона обусловлено большей плотностью рабочего вещества. Пробеги частиц вследствие этого оказываются достаточно короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере. Это позволяет наблюдать серию последовательных превращений частицы и вызываемые ею реакции.

Треки в камере Вильсона и пузырьковой камере — один из главных источников информации о поведении и свойствах частиц.

Наблюдение следов элементарных частиц производит на экспериментатора сильное впечатление, создаёт ощущение непосредственного соприкосновения с микромиром.

Метод толстослойных фотоэмульсий. Для регистрации частиц наряду с камерами Вильсона и пузырьковыми камерами применяются толстослойные фотоэмульсии. Ионизирующее действие быстрых заряженных частиц на эмульсию фотопластинки позволило французскому физику А. Беккерелю открыть в 1896 г. радиоактивность. Метод фотоэмульсии был развит советскими физиками Л. В. Мысовским, Г. Б. Ждановым и др.

Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристалликов бромида серебра. Быстрая заряженная частица, пронизывая кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зёрен серебра образует трек частицы (рис. 12.9). По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы.

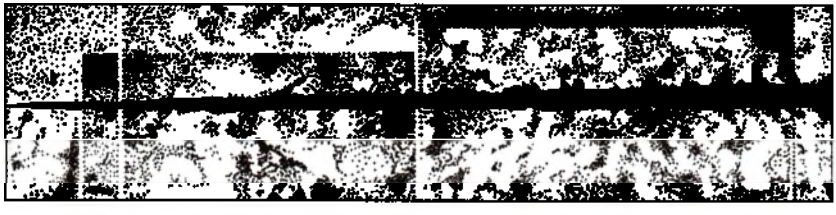


Рис. 12.9

Из-за большой плотности фотоэмульсии треки получаются очень короткими (порядка 10^{-3} см для α-частиц, испускаемых радиоактивными элементами), но при фотографировании их можно увеличить.

Преимущество фотоэмульсий в том, что время экспозиции может быть сколь угодно большим. Это позволяет регистрировать редкие явления. Важно и то, что благодаря большой тормозящей способности фотоэмульсий увеличивается число наблюдаемых интересных реакций между частицами и ядрами.

Мы рассказали далеко не о всех приборах, регистрирующих частицы. Современные приборы для обнаружения редко встречающихся и короткоживущих частиц очень сложны. В их создании принимают участие сотни людей.

Треки. Регистрация элементарных частиц

Найти

1. Можно ли с помощью камеры Вильсона регистрировать незаряженные частицы?
2. Какие преимущества имеет пузырьковая камера по сравнению с камерой Вильсона?

§ 87 ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Дайте определение естественной радиоактивности.
Что такое самопроизвольный распад ядер?

Впервые в истории человечества искусственное превращение ядер осуществил Резерфорд в 1919 г. Это было уже не случайное открытие.

Так как ядро весьма устойчиво и ни высокие температуры, ни давление, ни электромагнитные поля не вызывают его разрушения, то Резерфорд предположил, что для этого нужна очень большая энергия. Наиболее подходящими носителями большой энергии в то время были α-частицы, вылетающие из ядер при радиоактивном распаде.

Первым ядром, подвергшимся искусственному преобразованию, было ядро атома азота $^{14}_{7}\mathrm{N}$.

Бомбардируя азот α-частицами большой энергии, испускаемыми радием, Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода.

Запомни

Искусственная радиоактивность — это возникновение радиоактивных ядер в результате захвата частиц устойчивым ядром нерадиоактивных элементов или в результате слияния или распада ядер.

В первых опытах регистрация протонов проводилась методом сцинтилляций, и их результаты не были достаточно убедительными и надёжными.

Вспомните, в каком опыте Резерфорда использовался метод сцинтилляций.

Но спустя несколько лет превращение азота удалось наблюдать в камере Вильсона. Примерно одна α-частица на каждые 50 000 α-частиц, испущенных радиоактивным препаратом в камере, поглощается ядром азота, что и приводит к испусканию протона. При этом ядро азота превращается в ядро изотопа кислорода:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

На рисунке 12.10 показана одна из фотографий этого процесса. Слева видна характерная «вилка» — разветвление трека. Жирный след принадлежит ядру кислорода, а тонкий — протону. Остальные α-частицы не претерпевают столкновений с ядрами, и их треки прямолинейны. Другими исследователями были обнаружены превращения под влиянием α-частиц ядер фтора, натрия, алюминия и др., сопровождающиеся испусканием протонов. Ядра тяжёлых элементов, находящихся в конце периодической системы, не испытывали превращений. Очевидно, из-за большого электрического (положительного) заряда ядра α-частица не могла приблизиться к ядру вплотную.

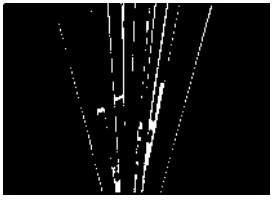


Рис. 12.10

Открытие нейтрона. В 1932 г. произошло важнейшее для всей ядерной физики событие: учеником Резерфорда английским физиком Д. Чедвиком был открыт *нейтрон*. При бомбардировке бериллия α-частицами протоны не появлялись. Но обнаружилось какое-то сильно проникающее излучение, способное преодолеть такую преграду, как свинцовая пластина толщиной 10—20 см. Было сделано предположение, что это γ-лучи большой энергии.



Ф. Жолио-Кюри (1900—1958)

Ирен Жолио-Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и её муж Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что если на пути излучения, образующегося при бомбардировке бериллия α-частицами, поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко увеличивается. Они справедливо предположили, что излучение выбивает из парафиновой пластины протоны, имеющиеся в большом количестве в таком водородсодержащем веществе. С помощью камеры Вильсона (схема опыта приведена на рисунке 12.11) супруги Жолио-Кюри обнаружили эти протоны и по длине пробега оценили их энергию. По их данным, если протоны ускорялись в результате столкновения с γ-квантами, то энергия этих квантов должна быть огромной — около 55 МэВ.

Чедвик наблюдал в камере Вильсона треки ядер азота, испытавших столкновение с бериллиевым излучением. По его оценке, энергия γ-квантов, способных сообщать ядрам азота скорость, которая обнаруживалась в этих наблюдениях, должна была составлять 90 МэВ. Аналогичные же наблюдения в камере Вильсона треков ядер аргона привели к выводу, что энергия этих гипотетических γ-квантов должна составлять 150 МэВ. Таким образом, считая, что ядра приходят в движение в результате столкновения с безмассовыми частицами, исследователи пришли к явному противоречию: одни и те же γ-кванты обладали различной энергией.

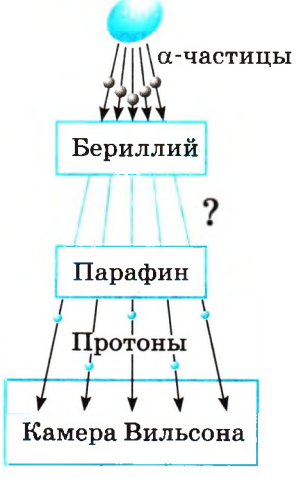


Рис. 12.11

Стало очевидным, что предположение об излучении бериллием γ-квантов, т. е. безмассовых частиц, несостоятельно. Из бериллия под действием α-частиц вылетают какие-то достаточно тяжёлые частицы. Ведь только при столкновении с тяжёлыми частицами протоны или ядра азота и аргона могли получить ту большую энергию, которая наблюдалась на опыте. Поскольку эти частицы обладали большой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ, то, следовательно, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию.

Было установлено в итоге, что при попадании α-частиц в ядра бериллия происходит следующая реакция:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n. \qquad (12.8)$$

Так была открыта одна из основных частиц, составляющих ядро, — нейтрон.

Ядерные реакции. Атомные ядра, как мы знаем, при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются увеличением или уменьшением кинетической энергии участвующих в них частиц.

Запомни **Ядерные реакции** — это превращения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

Обсудите с одноклассниками, можно ли сказать, что искусственная радиоактивность элемента всегда возникает в результате ядерной реакции.

Приведённый выше процесс (12.8) превращения бериллия в углерод является ядерной реакцией.

Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноимённо заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена достаточно большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия — дейтронам, α-частицам и другим более тяжёлым ядрам с помощью ускорителей.

Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. *Во-первых*, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка 10^5 МэВ, т. е. гораздо бóльшая той, которую имеют α-частицы (максимально 9 МэВ). *Во-вторых*, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что заряд протонов вдвое меньше заряда α-частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше). *В-третьих*, можно ускорить ядра более тяжёлые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две α-частицы:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Как видно из фотографии треков (рис. 12.12), ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой согласно закону сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих α-частиц; на фотографии треки протонов не видны).

Энергетический выход ядерных реакций. В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступившего в реакцию протона на 7,3 МэВ. Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной

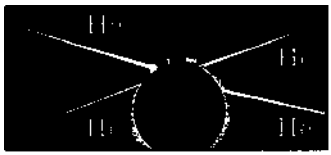


Рис. 12.12

реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся α-частиц.

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях ядер и частиц не остаётся неизменной. Ведь энергия покоя ядра $M_я c^2$ согласно формуле (12.5) непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии

Важно изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

Запомни **Энергетическим выходом ядерной реакции** называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции, а также разность кинетических энергий частиц, участвующих в реакции.

Если суммарная кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии. В противном случае реакция идёт с поглощением энергии. Именно такая реакция происходит при бомбардировке азота α-частицами. Часть кинетической энергии (примерно $1{,}2 \cdot 10^6$ эВ) переходит в процессе этой реакции во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать её при столкновениях ускоренных частиц (или ядер) с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь бóльшая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакцию.

Ядерные реакции на нейтронах. Открытие нейтрона было поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Так как нейтроны не имеют заряда, то они беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения. Например, наблюдается следующая реакция:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{24}_{11}\mathrm{Na} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$



Э. Ферми (1901—1954)

Великий итальянский физик Энрико Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения обусловлены не только быстрыми, но и медленными нейтронами. Причём эти медленные нейтроны оказываются в большинстве случаев даже гораздо более эффективными, чем быстрые. Поэтому быстрые нейтроны целесообразно предварительно замедлять. Замедление нейтронов до тепловых скоростей происходит в обыкновенной воде. Этот эффект объясняется тем, что в воде содержится большое число ядер водорода — протонов, масса которых почти равна массе нейтронов. Следовательно, нейтроны после соударений движутся со скоростью теплового движения. При центральном соударении нейтрона с покоящимся протоном он целиком передаёт протону свою кинетическую энергию.

Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции

Найти

1. Объясните, почему при центральном столкновении с протоном нейтрон передаёт ему всю энергию, а при столкновении с ядром азота — только её часть.
2. Объясните, используя рисунок 12.1, почему при ядерной реакции ${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ энергия не поглощается, а выделяется.
3. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?
4. В чём главное отличие ядерных реакций на нейтронах от ядерных реакций, вызываемых заряженными частицами?
5. Какие преобразования энергии происходят при ядерных реакциях?

1. В результате реакции синтеза дейтерия с ядром ${}^{X}_{Y}\mathrm{Z}$ образуется ядро бора и нейтрон в соответствии с реакцией ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{X}_{Y}\mathrm{Z} \rightarrow {}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}n$. Определите массовое число X и заряд Y (в единицах элементарного заряда) ядра, вступившего в реакцию с дейтерием.

1) $X = 11$, $Y = 5$
2) $X = 10$, $Y = 5$
3) $X = 9$, $Y = 4$
4) $X = 10$, $Y = 4$

2. Ядро магния ${}^{24}_{12}\mathrm{Mg}$ захватило электрон. В результате образовалось ядро

1) ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$
2) ${}^{24}_{12}\mathrm{Mg}$
3) ${}^{24}_{11}\mathrm{Na}$
4) ${}^{23}_{11}\mathrm{Na}$

3. Какое уравнение противоречит закону сохранения заряда в ядерных реакциях?

1) ${}^{12}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{12}_{5}\mathrm{B} + {}^{0}_{1}e$
2) ${}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He}$
3) ${}^{10}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{10}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}e$
4) ${}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}n$

4. Записана ядерная реакция, в скобках указаны атомные массы участвующих в ней частиц. Поглощается или выделяется энергия при следующей реакции: ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}(239{,}05) \rightarrow {}^{106}_{43}\mathrm{Tc}(105{,}91) + {}^{133}_{51}\mathrm{Sb}(132{,}92)$?

1) выделяется
2) поглощается
3) не поглощается, не выделяется
4) недостаточно данных для ответа

5. Определите энергию ядерной реакции ${}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}n$. Энергия покоя бериллия ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$ — 8392,8 МэВ, дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ — 1875,6 МэВ, бора ${}^{10}_{5}\mathrm{B}$ — 9324,4 МэВ и нейтрона — 939,6 МэВ.

1) 0 МэВ
2) 943,9 МэВ
3) 4,4 МэВ
4) 20 537,7 МэВ

§ 88 ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

Какой вывод можно сделать из графика зависимости удельной энергии связи от массового числа (см. рис. 12.1)? Может ли выделяться энергия при делении тяжёлых ядер?

Делиться на части могут только ядра некоторых тяжёлых элементов. При делении ядер испускаются два-три нейтрона и γ-лучи. Одновременно выделяется большая энергия.

Открытие деления урана. Деление ядер урана было открыто в 1938 г. немецкими учёными Отто Ганом и Фрицем Штрассманом. Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др. Однако правильное истолкование этого факта именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 г. английским физиком Отто Фришем совместно с австрийским физиком Лизой Мейтнер.

Захват нейтрона нарушает стабильность ядра. Ядро возбуждается и становится неустойчивым, что приводит к его делению на осколки.

Деление ядра возможно потому, что масса покоя тяжёлого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Поэтому происходит выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление.

Возможность деления тяжёлых ядер можно также объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа A (см. рис. 12.1). Удельная энергия связи ядер атомов элементов, занимающих в периодической системе последние места ($A \approx 200$), примерно на 1 МэВ меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине периодической системы ($A \approx 100$). Поэтому процесс деления тяжёлых ядер на ядра элементов средней части периодической системы является энергетически выгодным. Система после деления переходит в состояние с минимальной внутренней энергией. Ведь чем больше энергия связи ядра, тем бóльшая энергия должна выделяться при возникновении ядра и, следовательно, тем меньше внутренняя энергия образовавшейся вновь системы.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной — порядка 200 МэВ. Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется.

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана $^{235}_{92}U$, подтвердили приведённые соображения и дали значение 200 МэВ. Причём бóльшая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков. На рисунке 12.13 вы видите треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

Можно ли сказать, что захват нейтрона и дальнейшее деление ядра — это искусственная радиоактивность?

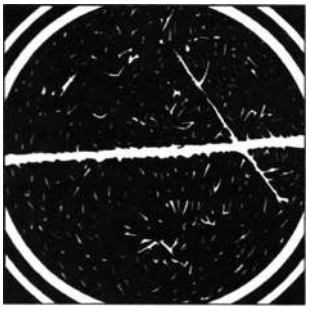


Рис. 12.13

Выделяющаяся при делении ядра энергия имеет электростатическое, а не ядерное происхождение. Большая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их кулоновского отталкивания.

Механизм деления ядра. Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра.

Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 12.14, *а*). Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими, подобно силам, действующим между молекулами жидкости. Наряду с большими силами электростатического отталкивания между протонами, стремящимися разорвать ядро на части, действуют ещё бóльшие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

Ядро урана-235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, оно возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 12.14, *б*). Ядро будет растягиваться до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не начнут преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке (рис. 12.14, *в*). После этого оно разрывается на две части (рис. 12.14, *г*). Под действием кулоновских сил отталкивания эти осколки разлетаются со скоростью, равной 1/30 скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления. Фундаментальный факт ядерного деления — испускание в процессе деления двух-трёх нейтронов. Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Понять, почему происходит испускание свободных нейтронов, можно исходя из следующих соображений. Известно, что отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера. Поэтому у возникающих при делении осколков относительное число нейтронов оказывается бóльшим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения — от нескольких миллионов электронвольт до совсем малых, близких к нулю.

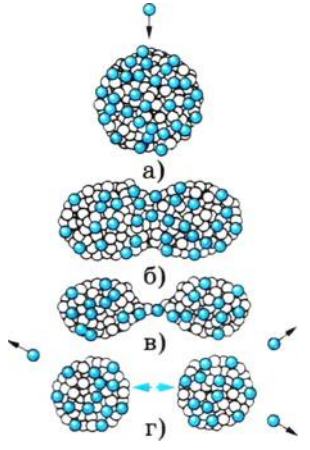


Рис. 12.14

Деление обычно происходит на осколки, массы которых различаются примерно в 1,5 раза. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество

Вспомните, какие силы удерживают молекулы воды, образующие каплю, и какие силы удерживают нуклоны в ядре.

нейтронов. В результате серии последовательных распадов в конце концов получаются стабильные изотопы.

Цепная реакция деления. Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может, в свою очередь, вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается. Возникает цепная реакция.



Запомни **Цепной ядерной реакцией** называется реакция, в которой частицы, вызывающие её (нейтроны), образуются как продукты этой реакции.

Важно Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии.



При делении каждого ядра выделяется энергия около 200 МэВ. При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделяется энергия $2{,}3 \cdot 10^4$ кВт · ч. Это эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Но для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь ядра изотопа урана с массовым числом 235, т. е. $^{235}_{92}\mathrm{U}$.

Запишем примеры реакции деления $^{235}_{92}\mathrm{U}$.

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}n.$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + 3{}^{1}_{0}n.$$

При первой реакции деления образуется 2 нейтрона, при второй — 3 нейтрона, которые вызывают продолжение реакции.

Изотопы урана. Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: $^{235}_{92}\mathrm{U}$ и $^{238}_{92}\mathrm{U}$. Но изотоп $^{235}_{92}\mathrm{U}$ составляет всего 1/140 долю от более распространённого изотопа $^{238}_{92}\mathrm{U}$.

Ядра $^{235}_{92}\mathrm{U}$ делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов. Ядра же $^{238}_{92}\mathrm{U}$ могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60 % нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление $^{238}_{92}\mathrm{U}$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа $^{238}_{92}\mathrm{U}$ невозможна.

Интересно Спонтанное деление ядер урана было открыто советскими физиками Г. Н. Флёровым и К. А. Петржаком в 1940 г.

Период распада изотопа урана $^{238}_{92}\mathrm{U}$ равен $4{,}47 \cdot 10^9$ лет.

Процесс естественного распада, в результате которого получается конечный стабильный изотоп

свинца, происходит в результате серий радиоактивных превращений. Приведём пример одной из возможных серий:

$$^{238}\text{U} \to {}^{234}\text{Th} \to {}^{234}\text{Pa} \to {}^{234}\text{U} \to {}^{230}\text{Th} \to {}^{226}\text{Ra} \to {}^{222}\text{Rn} \to {}^{218}\text{Po} \to {}^{214}\text{Pb} \to$$
$$\to {}^{210}\text{Pb} \to {}^{210}\text{Bi} \to {}^{210}\text{Po} \to {}^{206}\text{Pb}.$$

Коэффициент размножения нейтронов. Для течения цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон обязательно вызывал деление ядра. Необходимо лишь, чтобы среднее число освобождённых нейтронов в данной массе урана не уменьшалось с течением времени.

Найдите все указанные элементы в цепочке превращений ядра урана в таблице Менделеева. Сравните массовые числа изотопов в таблице и приведённых в этой цепочке. Обсудите, какие частицы могут образовываться при каждом акте распада.

Важно Это условие будет выполнено, если *коэффициент размножения нейтронов* k больше или равен единице.

Запомни **Коэффициентом размножения нейтронов** называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения».

Под сменой «поколений» понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого «поколения» и рождаются новые нейтроны.

Можно ли указать точное значение коэффициента размножения при распаде, например, $^{235}_{92}\text{U}$?

Если $k \geqslant 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остаётся постоянным и цепная реакция идёт. При $k < 1$ число нейтронов убывает и цепная реакция невозможна.

Коэффициент размножения определяется четырьмя факторами:

1) захватом медленных нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$ также с последующим делением;

2) захватом нейтронов ядрами урана без деления;

3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем (о нём сказано дальше) и конструктивными элементами установки;

4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счёт деления $^{235}_{92}\text{U}$). Все остальные приводят к их убыли. Цепная реакция в чистом изотопе $^{238}_{92}\text{U}$ невозможна, так как в этом случае $k < 1$ (число нейтронов, поглощаемых ядрами без деления, больше числа нейтронов, вновь образующихся за счёт деления ядер).

Для стационарного течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть равен единице. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью. Уже при $k = 1{,}01$ почти мгновенно произойдёт взрыв.

Образование плутония. Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана $^{238}_{92}\mathrm{U}$. После захвата образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}\mathrm{U}$ с периодом полураспада 23 мин. Распад происходит с испусканием электрона и антинейтрино (см. § 83, с. 315) и возникновением первого трансуранового элемента — *нептуния*:

$$^{239}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\mathrm{Np} + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e.$$

Нептуний β-радиоактивен с периодом полураспада около двух дней. В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент — *плутоний*: $^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e$.

Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада велик — порядка 24 000 лет. Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием медленных нейтронов, так же как и изотоп $^{235}_{92}\mathrm{U}$. Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадной энергии.

Деление урана. Цепная реакция деления

Найти

1. От чего зависит коэффициент размножения нейтронов?
2. Какие изотопы урана используются для осуществления цепной ядерной реакции?

1. Ядерной реакцией деления является

1) $^{178}_{77}\mathrm{Ir} \rightarrow {}^{170}_{73}\mathrm{Ta} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He}$
2) $^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n$
3) $^{246}_{100}\mathrm{Fm} \rightarrow {}^{123}_{51}\mathrm{Sb} + {}^{123}_{49}\mathrm{In}$
4) $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$

2. Реакция распада ядра на два ядра $Я_1 \rightarrow Я_2 + Я_3$ идёт с выделением энергии. При этом
А: суммарная масса покоя ядер $Я_2$ и $Я_3$ меньше массы покоя исходного ядра $Я_1$
Б: суммарная энергия связи протонов и нейтронов в ядрах $Я_2$ и $Я_3$ больше энергии связи этих частиц в исходном ядре $Я_1$
Какое(ие) из утверждений правильно(ы)?
1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

3. Ниже приведена одна из возможных реакций радиоактивного распада урана: $^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow 2\,{}^{1}_{0}n + {}^{90}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{143}_{56}\mathrm{Ba}$. При этом осколки имеют кинетическую энергию около 190 МэВ. Какое из утверждений верно?
А: сумма зарядов осколков точно равна заряду ядра урана
Б: масса осколков точно равна массе исходного атома
1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

4. Какая ядерная реакция может быть использована для получения цепной реакции деления?

1) $^{249}_{96}\mathrm{Cm} + {}^{1}_{0}n \rightarrow 4\,{}^{1}_{0}n + {}^{108}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{132}_{54}\mathrm{Xe}$
2) $^{12}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{6}_{3}\mathrm{Li}$
3) $^{227}_{90}\mathrm{Th} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{129}_{49}\mathrm{In} + {}^{99}_{41}\mathrm{Nb}$
4) $^{249}_{96}\mathrm{Cm} \rightarrow {}^{108}_{43}\mathrm{Tc} + {}^{141}_{53}\mathrm{I}$

§ 89 ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Как происходит реакция деления?
Выделяется ли при реакции деления энергия?

Запомни **Ядерным реактором** называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

В результате деления ядер урана образуются нейтроны, которые могут вызвать последующее деление ядер. Однако энергия их велика, а ядра урана, особенно ядра изотопа $^{235}_{92}U$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны. Вероятность захвата медленных нейтронов с последующим делением ядер в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, для повышения коэффициента размножения нейтронов используются замедлители нейтронов. Процессы в ядерном реакторе схематически изображены на рисунке 12.15.



Рис. 12.15

Основные элементы ядерного реактора. На рисунке 12.16 приведена схема энергетической установки с ядерным реактором.

Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ($^{235}_{92}U$, $^{239}_{92}U$ и др.), замедлитель нейтронов (тяжёлая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.), и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают

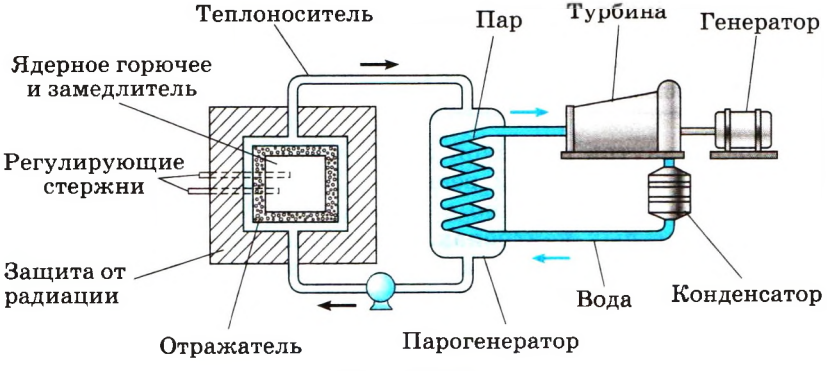


Рис. 12.16

нейтроны). Снаружи реактор окружают защитной оболочкой, задерживающей γ-излучение и нейтроны. Оболочку делают из бетона с железным заполнителем.

Лучшим замедлителем является *тяжёлая вода* (см. § 93). Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжёлую воду. Хорошим замедлителем считается также графит, ядра которого не поглощают нейтроны.

Критическая масса. Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения.

Запомни **Критической массой** называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой ещё может протекать цепная ядерная реакция.

При малых размерах слишком велика утечка нейтронов через поверхность активной зоны реактора (объём, в котором располагаются стержни с ураном).

С увеличением размеров системы число ядер, участвующих в делении, растёт пропорционально объёму, а число нейтронов, теряемых вследствие утечки, увеличивается пропорционально площади поверхности. Поэтому, увеличивая размеры системы, можно достичь значения коэффициента размножения $k \approx 1$. Система будет иметь критические размеры, если число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, равно числу нейтронов, полученных в процессе деления. Критические размеры и соответственно критическая масса определяются типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора.

Подумайте, почему уточняется форма куска урана при определении критической массы.

Для чистого (без замедлителя) урана $^{235}_{92}U$, имеющего форму шара, критическая масса примерно равна 50 кг.

При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран очень тяжёлое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Почему реакцию деления в ядерном реакторе называют управляемой? В каком случае она может стать неуправляемой?

Управление реактором осуществляется при помощи стержней, содержащих кадмий или бор. При выдвинутых из активной зоны реактора стержнях $k > 1$, а при полностью вдвинутых стержнях $k < 1$. Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной реакции. Управление ядерными реакторами осуществляется дистанционно с помощью ЭВМ.

Реакторы на быстрых нейтронах. Построены реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране.

Реакцию можно поддерживать лишь в обогащённой смеси, содержащей не менее 15 % изотопа $^{235}_{92}U$. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах

в том, что при их работе образуется значительное количество плутония или тория, которые затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Причём количество новых ядер, способных к делению медленными нейтронами, может быть больше первоначального количества ядер.

Запомни Реакторы, воспроизводящие делящийся материал, называют **реакторами-размножителями**.

Первые ядерные реакторы. Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в США коллективом учёных под руководством итальянского физика Энрико Ферми в декабре 1942 г.

В нашей стране первый ядерный реактор был запущен 25 декабря 1946 г. коллективом физиков, который возглавлял наш замечательный учёный Игорь Васильевич Курчатов. В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающихся друг от друга как по мощности, так и по своему назначению.



И. В. Курчатов (1903—1960)

Цепная реакция деления. Коэффициент размножения. Реактор

Найти

1. Что такое критическая масса?
2. Для чего в атомном реакторе используется замедлитель нейтронов?

1. Для возникновения цепной реакции при делении тяжёлых ядер наиболее существенно соотношение числа образующихся в ядерной реакции и поглощаемых в системе
1) γ-квантов
2) нейтронов
3) протонов
4) электронов

2. При попадании теплового нейтрона в ядро урана происходит деление ядра. Какие силы разгоняют осколки ядра?
1) ядерные
2) электромагнитные
3) гравитационные
4) силы слабого взаимодействия

3. Регулирование скорости ядерного деления тяжёлых атомов в ядерных реакторах атомных электростанций осуществляется за счёт
1) поглощения нейтронов при опускании стержней с поглотителем
2) увеличения теплоотвода при увеличении скорости теплоносителя
3) увеличения отпуска электроэнергии потребителям
4) уменьшения массы ядерного топлива в активной зоне при вынимании стержней с топливом

§ 90 ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Какой вывод можно сделать из графика зависимости удельной энергии связи от массового числа (см. рис. 12.1) относительно энергии, выделяемой при слиянии лёгких ядер?

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро. Для лёгких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, масса покоя ядра гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжёлого водорода, на которые можно разделить ядро гелия.

Это означает, что при слиянии лёгких ядер масса покоя уменьшается и, следовательно, должна выделяться значительная энергия. Подобного рода реакции слияния лёгких ядер могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются *термоядерными*.

Запомни **Термоядерные реакции** — это реакции слияния лёгких ядер, происходящие при очень высокой температуре.

Как посчитать потенциальную энергию взаимодействия ядер водорода, находящихся на расстоянии, равном размеру атома? Чему должна быть равна кинетическая энергия ядра, чтобы преодолеть кулоновское отталкивание?

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизились на расстояние около 10^{-12} см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счёт большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчёте на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжёлого изотопа водорода — дейтерия — со сверхтяжёлым изотопом водорода — тритием — выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

Интересно Энергия излучения Солнца и звёзд имеет термоядерное происхождение. По современным представлениям, на ранней стадии развития звезда в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния ядер водорода с образованием гелия. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжёлые элементы.
Термоядерные реакции сопровождаются выделением энергии, обеспечивающей излучение света звёздами на протяжении миллиардов лет.

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия с тритием:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{0}_{1}n.$$

В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.

Экономически выгодная реакция, как показывают расчёты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов кельвинов при большой плотности вещества (10^{14}—10^{15} частиц в 1 $см^3$). Такие температуры могут быть в принципе достигнуты путём создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки в течение 0,1—1 с.

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственно возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объёме с помощью очень сильных магнитных полей.

Однако до сих пор решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы. Неустойчивость приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные стенки.



Для уменьшения неоднородности магнитного поля, приводящей к изменению конфигурации плазменного столба и соответственно к его неустойчивости, академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом была предложена форма плазменного столба в виде тора, которая используется на установке, называемой «Токамак».

На этой установке удалось получить плазму температурой $1{,}3 \cdot 10^7$ К. Однако проблема её удержания ещё не решена.

Помимо энергетического преимущества, при термоядерных реакциях не образуются радиоактивные отходы, т. е. не надо решать проблемы загрязнения окружающей среды.



Подумайте, какая сила действует на заряженную частицу в магнитном поле. Как происходит фокусировка электронного луча?

В настоящее время существует уверенность в том, что рано или поздно термоядерные реакторы будут созданы.

Учёные нашей страны достигли больших успехов в создании управляемых термоядерных реакций. Эти работы были начаты под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжаются их учениками.

Пока же удалось осуществить лишь *неуправляемую реакцию* синтеза взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе.

Термоядерная реакция. Лёгкие ядра



1. Почему реакция слияния лёгких ядер происходит только при очень высоких температурах?
2. Как объяснить с точки зрения закона сохранения энергии, что энергия выделяется как при делении тяжёлых ядер, так и при слиянии лёгких ядер?
3. Чем можно объяснить тот факт, что в недрах Солнца температура достигает десятков миллионов градусов?



§ 91 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ»

При определении энергетического выхода ядерных реакций считаем суммы массовых чисел слева и справа в уравнении реакции. Вычитаем из одной суммы другую и получаем разность в атомных единицах массы (а. е. м.). Умножив полученное значение на 931,5 $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$ и на c^2 ($E = \Delta m c^2$), окончательное значение энергии выражаем в мегаэлектронвольтах (МэВ).

Если разность больше нуля, то реакция идёт с выделением энергии, если меньше нуля, то с поглощением.

Задача 1. При столкновении нейтрона с ядром кислорода $^{16}_{8}\text{O}$ испускается дейтерий. Какое ядро образуется в результате этой реакции?

Р е ш е н и е. Уравнение данной реакции $^{16}_{8}\text{O} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A}_{Z}\text{X} + {}^{2}_{1}\text{H}$.

Общее число нуклонов в ядрах справа 16 + 1 = 17, а слева A + 2, по закону сохранения массовых чисел 17 = A + 2, A = 15.

Полный заряд нуклонов слева 8 + 0 = 8, откуда Z = 7.

Следовательно, образуется ядро $^{15}_{7}\text{X}$.

По периодической системе элементов находим, что это азот $^{15}_{7}\text{N}$.

Задача 2. Может ли произойти реакция $^{13}_{6}\text{C} + {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{13}_{7}\text{N} + {}^{1}_{0}n$, если энергия протона равна 2,5 МэВ? Массы ядер углерода 13,003355 а. е. м., азота 13,005739 а. е. м.

Р е ш е н и е. Суммарные массы ядер до реакции равны:

13,003355 а. е. м. + 1,007276 а. е. м. = 14,010631 а. е. м.

Суммарные массы ядер после реакции равны:

13,005739 а. е. м. + 1,008665 а. е. м. = 14,014404 а. е. м.

Тогда Δm = 14,010631 а. е. м. − 14,014404 а. е. м. = −0,003773 а. е. м.

Мы знаем, что 1 а. е. м. = 931,5 МэВ/c^2. Чтобы вызвать эту реакцию, необходима энергия: $\Delta E = \Delta m c^2$ = 3,5 МэВ. Следовательно, такая реакция произойти не может.

Задача 3. Вычислите энергию, выделившуюся при ядерной реакции $^{9}_{4}\text{Be} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^{1}_{0}n$.

Р е ш е н и е. Масса ядер, вступивших в реакцию,

9,012183 а. е. м. + 4,002603 а. е. м. = 13,014786 а. е. м.

Масса ядер после реакции

12,0 а. е. м. + 1,008665 а. е. м. = 13,008665 а. е. м.

Разность масс Δm = 13,014786 а. е. м. − 13,008665 а. е. м. = = 0,006121 а. е. м.

Выделившаяся энергия $\Delta E = mc^2$ = 5,7 МэВ.

Задачи для самостоятельного решения

1. При бомбардировке ядер бора $^{11}_{5}B$ протонами образуется бериллий $^{8}_{4}Be$. Какое ещё ядро образуется при этой реакции?

2. Известно, что в результате деления ядра урана $^{235}_{92}U$, захватившего нейтрон, образуются ядра бария $^{142}_{56}Ba$ и криптона $^{91}_{36}Kr$, а также три свободных нейтрона. Удельная энергия связи ядер бария 8,38 МэВ/нуклон, криптона 8,55 МэВ/нуклон и урана 7,59 МэВ/нуклон. Чему равна энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана?

3. Какая энергия выделяется при захвате электрона ядром бериллия: $^{7}_{4}Be(7{,}016930) + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{7}_{3}Li(7{,}016005) + \nu$? В скобках указаны атомные массы (в а. е. м.).

4. Определите энергию, выделяющуюся при термоядерной реакции $^{2}_{1}H(2{,}014102) + {}^{3}_{1}H(3{,}016049) \rightarrow {}^{4}_{2}He(4{,}002603) + {}^{1}_{0}n$.

1. Записана ядерная реакция, в скобках указаны атомные массы (в а. е. м.) участвующих в ней частиц:

$$^{13}_{6}C(13{,}003354) + {}^{1}_{1}H(1{,}00783) \rightarrow {}^{14}_{7}N(14{,}00307).$$

Вычислите энергетический выход ядерной реакции. Ответ выразите в мегаэлектронвольтах (МэВ), считая, что 1 а. е. м. соответствует 931 МэВ. Поставьте знак «минус», если энергия поглощается.

2. Записана ядерная реакция, в скобках указаны атомные массы (в а. е. м.) участвующих в ней частиц:

$$^{14}_{7}N(14{,}00307) + {}^{4}_{2}He(4{,}002603) \rightarrow {}^{17}_{8}O(16{,}999133) + {}^{1}_{1}H(1{,}00783).$$

Вычислите энергетический выход ядерной реакции. Ответ выразите в мегаэлектронвольтах (МэВ), считая, что 1 а. е. м. соответствует 931 МэВ. Поставьте знак «минус», если энергия поглощается.

3. Какая энергия выделяется при ядерной реакции $^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow 2{}^{4}_{2}He$? Ответ выразите в пикоджоулях (пДж) и округлите до десятых. Энергия покоя лития $^{7}_{3}Li$ — 6533,8 МэВ, водорода $^{1}_{1}H$ — 938,3 МэВ, гелия $^{4}_{2}He$ — 3728,4 МэВ.

4. Излучение Солнца обусловлено энергией, выделяющейся в термоядерной реакции превращения ядра водорода $^{1}_{1}H$ в гелий $^{4}_{2}He$. При этом образование одного ядра гелия сопровождается выделением энергии $4{,}2 \cdot 10^{-12}$ Дж. Чему равна масса гелия, возникающего в Солнце ежесекундно, если мощность излучения Солнца составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт? Масса ядра гелия $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ кг. Ответ выразите в миллионах тонн, округлив до десятков.

5. Излучение Солнца обусловлено энергией, выделяющейся в термоядерной реакции, при которой четыре ядра водорода $^{1}_{1}H$ рождают ядро гелия $^{4}_{2}He$. Энергия связи ядра $^{4}_{2}He$ составляет 7 МэВ/нуклон. Чему равна масса гелия, возникающего в Солнце ежесекундно, если мощность излучения Солнца составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт? Масса ядра гелия $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ кг. Ответ выразите в миллионах тонн.

§ 92 ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Вспомните, как осуществляется управление цепной ядерной реакцией.

Применение ядерной энергии для преобразования её в электрическую впервые было осуществлено в нашей стране в 1954 г., когда в Обнинске была введена в действие первая атомная электростанция (АЭС) мощностью 5000 кВт. Энергия, выделяющаяся в ядерном реакторе, использовалась для превращения воды в пар, который вращал связанную с генератором турбину.

Развитие ядерной энергетики. По такому же принципу действуют Нововоронежская, Ленинградская, Курская, Кольская и другие АЭС. Реакторы этих станций имеют мощность 500—1000 МВт.

В реакторах на тепловых (т. е. медленных) нейтронах уран используется лишь на 1—2 %. Полное использование урана достигается в реакторах на быстрых нейтронах, в которых обеспечивается также воспроизводство нового ядерного горючего в виде плутония. В 1980 г. на Белоярской АЭС состоялся пуск первого в мире реактора на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт.

Атомные электростанции строятся прежде всего в европейской части страны. Это связано с преимуществами АЭС по сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе. Ядерные реакторы не потребляют дефицитного органического топлива и не загружают перевозками угля железнодорожный транспорт. Атомные электростанции не потребляют атмосферный кислород и не засоряют среду золой и продуктами сгорания.

Однако ядерной энергетике, как и многим другим отраслям промышленности, присущи вредные факторы воздействия на окружающую среду. Наибольшую потенциальную опасность представляет радиоактивное загрязнение. Сложные проблемы возникают с захоронением радиоактивных отходов и демонтажем отслуживших свой срок атомных электростанций. Срок их службы около 20 лет, после чего восстановление станций из-за многолетнего воздействия радиации на материалы конструкций невозможно.

Отработанное топливо хранят в цистернах из нержавеющей стали, помещённых в бетонные контейнеры. Окончательно проблема утилизации и хранения радиоактивных отходов до сих пор не решена.

АЭС проектируется с расчётом на максимальную безопасность персонала станции и населения. Опыт эксплуатации АЭС во всём мире показывает, что биосфера надёжно защищена от радиационного воздействия предприятий ядерной энергетики в нормальном режиме эксплуатации. Однако взрыв четвёртого реактора на Чернобыльской АЭС показал, что риск разрушения активной зоны реактора из-за ошибок персонала и просчётов в конструкции реакторов остаётся реальностью, поэтому принимаются строжайшие меры для снижения этого риска.

В 2011 г. в Японии в результате землетрясения и цунами произошёл радиоактивный выброс на АЭС «Фукусима», находящейся на побережье Тихого океана, что привело к огромным разрушениям, гибели людей, заражению воды и прибрежных растений. События в Японии были вызваны природной катастрофой, хотя уровень защиты АЭС был очень высок.

Эта катастрофа заставила человечество поставить вопрос о целесообразности использования ядерной энергии. Во многих странах прошли митинги против строительства новых АЭС и за закрытие уже имеющихся.

Но в наши дни ядерная энергетика остаётся самой выгодной и не приводит к таким экологическим проблемам, как, например, ТЭС с постоянными выбросами вредных веществ, да и запасы топлива в мире конечны. Альтернативные источники энергии ещё достаточно хорошо не разработаны.

Интересно

Ядерные реакторы устанавливаются также на атомных подводных лодках и ледоколах.

Ядерное оружие. Неуправляемая цепная реакция с большим коэффициентом увеличения нейтронов осуществляется в атомной бомбе. Взрывчатым веществом служит чистый уран $^{235}_{92}U$ или плутоний $^{239}_{94}Pu$.

Чтобы мог произойти взрыв, размеры делящегося материала должны превышать критические. Это достигается либо путём быстрого соединения двух кусков делящегося материала с докритическими размерами, либо же за счёт резкого сжатия одного куска до размеров, при которых утечка нейтронов через поверхность падает настолько, что размеры куска оказываются надкритическими. То и другое осуществляется с помощью обычных взрывчатых веществ.

При взрыве атомной бомбы температура достигает десятков миллионов кельвинов. При такой высокой температуре очень резко повышается давление и образуется мощная взрывная волна. Одновременно возникает мощное излучение. Продукты цепной реакции при взрыве атомной бомбы сильно радиоактивны и опасны для жизни живых организмов.

Атомные бомбы применили США в конце Второй мировой войны против Японии. В 1945 г. были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросиму и Нагасаки.

В термоядерной (водородной) бомбе для инициирования реакции синтеза используется взрыв атомной бомбы, помещённой внутри термоядерной.

Нетривиальным решением оказалось то, что взрыв атомной бомбы используется не для повышения температуры, а для сильнейшего сжатия термоядерного топлива излучением, образующимся при взрыве атомной бомбы.

В нашей стране основные идеи создания термоядерной бомбы были выдвинуты после Великой Отечественной войны А. Д. Сахаровым.

С созданием ядерного оружия победа в войне стала невозможной. Ядерная война способна привести человечество к гибели, поэтому народы всего мира настойчиво борются за запрещение ядерного оружия.

Радиационная защита. Захоронение отходов АЭС — Найти

1. Что является источником энергии в ядерных реакторах?
2. Какие достоинства и недостатки двух способов получения энергии: 1) сгорание горючего, добытого из Земли; 2) деление ядер?
3. Какие трудности возникают при создании термоядерного реактора?

§ 93 ИЗОТОПЫ. ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Как называют ядра одного химического элемента, имеющие одинаковые зарядовые числа, но разные массовые?

В результате наблюдения огромного числа радиоактивных превращений постепенно обнаружилось, что существуют вещества, тождественные по своим химическим свойствам, но имеющие совершенно различные радиоактивные свойства (т. е. распадающиеся по-разному). Их никак не удавалось разделить ни одним из известных химических способов. На этом основании Содди в 1911 г. высказал предположение о возможности существования элементов с одинаковыми химическими свойствами, но различающихся своей радиоактивностью. Эти элементы нужно помещать в одну и ту же клетку периодической системы Д. И. Менделеева. Содди назвал их *изотопами*, т. е. занимающими одинаковые места (о них уже шла речь в § 78).

Запомни **Изотопы** — элементы с одинаковыми химическими свойствами, но различающиеся массой.

Обсудите с одноклассниками, можно ли по таблице периодической системы элементов определить количество изотопов у данного элемента.

Предположение Содди получило блестящее подтверждение и глубокое толкование год спустя, когда Дж. Дж. Томсон провёл точные измерения массы ионов неона методом отклонения их в электрическом и магнитном полях. Он обнаружил, что неон представляет собой смесь двух видов атомов. Бóльшая часть их имеет относительную массу, равную 20. Но существует незначительная часть атомов с относительной атомной массой 22. В результате относительная атомная масса смеси была принята равной 20,2. Атомы, обладающие одними и теми же химическими свойствами, различались массой. Оба вида атомов неона, естественно, занимают одно и то же место в таблице Д. И. Менделеева и, следовательно, являются изотопами.

Важно У изотопов заряды атомных ядер одинаковы, а значит, число электронов в оболочках атомов и, следовательно, химические свойства изотопов одинаковы. Но массы ядер различны. Причём ядра могут быть как радиоактивными, так и стабильными. Различие свойств радиоактивных изотопов связано с тем, что их ядра имеют различную массу.

В настоящее время установлено существование изотопов у всех химических элементов. Некоторые элементы имеют только нестабильные (радиоактивные) изотопы. Как мы знаем, изотопы есть у самого тяжёлого из существующих в природе

Вспомните, что определяет устойчивость ядер.

элементов — урана (относительные атомные массы 238, 235 и др.) и у самого лёгкого — водорода (относительные атомные массы 1, 2, 3).

Особенно интересны изотопы водорода, о которых мы уже говорили, так как они различаются по массе в 2 и 3 раза. Дейтерий не радиоактивен и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород.

При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая *тяжёлая вода*. Её физические свойства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она кипит при 101,2 °С и замерзает при 3,8 °С.

Изотоп водорода с атомной массой 3, *тритий*, радиоактивен, он подвержен β-распаду с периодом полураспада около 12 лет.

Важно

Существование изотопов доказывает, что заряд атомного ядра определяет не все свойства атома, а лишь его химические свойства и те физические свойства, которые зависят от периферии электронной оболочки, например размеры атома.

Масса же атома и его радиоактивные свойства не определяются порядковым номером в таблице Д. И. Менделеева.

Примечательно, что при точном измерении относительных атомных масс изотопов выяснилось, что они близки к целым числам. А вот атомные массы химических элементов иногда сильно отличаются от целых чисел. Так, относительная атомная масса хлора равна 35,5. Это значит, что в естественном состоянии химически чистое вещество представляет собой смесь изотопов в различных пропорциях.

Целочисленность (приближённая) относительных атомных масс изотопов очень важна для выяснения строения атомного ядра.

Получение радиоактивных изотопов. С помощью ядерных реакций можно получить радиоактивные изотопы всех химических элементов, встречающихся в природе только в стабильном состоянии. Элементы под номерами 43, 61, 85 и 87 вообще не имеют стабильных изотопов и впервые получены искусственно, например элемент с порядковым номером $Z = 43$, названный *технецием*, имеющий самый долгоживущий изотоп с периодом полураспада около миллиона лет.

Были получены также *трансурановые элементы*. О нептунии и плутонии вы уже знаете. Кроме них, получены ещё следующие элементы: *америций* ($Z = 95$), *кюрий* ($Z = 96$), *берклий* ($Z = 97$), *калифорний* ($Z = 98$), *эйнштейний* ($Z = 99$), *фермий* ($Z = 100$), *менделевий* ($Z = 101$), *нобелий* ($Z = 102$), *лоуренсий* ($Z = 103$), *резерфордий* ($Z = 104$), *дубний* ($Z = 105$), *сиборгий* ($Z = 106$), *борий* ($Z = 107$), *хассий* ($Z = 108$), *мейтнерий* ($Z = 109$), *дармштадтий* ($Z = 110$), *рентгений* ($Z = 111$), *коперниций* ($Z = 112$), *флеровий* ($Z = 114$), *ливерморий* ($Z = 116$). Элементы под номерами 107—112 были синтезированы в Германии в дармштадтском Центре исследований тяжёлых ионов.

В настоящее время известны трансурановые элементы с номерами 113—118, полученные в Объединённом институте ядерных

Обсудите, почему поставщики радиоактивных изотопов всегда указывают дату, в которую определена активность данного изотопа.

исследований в Дубне (часть — совместно с Ливерморской национальной лабораторией в США), но независимыми исследованиями подтверждено только открытие элементов под номерами 114 — флеровий и 116 — ливерморий.

Применение радиоактивных изотопов. В настоящее время как в науке, так и в производстве всё более широко используются радиоактивные изотопы различных химических элементов. Наибольшее применение имеет метод *меченых атомов*.

Метод основан на том, что химические свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов.

Обнаружить радиоактивные изотопы можно очень просто — по их излучению. Радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно проследить за поведением элемента при различных химических реакциях и физических превращениях веществ.

Интересно Метод меченых атомов стал одним из наиболее действенных методов при решении многочисленных проблем биологии, физиологии, медицины и т. д.

Радиоактивные изотопы широко применяются как компактные источники γ-лучей. Главным образом используется радиоактивный кобальт $^{60}_{27}$Co.

Радиоактивные изотопы в биологии и медицине. Одним из наиболее выдающихся исследований, проведённых с помощью меченых атомов, явилось исследование обмена веществ в организме. Было доказано, что за сравнительно небольшое время организм подвергается почти полному обновлению. Слагающие его атомы заменяются новыми.

Лишь железо, как показали опыты по изотопному исследованию крови, является исключением из этого правила. Железо входит в состав гемоглобина красных кровяных шариков. При введении в пищу радиоактивных атомов железа $^{59}_{26}$Fe было обнаружено, что они почти не поступают в кровь. Только в том случае, когда запасы железа в организме иссякают, железо начинает усваиваться организмом.

Радиоактивные изотопы применяются в медицине как для постановки диагноза, так и для терапевтических целей.

Радиоактивный натрий, вводимый в небольших количествах в кровь, используется для исследования кровообращения.

Иод интенсивно накапливается в щитовидной железе, особенно при базедовой болезни. Наблюдая с помощью счётчика за отложением радиоактивного иода, можно быстро поставить диагноз. Большие дозы радиоактивного иода вызывают частичное разрушение аномально развивающихся тканей, и поэтому радиоактивный иод используют для лечения базедовой болезни.

Интенсивное γ-излучение кобальта используется при лечении раковых заболеваний (кобальтовая пушка).

Радиоактивные изотопы в промышленности. Не менее обширна область применения радиоактивных изотопов в промышленности. Одним из примеров может служить способ контроля износа поршневых колец в двигателях внутреннего сгорания. Облучая поршневое кольцо нейтронами, вызывают в нём ядерные реакции и делают его радиоактивным. При работе двигателя частички материала кольца попадают в смазочное масло. Исследуя уровень

радиоактивности масла после определённого времени работы двигателя, определяют износ кольца.

Радиоактивные изотопы позволяют судить о диффузии металлов, процессах в доменных печах и т. д. Мощное γ-излучение радиоактивных препаратов используют для исследования внутренней структуры металлических отливок с целью обнаружения в них дефектов.

Радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Всё более широкое применение получают радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Облучение семян растений (хлопчатника, капусты, редиса и др.) небольшими дозами γ-лучей от радиоактивных препаратов приводит к заметному повышению урожайности.

Большие дозы радиации вызывают мутации у растений и микроорганизмов, что в отдельных случаях приводит к появлению мутантов с новыми ценными свойствами (радиоселекция). Так выведены ценные сорта пшеницы, фасоли и других культур, а также получены высокопродуктивные микроорганизмы, применяемые в производстве антибиотиков. Гамма-излучение радиоактивных изотопов используется также для борьбы с вредными насекомыми и для консервации пищевых продуктов.

Широкое применение получил метод меченых атомов в агротехнике. Например, чтобы выяснить, какое из фосфорных удобрений лучше усваивается растением, помечают различные удобрения радиоактивным фосфором $^{32}_{15}\mathrm{P}$. Исследуя затем растения на радиоактивность, можно определить количество усвоенного ими фосфора из разных сортов удобрения.

Радиоактивные изотопы в археологии. Интересное применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (дерева, древесного угля, тканей и т. д.) получил метод радиоактивного углерода. В растениях всегда имеется β-радиоактивный изотоп углерода $^{14}_{6}\mathrm{C}$ с периодом полураспада $T = 5700$ лет. Он образуется в атмосфере Земли в небольшом количестве из азота под действием нейтронов. Последние же возникают за счёт ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые поступают в атмосферу из космоса (космические лучи).

Соединяясь с кислородом, этот изотоп углерода образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. Один грамм углерода из образцов молодого леса испускает около пятнадцати β-частиц в секунду.

После гибели организма пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся же количество этого изотопа убывает за счёт радиоактивности. Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50 000 и даже до 100 000 лет. Таким методом узнают возраст египетских мумий, остатков доисторических костров и т. д.

Изотопы. Атомная масса. Химические свойства элементов Найти

1. Существуют ли изотопы у бария, относительная атомная масса которого 137,34?
2. Что такое радиоактивные изотопы и как их используют?

§ 94 БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Чем сопровождаются превращения ядер и ядерные реакции?

Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Даже сравнительно слабое излучение, которое при полном поглощении повышает температуру тела лишь на 0,001 °С, нарушает жизнедеятельность клеток.

Вспомните, что такое клетка в биологии.

Живая клетка — это сложный механизм, неспособный продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях отдельных его участков. Между тем и слабые излучения способны нанести клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания (лучевая болезнь).

При большой интенсивности излучения живые организмы погибают. Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Механизм биологического действия излучения, поражающего объекты, ещё недостаточно изучен. Но ясно, что оно сводится к ионизации атомов и молекул и это приводит к изменению их химической активности. Наиболее чувствительны к излучениям ядра клеток, особенно клеток, которые быстро делятся. Поэтому в первую очередь излучения поражают костный мозг, из-за чего нарушается процесс образования крови. Далее наступает поражение клеток пищеварительного тракта и других органов.

Интересно Сильное влияние оказывает облучение на наследственность, поражая гены в хромосомах. В большинстве случаев это влияние является неблагоприятным.

Облучение живых организмов может и приносить определённую пользу. Быстроразмножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ-лучами радиоактивных препаратов, которые для этой цели более эффективны, чем рентгеновские лучи.

Доза излучения. Воздействие излучений на живые организмы характеризуется *дозой излучения.*

Запомни **Доза поглощённого излучения** — это отношение поглощённой телом энергии ионизирующего излучения к массе облучаемого тела:

$$D = \frac{E}{m}.$$

В СИ поглощённую дозу излучения выражают в *греях* (Гр). 1 Гр равен поглощённой дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передаётся энергия ионизирующего излучения 1 Дж:

$$1\ \text{Гр} = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Человек постоянно подвергается слабому облучению радиоактивными источниками (космические лучи, радиоактивность горных пород и почвы, радиоактивные изотопы, находящиеся в пище, например изотоп калия).

Обсудите с одноклассниками, одинаков ли радиационный фон в городе и за городом, в различных областях страны.

Важно Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр на человека. Международная комиссия по радиационной защите установила для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую за год дозу — 0,05 Гр. Доза излучения 3—10 Гр, полученная за короткое время, смертельна.

Рентген. На практике широко используется внесистемная единица экспозиционной дозы излучения — *рентген* (Р). Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского и гамма-излучений. Доза излучения равна одному рентгену (1 Р), если в 1 $см^3$ сухого воздуха при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. образуется столько ионов, что их суммарный заряд каждого знака в отдельности равен $3 \cdot 10^{-10}$ Кл. При этом получается примерно $2 \cdot 10^9$ пар ионов. Число образующихся ионов связано с поглощаемой веществом энергией. В практической дозиметрии можно считать 1 Р примерно эквивалентным поглощённой дозе излучения 0,01 Гр.

Важно Характер воздействия излучения зависит не только от дозы поглощённого излучения, но и от его вида.

Различие биологического воздействия видов излучения характеризуется *коэффициентом качества* k. За единицу принимается коэффициент качества рентгеновского и гамма-излучений.

Самое большое значение коэффициента качества у α-частиц ($k = 20$), α-лучи являются самыми опасными, так как вызывают самые большие разрушения живых клеток.

Для оценки действия излучения на живые организмы вводится специальная величина, называемая *эквивалентной дозой поглощённого излучения.*

Запомни **Эквивалентная доза поглощённого излучения** определяется произведением дозы поглощённого излучения на коэффициент качества:

$$H = D \cdot k.$$

Единица эквивалентной дозы — *зиверт* (Зв). 1 Зв — эквивалентная доза, при которой доза поглощённого гамма-излучения равна 1 Гр.

Максимальное значение эквивалентной дозы, после которого происходит поражение организма, выражающееся в нарушении деления клетки или образовании новых клеток, 0,5 Зв.

Интересно Среднее значение эквивалентной дозы поглощённого излучения за счёт естественного радиационного фона (космические лучи, радиоактивные изотопы земной коры и т. д.) составляет 2 мЗв в год.

Защита организмов от излучения. При работе с любым источником радиации (радиоактивные изотопы, реакторы и др.) необходимо принимать меры по радиационной защите всех людей, могущих попасть в зону действия излучения.

Самый простой метод защиты — это удаление персонала от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учёта поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому ампулы с радиоактивными препаратами не следует брать руками. Надо пользоваться специальными щипцами с длинной ручкой.

В тех случаях, когда удаление от источника излучения на достаточно большое расстояние невозможно, для защиты от излучения используют преграды из поглощающих материалов.

Наиболее сложна защита от γ-лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ-лучей является свинец. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита.

После аварии на Чернобыльской АЭС Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) по предложению нашей страны приняты рекомендации по дополнительным мерам безопасности энергетических реакторов. Установлены более строгие регламенты работ персонала АЭС.

Опасность радиоактивных излучений. Грей. Рентген. Зиверт

1. Что такое доза излучения?
2. Чему (в рентгенах) равен естественный фон радиации?
3. Чему (в рентгенах) равна предельно допустимая за год доза излучения для лиц, работающих с радиоактивными препаратами?

ЕГЭ

Повторите материал главы 12 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин. Выразите их через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Открытия в области ядерной физики — счастье или несчастье человечества?»

1. Ядерная энергетика — достоинства и недостатки.
2. Альтернативные источники энергии в сравнении с АЭС.
3. Использование радиоактивных изотопов в науке, технике, медицине.
4. Сравнение достоинств и недостатков различных способов получения энергии: сжигание горючего (уголь, нефть, газ), деление ядер, ядерный синтез.

ГЛАВА 13 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В этой главе речь пойдёт о частицах, которые нельзя разделить и из которых построена вся материя.

§ 95 ТРИ ЭТАПА В РАЗВИТИИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Охарактеризуйте четыре известные вам частицы: электрон, фотон, протон и нейтрон.

Этап первый. От электрона до позитрона: 1897—1932 гг. (*Элементарные частицы — «атомы Демокрита» на более глубоком уровне.*)

Когда греческий физик Демокрит назвал простейшие нерасчленимые далее частицы атомами (слово *атом*, напомним, означает «неделимый»), то ему, вероятно, всё представлялось в принципе не очень сложным. Различные предметы, растения, животные состоят из неделимых неизменных частиц. Превращения, наблюдаемые в мире, — это простая перестановка атомов. Всё в мире течёт, всё изменяется, кроме самих атомов, которые остаются неизменными.

Но в конце XIX в. было открыто сложное строение атомов и выделен электрон как составная часть атома. Затем, уже в XX в., были открыты протон и нейтрон — частицы, входящие в состав атомного ядра.

Поначалу на все эти частицы смотрели точно так, как Демокрит смотрел на атомы: их считали неделимыми и неизменными первоначальными сущностями, основными «кирпичиками мироздания».

Этап второй. От позитрона до кварков: 1932—1964 гг. (*Все элементарные частицы превращаются друг в друга.*) Ситуация привлекательной ясности длилась недолго. Всё оказалось намного сложнее: как выяснилось, неизменных частиц нет совсем. В самом слове *элементарная* заключается двоякий смысл. С одной стороны, элементарный — это само собой разумеющийся, простейший. С другой стороны, под элементарным понимается нечто фундаментальное, лежащее в основе вещей (именно в этом смысле сейчас и называют *субатомные частицы* элементарными).

Считать известные сейчас элементарные частицы подобными неизменным атомам Демокрита мешает следующий простой факт. Ни одна из частиц не бессмертна. Большинство частиц, называемых сейчас элементарными, не может прожить более двух миллионных долей секунды, даже в отсутствие какого-либо воздействия извне. Свободный нейтрон (нейтрон, находящийся вне атомного ядра) живёт в среднем 15 мин.

Лишь частицы *фотон*, *электрон*, *протон* и *нейтрино* сохраняли бы свою неизменность, если бы каждая из них была одна в целом мире (нейтрино лишено электрического заряда, и его масса покоя чрезвычайно мала).

Но у электронов и протонов имеются опаснейшие собратья — *позитроны* и *антипротоны*, при столкновении с которыми происходит взаимное уничтожение этих частиц и образование новых.

Что означают слова «частица исчезает»? Нет ли здесь нарушения закона сохранения энергии?

Фотон, испущенный настольной лампой, живёт не более 10^{-8} с. Это то время, которое ему нужно, чтобы достичь страницы книги и поглотиться бумагой.

Лишь нейтрино практически бессмертны, так как они очень слабо взаимодействуют с другими частицами. Однако и нейтрино гибнут при столкновении с другими частицами, хотя такие столкновения случаются крайне редко.

Итак, в вечном стремлении к отысканию неизменного в нашем изменчивом мире учёные оказались не на гранитном основании, а на зыбком песке.

Важно Все элементарные частицы превращаются друг в друга, и эти взаимные превращения — главный факт их существования.

Ускорители частиц. Пусть у нас возникло естественное желание исследовать, состоит ли, например, электрон из каких-либо других *субэлементарных частиц*. Что нужно сделать для того, чтобы попытаться расчленить электрон? Можно придумать только один способ — тот, к которому прибегает ребёнок, если хочет узнать, что находится внутри игрушки, — сильный удар.

Разумеется, по электрону нельзя ударить молотком. Для этого можно воспользоваться другим электроном, летящим с огромной скоростью, или какой-либо иной движущейся с большой скоростью элементарной частицей.

Для решения этой научной задачи были разработаны *ускорители* частиц.

Существует множество типов ускорителей, но в основе работы всех лежит взаимодействие заряженных частиц с электрическим и магнитным полями. Электрическое поле увеличивает кинетическую энергию частицы, а магнитное, благодаря действию силы Лоренца, определяет её орбиту. На рисунке 1.31 показана принципиальная схема одного из первых ускорителей, называемого *циклотроном*.

Интересно Большой адронный коллайдер (БАК), построенный на границе Швейцарии и Франции в рамках международного проекта, является самой крупной экспериментальной установкой в мире. Длина тоннеля основного кольца ускорителя составляет 26 659 м.

Современные ускорители на встречных пучках, получившие название *коллайдеры*, позволяют сталкивать частицы с относительными скоростями, близкими к скорости света, а затем исследовать процессы, происходящие при столкновениях, и вновь получившиеся частицы.

Что же происходит при столкновении частиц сверхвысокой энергии? Они отнюдь не дробятся на нечто такое, что можно было бы назвать их составными частями. Они рождают новые частицы из числа тех, которые уже фигурируют в списке элементарных частиц. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем большее количество частиц рождается. При этом возможно появление частиц с большей массой, чем сталкивающиеся частицы.

Важно При всех превращениях частиц всегда выполняются законы сохранения энергии, электрического заряда, импульса.



Рис. 13.1

На рисунке 13.1 вы видите результат столкновения ядра углерода, имевшего энергию 60 млрд эВ (жирная верхняя линия), с ядром серебра фотоэмульсии. Ядро раскалывается на осколки, разлетающиеся в разные стороны. Одновременно рождаются новые элементарные частицы — *пионы*. Подобные реакции при столкновениях релятивистских ядер, полученных в ускорителе, впервые в мире осуществлены в лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований в г. Дубне под руководством академика А. М. Балдина. Лишённые электронной оболочки ядра были получены путём ионизации атомов углерода лазерным лучом.

Посчитайте, сколько примерно пионов возникло (см. рис. 13.1). Подумайте, почему следы от частиц имеют разные толщину и длину.

Возможно, конечно, что при столкновениях частиц с недоступной пока нам энергией будут рождаться и какие-то новые, ещё неизвестные частицы. Но сути дела это не изменит. Рождаемые при столкновениях новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части частиц-«родителей». Ведь «дочерние» частицы, если их ускорить, могут, не изменив своей природы, породить, в свою очередь, при столкновениях сразу несколько таких же в точности частиц, какими были их «родители», да ещё и множество других частиц.

Запомни

Элементарные частицы — это первичные, неразложимые далее частицы, из которых построена вся материя.

Однако неделимость элементарных частиц не означает, что у них отсутствует внутренняя структура.

Этап третий. От гипотезы о кварках (1964) до наших дней. (*Большинство элементарных частиц имеет сложную структуру.*) В 1960-е гг. возникли сомнения в том, что все частицы, называемые сейчас элементарными, полностью оправдывают это название. Основание для сомнений простое: этих частиц очень много. После 1932 г. было открыто более 400 частиц.

Например, была открыта группа так называемых *странных* частиц: K-мезонов и гиперонов с массами, превышающими массу нуклонов. В 1970-е гг. к ним прибавилась большая группа частиц с ещё бóльшими массами, названных *очарованными*. Кроме того, были открыты короткоживущие частицы с временем жизни порядка 10^{-22}—10^{-23} с. Эти частицы были названы *резонансами*, и их уже обнаружено больше двухсот.

Частицы характеризуются массой, зарядом, временем жизни и многими другими характеристиками. По мере открытия всё новых частиц вводились и характеристики, их определяющие. Так, в 1925 г. американские физики-теоретики голландского происхождения С. Гаудсмит и Дж. Уленбек для объяснения спектров атомов предположили, что электрон обладает собственным моментом импульса, названным ими *спином*.

По значению спина все частицы делятся на *фермионы* с полуцелым спином, равным $\hbar/2$, $3\hbar/2$, ..., и *бозоны* с целым спином — 0, $\hbar$, $2\hbar$, ...

Фермионами являются электрон, протон, нейтрон и электронное нейтрино. Бозонами являются фотон, π-мезон и ряд других частиц.

В связи с большим количеством элементарных частиц возникла проблема их классификации. Одним из способов классификации является классификация по виду взаимодействия.

Виды взаимодействия. Как вы уже знаете, в природе существуют четыре типа фундаментального взаимодействия, т. е. четыре типа сил.

Самое сильное взаимодействие обеспечивает ядерная сила, удерживающая частицы в ядре. Электромагнитное взаимодействие определяет силы, действующие на заряженные частицы. Слабая ядерная сила отвечает за распад тяжёлых частиц на более лёгкие, и, наконец, гравитационная сила — сила притяжения между телами, обладающими массой.

Известно, что электромагнитное взаимодействие обеспечивают виртуальные фотоны, а ядерное (сильное) взаимодействие — π-мезоны.

Учёные предположили, что частицы, ответственные за слабое взаимодействие, имеют массу порядка 100 ГэВ, они получили название W^+-, W^-- и Z^0-частиц. Спустя почти 20 лет после создания теории, объясняющей слабое взаимодействие, в 1983 г. эти частицы были экспериментально обнаружены.

Какими из типов взаимодействия мы пренебрегаем при рассмотрении движения планет, электронов в атоме, и какими — при рассмотрении частиц в ядре?

Гравитационное взаимодействие обеспечивает частица, названная *гравитоном*, она пока экспериментально не найдена.

Свойства этих четырёх типов фундаментального взаимодействия: время взаимодействия, радиус взаимодействия и отношение интенсивности данного взаимодействия к интенсивности сильного взаимодействия, а также названия виртуальных частиц, ответственных за эти взаимодействия, приведены в таблице.

Виды взаимодействия	Время взаимодействия, с	Радиус взаимодействия, м	Отношение интенсивностей	Частицы
Сильное (ядерное)	10^{-23}	10^{-15}	1	π-мезоны
Электромагнитное	10^{-21}	∞	10^{-2}	Фотоны
Слабое	10^{-9}	10^{-15}	10^{-14}	W^+, W^- и Z^0
Гравитационное	10^{16}	∞	10^{-39}	Гравитоны (не обнаружены)

Элементарные частицы. Виды взаимодействия. Ускорители

Найти

1. В чём различие трёх этапов развития физики элементарных частиц?
2. Какие четыре типа фундаментальных взаимодействий вы знаете?
3. Почему начало изучения элементарных частиц датируется 1932 г.?

§ 96 ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА. АНТИЧАСТИЦЫ

Какими свойствами обладает электрон?
Чему равны его заряд и масса?

Существование двойника электрона — позитрона — было предсказано теоретически английским физиком П. Дираком в 1931 г.

Одновременно он предсказал, что при встрече позитрона с электроном обе частицы должны *исчезнуть*, породив фотоны большой энергии. Может протекать и обратный процесс — *рождение электронно-позитронной пары*, например, при столкновении фотона достаточно большой энергии (его масса должна быть больше суммы масс покоя рождающихся частиц) с ядром.

Вспомните, при каком радиоактивном распаде образуется позитрон.

Спустя два года позитрон (см. § 83) был обнаружен с помощью камеры Вильсона, помещённой в магнитное поле. Направление искривления трека частицы указывало знак её заряда. По радиусу кривизны и энергии частицы было определено отношение её заряда к массе. Оно оказалось по модулю таким же, как и у электрона. На рисунке 13.2 вы видите первую фотографию, доказавшую существование позитрона. Частица двигалась снизу вверх и, пройдя свинцовую пластинку, потеряла часть своей энергии. Из-за этого кривизна траектории увеличилась.

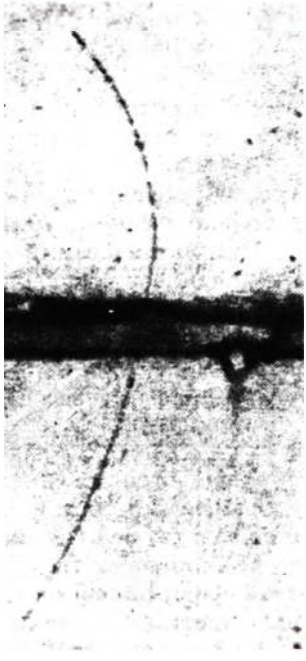


Рис. 13.2

Процесс рождения пары электрон — позитрон γ-квантом в свинцовой пластинке показан на фотографии, приведённой на рисунке 13.3. В камере Вильсона, находящейся в магнитном поле, пара оставляет характерный след в виде двурогой вилки.

Исчезновение (*аннигиляция*) одних частиц и появление других при реакциях между элементарными частицами являются именно превращением, а не просто возникновением новой комбинации составных частей старых частиц. Особенно наглядно обнаруживается это при аннигиляции пары электрон — позитрон. Обе частицы обладают определённой массой в состоянии покоя и электрическими зарядами. Фотоны же, которые при этом рождаются, не имеют зарядов и не обладают массой покоя, так как не могут существовать в состоянии покоя.

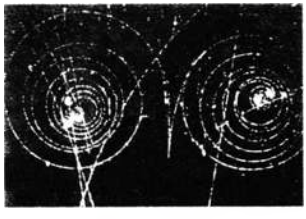


Рис. 13.3

Вспомните, как зависит кривизна траектории заряженной частицы в магнитном поле от скорости частицы.

В своё время открытие рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар вызвало настоящую сенсацию в науке. До того никто не предполагал, что электрон, старейшая из частиц, важнейший строительный материал атомов, может оказаться не вечным. Впоследствии двойники — *античастицы* — были найдены у всех частиц.

Важно

Античастицы противопоставляются частицам именно потому, что при встрече любой частицы с соответствующей античастицей происходит их аннигиляция. Обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.

Подумайте, почему траектория частиц имеет вид спирали.

Сравнительно недавно обнаружены *антипротон* и *антинейтрон*. Электрический заряд антипротона отрицателен.

Сейчас хорошо известно, что рождение пары *частица—античастица* и их аннигиляция не составляют монополии электронов и позитронов.

Атомы, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка — из позитронов, образуют *антивещество*. В 1969 г. в нашей стране был впервые получен *антигелий*.

При аннигиляции антивещества с веществом энергия покоя превращается в кинетическую энергию образующихся γ-квантов.

Электрон и позитрон — заряженные частицы. Нет ли нарушения закона сохранения заряда и массы при их исчезновении (аннигиляции)?

Энергия покоя — самый грандиозный и концентрированный резервуар энергии во Вселенной. И только при аннигиляции она полностью высвобождается, превращаясь в другие виды энергии. Поэтому антивещество — самый совершенный источник энергии, самое калорийное «горючее». В состоянии ли будет человечество когда-либо это «горючее» использовать, сейчас сказать трудно.

Можно надеяться, что настанет время, когда будет решена основная задача физики элементарных частиц. Будет получен спектр масс элементарных частиц и выяснено, чем определяются значения электрического заряда и других констант взаимодействия.

Позитрон. Античастицы. Аннигиляция

Найти

1. Чему равна частота γ-квантов, возникающих при аннигиляции медленно движущихся электрона и позитрона?
2. Можно ли в пузырьковой камере наблюдать трек заряженной частицы с временем жизни 10^{-23} с?

§ 97 ЛЕПТОНЫ

Какие виды фундаментального взаимодействия вы знаете?

Как мы говорили, классификацию частиц проводят по виду взаимодействия, в котором они участвуют. Так, все частицы, имеющие массу, притягиваются друг к другу (гравитационное взаимодействие). Между частицами, имеющими заряд, происходит электромагнитное взаимодействие. Но основное разделение частиц происходит по *сильному взаимодействию.*

Все частицы делятся на три класса.

К первому классу частиц относится одна частица — фотон, который участвует только в электромагнитном взаимодействии.

Второй класс частиц — *лептоны.*

Запомни **Лептоны** — фундаментальные частицы с полуцелым спином, не участвующие в сильном взаимодействии.

По значению спина лептон — фермион. К лептонам относятся электроны, μ-мезоны (мюоны) — μ^+, μ^- и нейтрино.

Интересно Слово «лептон» происходит от греческого слова leptos — лёгкий.

Мю-мезоны, или мюоны, были обнаружены в 1936 г. в космических лучах. На поверхность площадью в 1 м^2 за 1 с падает в среднем 170 частиц. За время жизни, которое достаточно мало, мюон пролетает около 700 м.

Исследования распада и превращения частиц показали, что при этом выполняются некоторые новые законы сохранения. Эти законы позволяют объяснить, почему одни реакции возможны, а другие нет.

Интересно Мюонное нейтрино было открыто в 1961 г. в эксперименте на протонном синхротроне в Брукхейвенской лаборатории, США. Это событие стало возможным благодаря получению пучков высокоэнергетичных нейтрино на ускорителе.

Возможна одна реакция распада нейтрона: $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$, но невозможна вторая: $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_e$, хотя известные законы сохранения выполняются. Для объяснения таких фактов было введено новое квантовое число — *лептонный заряд L*. У электрона и электронного нейтрино электронный лептонный заряд $L_e = 1$, у позитрона и электронного антинейтрино $L_e = -1$, у остальных частиц $L_e = 0$. На основе эксперимента был сформулирован *закон сохранения лептонного заряда.* Тогда становится понятно, почему вторая реакция не может произойти, — при ней не сохраняется лептонный заряд.

Было замечено, что иногда при реакциях распада испускается другая частица — *мюонное нейтрино* (ν_μ).

При распаде с участием мюонов выполняется закон сохранения *мюонного лептонного заряда*, у мюона μ^- и мюонного нейтрино ν_μ лептонный заряд $L_\mu = +1$, у мюона μ^+ и мюонного антинейтрино $\tilde{\nu}_\mu$ лептонный заряд $L_\mu = -1$, у остальных частиц $L_\mu = 0$.

Подумайте, почему распад $\mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e$ не наблюдается, а распад $\mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$ наблюдается. Проверьте выполнение законов сохранения мюонного и электронного лептонных зарядов.

В 1975 г. была открыта частица, также относящаяся к классу лептонов, — таон (τ^-), частица гораздо более тяжёлая, чем электрон и даже протон. Время жизни таона очень мало. Он распадается на мюон, мюонное антинейтрино и таонное нейтрино: $\tau^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$. При этой реакции распада сохраняется таонный лептонный заряд L_τ, который у таона τ^- и таонного нейтрино равен единице: $L_\tau = +1$, а у таона τ^+ и таонного антинейтрино $L_\tau = -1$.

Важно Лептоны участвуют в слабом взаимодействии. Между заряженными частицами, относящимися к этому классу частиц, происходит ещё и электромагнитное взаимодействие.

Число лептонов равно шести.

В таблице приведены названия лептонов, их масса покоя и время жизни.

Название	Обозначение	Масса покоя, МэВ	Время жизни, с
Электрон	e^-	0,511	Стабилен
Электронное нейтрино	ν_e	$< 10^{-6}$ (?)	Стабильно
Мюон	μ^-	105,7	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
Мюонное нейтрино	ν_μ	$< 2 \cdot 10^{-6}$ (?)	Стабильно
τ-лептон	τ^-	1784	$< 4 \cdot 10^{-13}$
τ-нейтрино	ν_τ	$< 5 \cdot 10^{-6}$ (?)	Стабильно

Знак вопроса стоит около масс частиц, значения которых до конца не ясны.

Важно Все лептоны имеют античастицы, таким образом, существует 12 лептонов.

Вспомните, при каком распаде испускается нейтрино.

Например, при известном вам β^--распаде испускается электрон и антинейтрино $\tilde{\nu}_e$.

Обратим внимание на то, что

Важно античастицы отличаются от частиц знаком электрического и лептонного зарядов.

Лептоны. Лептонный заряд. Слабое взаимодействие — Найти

1. Какой из видов взаимодействия характерен для лептонов?
2. Можно ли сказать, что лептоны — лёгкие частицы?
3. Какие законы сохранения должны выполняться при распаде с участием лептонов?

§ 98 АДРОНЫ. КВАРКИ

Перечислите известные вам свойства лептонов.

К третьему классу частиц относятся *адроны*.

Запомни

Адроны — это элементарные частицы, участвующие в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях и имеющие внутреннюю структуру, в отличие от бесструктурных частиц (лептонов).

Интересно

Слово «адрон» происходит от греческого слова hadros — большой, сильный.

Адроны, в свою очередь, делятся на две группы — *мезоны* и *барионы*.

К первой группе — *мезонам* — относятся следующие частицы и античастицы: π^0-, $\tilde{\pi}^0$-, π^+-, π^--, K^+-, K^--, K^0-, $\tilde{K}^0$-, η^0-, $\tilde{\eta}^0$-мезоны. Спиновое квантовое число мезонов равно целому числу: 0, 1, 2, ... (в единицах $\hbar$), т. е. по спину они относятся к классу *бозонов* (см. § 95).

Ко второй группе — *барионам* — относятся протоны (p, $\tilde{p}$), нейтроны (n, $\tilde{n}$), Λ^0-, $\tilde{\Lambda}^0$ (лямбда)-, Σ^+-, Σ^--, Σ^0-, $\tilde{\Sigma}^0$ (сигма)-, Ξ^0-, $\tilde{\Xi}^0$-, Ξ^--, $\tilde{\Xi}^+$ (кси)-, Ω^--, Ω^+ (омега)-частицы. Спиновое квантовое число барионов $s = 1/2, 3/2, \ldots$ (в единицах $\hbar$), т. е. по спину они относятся к классу *фермионов* (см. § 95).

В таблице приведены названия некоторых адронов, их масса покоя и время жизни.

Название	Обозначение	Масса покоя, МэВ	Время жизни, с
Мезоны			
Пион	π^+	139,6	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
	π^0	135,0	$8{,}3 \cdot 10^{-17}$
Каон	K^+	493,7	$1{,}24 \cdot 10^{-8}$
	K^0_S	497,7	$8{,}9 \cdot 10^{-11}$
Барионы			
Протон	p	938,3	Стабилен
Нейтрон	n	939,6	920
Лямбда	Λ^0	1115,6	$2{,}6 \cdot 10^{-10}$

Время жизни нестабильных частиц зависит от природы их взаимодействия, которое и определяет их распад. Если распад происходит за счёт сильного взаимодействия, то время жизни таких частиц очень мало — $\sim 10^{-23}$ с.

Взаимодействие и распад нуклонов происходит, как мы знаем, за счёт сильного взаимодействия. При таком распаде выполняется ещё один закон

сохранения — закон сохранения *барионного заряда*. Введение этого квантового числа было вызвано необходимостью объяснения, почему реакция $p + p \rightarrow p + p + \tilde{p}$ не наблюдается, а реакция $p + n \rightarrow n + p + \tilde{p} + p$ наблюдается.

Проверьте выполнение закона сохранения барионного заряда для двух приведённых реакций.

Считается, что барионный заряд всех нуклонов $B = +1$, а антинуклонов $B = -1$.

Большое количество сильно взаимодействующих частиц распадается также на сильно взаимодействующие частицы, такие, например, как пионы, протоны и нейтроны. При этом может образоваться короткоживущая (время жизни 10^{-23} с) частица, называемая *резонансом*.

При распаде, обусловленном электромагнитным взаимодействием, образуется фотон, время жизни которого ~10^{-23} с.

При распаде, обусловленном слабым взаимодействием, время жизни частицы больше: ~10^{-10} с.

Посмотрите на таблицу и подумайте, какой из видов взаимодействия определяет распад приведённых в ней частиц.

Кварки. В 60-х гг. XX в. было уже известно четыре лептона и более ста адронов. Вот тогда-то (в 1964 г.) М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом была предложена модель, согласно которой все частицы, участвующие в сильных (ядерных) взаимодействиях, — *адроны* — построены из более фундаментальных (или первичных) частиц — *кварков*.

Запомни **Кварк** — это фундаментальная частица в Стандартной модели, обладающая электрическим зарядом, кратным $e/3$ ($+\frac{2}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$) и не обнаруженная в свободном состоянии.

Интересно Стандартная модель — это теория в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия всех элементарных частиц. Стандартная модель не включает в себя теорию гравитации.

В этой модели предполагается, что все адроны теоретически можно построить из кварков трёх типов: u, d и s. Протоны и нейтроны состоят из трёх кварков — u (up — верхний), d (down — нижний) и s (strange — странный). π^+-Мезон состоит из u-кварка, заряд которого равен $(2/3)e$, и d-антикварка, заряд которого равен $(1/3)e$.

В 1964 г. было высказано также предположение, что существует четвёртый кварк, получивший название *очарованный* (c — charm) с электрическим зарядом, равным $(+2/3)e$. Спустя 10 лет был обнаружен тяжёлый мезон, структуру которого можно было объяснить с помощью c-кварка.

Барионный заряд кварков равен 1/3. Барионы протон и нейтрон имеют барионный заряд, равный 1, они состоят из трёх кварков.

В настоящее время считается, что существует 6 сортов (чаще говорят: *ароматов*) кварков: u, d, s, c, b, t. Существование последних двух постулировано

из соображений симметрии, так как существует 6 лептонов, являющихся фундаментальными частицами, следовательно, должно существовать и 6 кварков. Эти два кварка были названы *истинный* и *прелестный*.

Вспомните, у какой частицы до создания теории кварков заряд считался минимальным. Чему он равен?

В таблице приведены некоторые свойства кварков.

Обозначение	Название		Электрический заряд	Масса
	рус.	англ.		
d	нижний	down	$(-1/3)e$	~ 5 МэВ/c^2
u	верхний	up	$(+2/3)e$	~ 3 МэВ/c^2
s	странный	strange	$(-1/3)e$	~ 95 МэВ/c^2
c	очарованный	charm, charmed	$(+2/3)e$	~ 1,3 ГэВ/c^2
b	прелестный	beauty	$(-1/3)e$	~ 4,2 ГэВ/c^2
t	истинный	truth	$(+2/3)e$	~ 173 ГэВ/c^2

Кроме того, для описания сильного взаимодействия кварков постулируется, что кварки обладают и дополнительной внутренней характеристикой, называемой *цветом*. Каждый из ароматов кварка имеет цвет — красный, зелёный и синий.

Подумайте, какую массу должны иметь частицы, содержащие последние два кварка. Какие энергии должен обеспечить ускоритель для рождения таких частиц?

С цветом кварка связывают взаимодействие, удерживающее кварки в адроне, например в протоне и нейтроне. Сильное взаимодействие кварков называют цветовым взаимодействием, так как кварку приписывается цветовой заряд, подобный электрическому заряду.

Важно

Сильное взаимодействие кварков осуществляется при обмене **глюонами**. Глюоны в теории кварков являются аналогами мезонов, осуществляющих сильное взаимодействие нуклонов в ядре.

Глюон имеет цветовой заряд и массу покоя, равную нулю. Глюон переносит цветовой заряд. При обмене глюонами происходит цветовой обмен.

Заметим, что все фундаментальные частицы относятся к *фермионам*, а частицы-переносчики взаимодействия — к *бозонам*.

Слово «глюон» происходит от английского слова glue — клей.

Таким образом, согласно так называемой Стандартной модели, вся материя состоит из 24 частиц: шести видов лептонов и шести видов кварков, каждый из которых имеет античастицу.

В настоящее время в реальности кварков никто не сомневается, хотя в свободном состоянии они не обнаружены и, вероятно, не будут обнаружены

никогда. Сильное взаимодействие приводит к тому, что кварки нельзя разделить, т. е. удалить один из кварков на расстояние, при котором он станет свободным. Существование кварков доказывают опыты по рассеянию электронов очень высокой энергии на протонах и нейтронах. Благодаря ускорителям, позволяющим получить частицы с очень большой энергией, при бомбардировке протона были обнаружены частицы, обладающие теми же зарядами, что и кварки.

Есть ещё много косвенных экспериментальных доказательств существования кварков. Несмотря на то что отдельные кварки экспериментально не обнаружены, гипотеза кварков объясняет все имеющиеся экспериментальные данные.

Кварки. Адроны. Фундаментальные частицы — Найти

1. Что такое кварк?
2. Что объясняет Стандартная модель?
3. Какие характеристики кварков были введены для объяснения их взаимодействия?

Повторите материал главы 13 по следующему плану:

1. Составьте список основных свойств элементарных частиц.
2. Выпишите названия четырёх фундаментальных взаимодействий и названия частиц, ответственных за эти взаимодействия.
3. Опишите, что включает в себя так называемая Стандартная модель и что она объясняет.
4. Запишите названия и свойства некоторых частиц и античастиц.

«Элементарные частицы — первокирпичики материи»

1. Этапы развития теории элементарных частиц. Современное состояние проблемы изучения состава материи.
2. Способы классификации элементарных частиц.
3. Результаты последних исследований на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

АСТРОНОМИЯ

В этом разделе мы изучим строение Солнечной системы, законы, описывающие движение планет, проявления гравитационного взаимодействия в системе Земля—Луна, физические свойства Солнца и звёзд. Используя известные законы физики, заглянем в недра звёзд, обсудим их жизнь и смерть. Узнаем, что останется после смерти Солнца и более массивных звёзд. Изучение мира галактик позволит нам узнать, как устроен Млечный Путь и где образуются звёзды.

ГЛАВА 14 СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Из этой главы мы узнаем, что сложный характер движения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца объясняет смену лунных фаз, явление приливов и отливов, а также закономерности солнечных и лунных затмений. Изучим состав Солнечной системы.

§ 99 ВИДИМЫЕ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

Можно ли описывать движения небесных тел в геоцентрической и гелиоцентрической системах?
Какая сила управляет движением планет?

Тёмной ночью мы можем увидеть на небе около 2500 звёзд (с учётом невидимого полушария 5000), которые различаются по блеску и цвету. Кажется, что они прикреплены к *небесной сфере* и вместе с ней обращаются вокруг Земли.

Запомни **Небесная сфера** — это воображаемая сфера произвольного радиуса, на которую проецируются небесные тела.

Чтобы ориентироваться среди звёзд, небо разбили на 88 созвездий. Во II в. до н. э. Гиппарх разделил звёзды по блеску на звёздные величины, самые яркие он отнёс к звёздам первой величины (1^m), а самые слабые, едва видимые невооружённым глазом, — к 6^m. В созвездии звёзды обозначаются греческими буквами, некоторые самые яркие звёзды имеют собственные названия. Так, Полярная звезда — α Малой Медведицы имеет блеск 2^m. Самая яркая звезда северного неба Вега — α Лиры имеет блеск около 0^m.

Особое место среди созвездий занимают 12 зодиакальных созвездий, через которые проходит *эклиптика*.

Запомни **Эклиптика** — это большой круг небесной сферы, по которому происходит видимое годовое движение Солнца.

Так, в марте Солнце движется по созвездию Рыб, в мае — Тельца, в августе — Льва, в ноябре — Скорпиона.

В настоящее время для ориентации среди звёзд астрономы используют различные системы небесных координат. Одна из них — экваториальная система координат (рис. 14.1). В её основе лежит *небесный экватор*.

Проведите вечерние наблюдения. Отметьте время по часам. Найдите Большую и Малую Медведицу, Полярную звезду. Если видна Луна, зарисуйте её вид (фазу). Понаблюдайте за небом 5—10 минут и обратите внимание на метеоры (падающие звёзды).

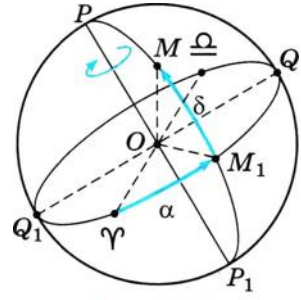


Рис. 14.1

Запомни

Небесный экватор — это проекция земного экватора на небесную сферу.

Полюсы мира (точки P, P_1 на рисунке 14.1) — точки пересечения **оси мира** — оси видимого вращения небесной сферы — с небесной сферой.

Можно считать, что ось мира совпадает с земной осью.

Запомни

Круг склонения — это круг PMM_1P_1 небесной сферы, проходящий через полюсы мира и наблюдаемое светило.

Эклиптика и экватор пересекаются в двух точках: весеннего (♈) и осеннего (♎) равноденствия.

Точка весеннего равноденствия находится в созвездии Рыб, и она служит начальной точкой, от которой в направлении против часовой стрелки отсчитывается *прямое восхождение*, его обычно обозначают буквой α.

Запомни

Прямое восхождение — это длина дуги небесного экватора от точки весеннего равноденствия до круга склонения светила — одна из координат экваториальной системы.

Эта координата является аналогом долготы в географических координатах. В астрономии принято прямое восхождение измерять в часовой мере, а не в градусной. При этом исходят из того, что полная окружность составляет 24 ч. Вторая координата светила δ — *склонение*.

Запомни

Склонение светила — это угловое расстояние светила от плоскости небесного экватора, измеренное вдоль круга склонения.

Определите по рисунку 14.2 приблизительные экваториальные координаты звезды Регул (α Льва).

Склонение является аналогом широты, её измеряют в градусной мере. Так, звезда Альтаир (α Орла) имеет координаты $\alpha = 19^{ч}48^{м}18^{с}$, склонение $\delta = +8°44'$. Измеренные координаты звёзд хранят в каталогах, по ним составляют звёздные карты, которые используют астрономы при поиске нужных светил.

Взаимное расположение звёзд на небе не меняется, они совершают суточное вращение вместе с небесной сферой. Планеты наряду с суточным вращением совершают медленное движение среди звёзд.

Видимый путь планет на небе петлеобразен. Размеры описываемых планетами петель различны. На рисунке 14.2 показано видимое петлеобразное движение Марса, которое длится 79 дней.

Наиболее просто видимое движение планет и Солнца описывается в *гелиоцентрической* системе отсчёта, связанной с Солнцем. Такой подход был предложен польским астрономом Николаем Коперником (1473—1543). В этой системе суточное движение небесного свода объясняется вращением Земли вокруг оси, годичное движение Солнца по эклиптике — движением Земли вокруг Солнца, а описываемые планетами петли — сложением движений Земли и планет (рис. 14.3). Вокруг Земли движется только Луна. Коперник рассчитал относительные расстояния от планет до Солнца.

Интересно

Слово «планета» происходит от греческого слова planetas — блуждающая звезда.

В астрономии среднее расстояние от Земли до Солнца принято за единицу расстояния и называется **астрономической единицей** (а. е.):

$$1 \text{ а. е.} = 150 \cdot 10^6 \text{ км}.$$

Так, Меркурий находится от Земли на расстоянии 0,39 а. е., а Сатурн — на расстоянии 9,54 а. е.

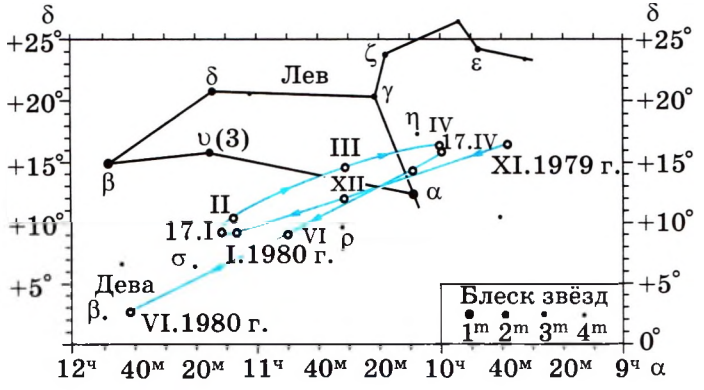


Рис. 14.2

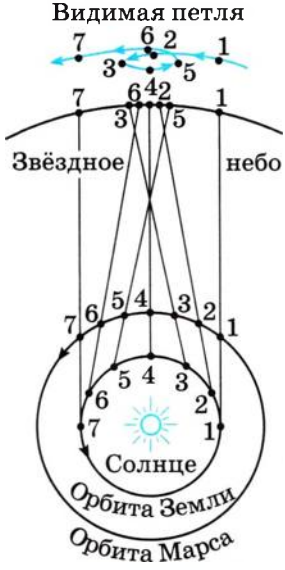


Рис. 14.3

Максимальное видимое угловое расстояние от Венеры до Солнца составляет почти 45°. Сделайте чертёж взаимного расположения Земли, Венеры и Солнца и рассчитайте расстояние от Венеры до Солнца в астрономических единицах.

В античные времена и вплоть до Коперника полагали, что в центре Вселенной расположена Земля и все небесные тела обращаются по сложным траекториям вокруг неё.

Доказательство движения Земли вокруг Солнца и определение расстояний до звёзд. Если Земля обращается вокруг Солнца, то близкие звёзды должны периодически смещаться на фоне более далёких звёзд.

Запомни

Периодическое смещение звезды на фоне более далёких звёзд называется **параллактическим**, а угол π, под которым со звезды виден радиус земной орбиты, называется **параллаксом**.

В 1974 г. был послан закодированный радиосигнал внеземной цивилизации в шаровое звёздное скопление M13, параллакс которого $\pi = 0{,}00013''$. Как долго будет идти это послание до скопления?

Как видно из рисунка 14.4, расстояние до звезды

$$r = \frac{a_0}{\sin \pi} = \frac{a_0}{\pi_{\text{рад}}} = \frac{a_0 \cdot 206\,265}{\pi''}.$$

Так как параллакс звёзд мал, мы заменили синус малого угла самим углом, выраженным в радианной мере, а затем перешли от радианной меры к градусной, учитывая, что 1 рад = 206 265″. В астрономии принято измерять расстояния до звёзд в *парсеках* (пк).

Запомни

Парсек — расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом 1″:

$$1 \text{ пк} = 206\,265 \cdot a_0 = 206\,265 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ км} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км}.$$

Итак, если параллакс измерять в угловых секундах, а расстояние до звезды — в парсеках, то связью между ними будет равенство

$$r_{\text{пк}} = \frac{1}{\pi}. \qquad (14.1)$$

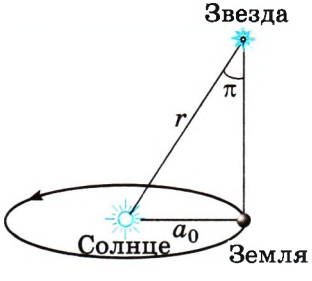


Рис. 14.4

Только во второй половине XIX в. удалось измерить параллаксы и расстояния до звёзд и тем самым подтвердить теорию Коперника наблюдениями.

Так, ближайшая к нам звезда α Центавра имеет параллакс $\pi = 0{,}751''$, поэтому расстояние до неё $r = 1{,}33$ пк $= 4 \cdot 10^{13}$ км.

Интересно Расстояние до самого далёкого объекта, измеренное в настоящее время, составляет порядка 10^{10} пк, луч света от него до нас идёт более 13 млрд лет.

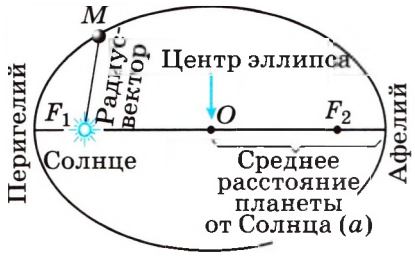


Рис. 14.5

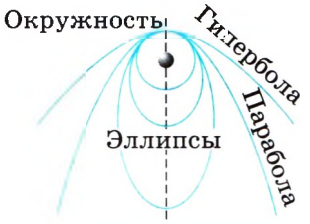


Рис. 14.6

Законы движения планет. В конце XVI в. немецкий астроном Иоганн Кеплер, изучая движение планет, открыл три закона их движения.

Законы Кеплера

1. Орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце (рис. 14.5).
2. Каждая планета движется так, что радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.
3. Квадраты периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

На основании этих законов И. Ньютон вывел формулу для закона всемирного тяготения. В дальнейшем, используя законы механики, И. Ньютон решил задачу двух тел — вывел законы, согласно которым одно тело движется в поле тяготения другого тела. Он получил три обобщённых закона Кеплера.

Первый обобщённый закон Кеплера

Под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — кругу, эллипсу, параболе или гиперболе (рис. 14.6).

Планеты движутся вокруг Солнца по эллиптической орбите (см. рис. 14.5).

Запомни

Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется **перигелием**, самая далёкая — **афелием**. Линия, соединяющая какую-либо точку эллипса с фокусом, называется **радиус-вектором**. Отношение расстояния между фокусами к большой оси (к наибольшему диаметру) называется **эксцентриситетом** e.

Эллипс тем сильнее вытянут, чем больше его эксцентриситет. Большая полуось эллипса a — среднее расстояние от планеты до Солнца.

По эллиптическим орбитам движутся также кометы и астероиды. У окружности $e = 0$, у эллипса $0 < e < 1$, у параболы $e = 1$, у гиперболы $e > 1$ (см. рис. 14.6).

Движение естественных и искусственных спутников вокруг планет, движение одной звезды вокруг другой в двойной системе также подчиняются этому первому обобщённому закону Кеплера.

Формулировка *второго закона Кеплера* не потребовала обобщения.

Планета проходит путь от точки A до точки A' и от точки B до точки B' (рис. 14.7) за одно и то же время. Другими словами, планета движется

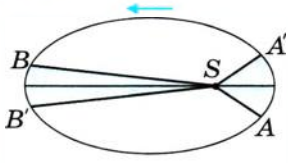


Рис. 14.7

быстрее всего в перигелии, а медленнее всего, когда находится на наибольшем удалении (в афелии). Таким образом, второй закон Кеплера определяет скорость движения планеты. Она тем больше, чем планета ближе к Солнцу. Так, скорость кометы Галлея в перигелии равна 55 км/с, а в афелии равна 0,9 км/с.

Третий обобщённый закон Кеплера Куб большой полуоси орбиты тела, делённый на квадрат периода его обращения и на сумму масс тел, есть величина постоянная.

Если T — период обращения одного тела вокруг другого тела на среднем расстоянии a, то третий обобщённый закон Кеплера можно записать так:

$$a^3/(T^2(M_1 + M_2)) = G/4\pi^2, \qquad (14.2)$$

где M_1 и M_2 — массы двух притягивающихся тел, а G — гравитационная постоянная. Для Солнечной системы масса Солнца $M_\odot = M_1 \gg M_2$ массы любой планеты, и тогда

$$a^3/T^2 = GM_\odot/4\pi^2. \qquad (14.3)$$

Правая часть уравнения — постоянная для всех тел Солнечной системы, что и утверждает третий закон Кеплера, полученный учёным из наблюдений.

Третий обобщённый закон Кеплера позволяет определять массы планет по движению их спутников и массы двойных звёзд по элементам их орбит.

Важно Если массы тел в двойных звёздах измерять в массах Солнца, расстояние между ними — в астрономических единицах, а периоды — в годах, то третий обобщённый закон Кеплера принимает вид $\frac{T^2}{a^3} = \frac{1}{M_1 + M_2}$. Для тел Солнечной системы $T^2 = a^3$.

Интересно Использование третьего обобщённого закона Кеплера для объяснения движения звёзд по эллипсам вокруг невидимого тела в центре Млечного Пути позволило обнаружить в центре чёрную дыру массой около 2 млн солнечных масс.

Воткните две кнопки в картонку, а между ними сделайте свободную петлю из нитки. Натягивая карандашом нить, начертите эллипс с фокусами в точках, где воткнуты кнопки. Укажите положение Солнца, планеты, перигелий, афелий и большую полуось.

Эклиптика. Прямое восхождение. Склонение. Параллакс — Найти

Законы Кеплера. Эллипс. Афелий. Перигелий — Найти

1. Перечислите основные элементы эллиптической орбиты планеты.
2. Как связаны периоды обращения планет с их средними расстояниями до Солнца?

§100 СИСТЕМА ЗЕМЛЯ — ЛУНА

Чем различаются силы притяжения Луны Землёй и Земли Луной?
Можно ли считать систему отсчёта, связанную с Землёй, инерциальной?

Проведите вечерние наблюдения Луны в бинокль или телескоп. Отметьте время по часам. Обратите внимание на фазу Луны, кратеры и моря на ней, на различия морей и материков.

Видимое движение Луны. Луна — ближайшее к Земле небесное тело и её естественный спутник. Луна делает один оборот вокруг Земли за 27,3 сут. и с таким же периодом вращается вокруг своей оси, поэтому с Земли видно только одно её полушарие. Обратную сторону Луны впервые удалось увидеть только 7 октября 1959 г., когда советская автоматическая станция «Луна-3» облетела Луну и сфотографировала её обратную сторону, передав снимки на Землю.

Видимое перемещение Луны происходит неравномерно, потому что Луна движется в пространстве по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится центр Земли. Большая полуось лунной орбиты $a = 384\,400$ км $= 60{,}3R_\oplus$ ($R_\oplus$ — радиус Земли), эксцентриситет $e = 0{,}055$.

Луна, подобно Земле, представляет собой тёмный непрозрачный шар, светящийся отражённым солнечным светом. Солнце всегда освещает примерно половину этого шара, другая половина остаётся тёмной. Но так как к Земле обычно бывают обращены и часть светлого видимого полушария, и часть неосвещённого, то Луна бóльшую часть времени кажется нам неполной. Различают четыре основные фазы Луны: новолуние, первую четверть, полнолуние и последнюю (третью) четверть.

На рисунке 14.8 показаны положения Луны относительно Земли и Солнца для различных фаз.

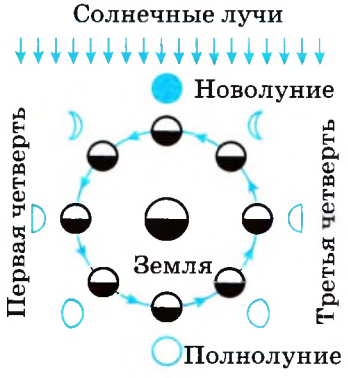


Рис. 14.8

Запомни Интервал времени между двумя последовательными новолуниями, равный 29,5 сут., получил название **синодический месяц** (период).

Синодический месяц лежит в основе лунного календаря.

Солнечные и лунные затмения. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце.

Запомни **Солнечное затмение** — астрономическое явление, которое заключается в том, что Луна закрывает полностью или частично Солнце от наблюдателя на Земле.

Оно может произойти во время новолуний.

Когда Луна попадает в тень Земли, наступает *лунное затмение*.

Запомни **Лунное затмение** — затмение Луны, которое наступает, когда она входит в тень, отбрасываемую Землёй.

Лунное затмение может наступить во время полнолуний.

Вследствие наклона лунной орбиты к эклиптике эти явления происходят не каждый месяц, а значительно реже. На протяжении календарного года происходят от 2 до 5 солнечных затмений и от 0 до 3 лунных затмений.

Ещё древние вавилоняне заметили, что все затмения повторяются в том же порядке примерно через 18 лет и 11 дней. Этот период у древних вавилонян назывался *циклом Сароса* (в переводе с египетского *сарос* — повторение), им пользовались для предсказания затмений.

Важно Все затмения повторяются через цикл Сароса — период в 18 лет и 11,3 сут. (или 10,3 сут., если в этом периоде содержатся 5 високосных лет).

Интересно Диаметр пятна тени Земли на расстоянии 363 000 км (минимальное расстояние от Луны до Земли) составляет около 2,5 диаметра Луны.

27 июля 1990 г. произошло полное солнечное затмение. Когда обязательно произойдёт солнечное затмение?

Приливные явления. Под действием лунного притяжения водная оболочка Земли принимает слегка вытянутую в сторону Луны (и в противоположную сторону) форму. Там, где Луна выше всего над горизонтом и где ниже всего под горизонтом, будет прилив. На восходе и заходе Луны будут наблюдаться отливы (рис. 14.9). Действительно, ближайшая к Луне точка A будет испытывать большее ускорение под действием силы притяжения Луны, чем центр Земли E и точка C (эти ускорения обозначены цветными векторами). Разность ускорений между любой точкой водной поверхности (точками A, B, C, D и др.) и центром Земли E называется *приливным ускорением* (отмечены чёрным цветом), а сила, которая сообщает его, — *приливной силой*. В точке A приливное ускорение направлено к Луне, а в точке B — в противоположную от Луны сторону. В точках C и D приливные ускорения направлены к центру Земли, в других точках водной поверхности — по касательной к ней, как показано на рисунке 14.9. Таким образом, вода, испытывая действие приливной силы, будет оттекать из точек C и D (отлив) и собираться в точках A и B (прилив).

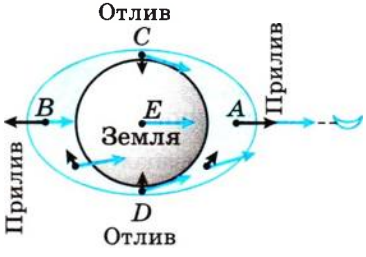


Рис. 14.9

Во время приливов уровень воды плавно нарастает, достигая наибольшего значения, а затем постепенно снижается до низшего уровня. Вследствие вращения Земли приливные

выступы образуются в каждый следующий момент уже в новых точках земной поверхности. Максимумы подъёмов воды чередуются через определённые промежутки времени, близкие к 12 ч 26 мин. Таким образом, в каждом месте океанского берега за 24 ч 52 мин происходят два прилива и два отлива. Максимальные приливы происходят, когда Луна находится выше всего над горизонтом и ниже всего под горизонтом. Из-за движения Луны вокруг Земли Луна проходит выше всего над горизонтом как раз через 24 ч 52 мин. Это указывает на взаимосвязь между Луной и приливами. Действительно, явление приливов вызывается притяжением Луны.

Если вы живёте в приморском районе, измерьте промежутки времени между приливами и отливами и сравните с положениями Луны над горизонтом.

Солнце, как и Луна, также вызывает приливы. Несмотря на большую удалённость от Земли, но благодаря большой массе Солнца приливы, которые оно вызывает, всего в 2,5 раза меньше лунных. Заметим, что данное объяснение приливов не совсем точно, так как мы не учитывали, что вода обладает массой и соответственно инертностью, что вызывает запаздывание прилива относительно момента, когда Луна или Солнце находятся в зените.

Важно Во время полнолуний и новолуний лунные и солнечные приливы складываются и наблюдаются самые большие приливы.

Напротив, когда Луна находится в фазе первой или последней четверти, во время лунного прилива будет солнечный отлив; действие Солнца вычитается из действия Луны, и приливы бывают существенно меньшими.

Интересно Во время Второй мировой войны высадка морского десанта союзников 6 июля 1944 г. в Нормандии была приурочена к самому большому приливу во время полнолуния.

Фазы Луны. Синодический месяц. Затмения. Приливы — Найти

1. В какой фазе находится Луна во время полных солнечных затмений?
2. Что увидит космонавт на Луне, если на Земле в это время наблюдается лунное затмение?
3. Что такое синодический месяц?

§101 ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПЛАНЕТ И МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Оказывает ли свет давление на освещённые предметы?
Как определяются работа силы трения и изменение внутренней энергии тела?



Рис. 14.10

По современным данным, вокруг Солнца обращаются восемь крупных шарообразных тел, называемых *планетами* (рис. 14.10). Наряду с планетами и их спутниками вокруг Солнца обращаются *планеты-карлики*, сотни тысяч малых планет, называемых *астероидами*, кометы, твёрдые частицы — *метеороиды* и частички пыли. Масса Солнца в 740 раз превышает массу всех планет, благодаря этому оно своим сильным гравитационным полем удерживает планеты около себя. Температура поверхности Солнца составляет около 6000 К, поэтому оно излучает собственный свет, а планеты освещаются Солнцем и светят отражённым светом.

Планеты вращаются вокруг Солнца в том же направлении, что и Солнце вокруг своей оси, и удалены от Солнца в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун (по современным данным, Плутон относят к планетам-карликам). По физическим характеристикам их объединяют в две группы, разграниченные в пространстве поясом астероидов.

Планеты земной группы.

Важно

Планеты, движущиеся *внутри пояса астероидов* (Меркурий, Венера, Земля и Марс), принадлежат к **земной группе.**

Все эти планеты, небольшие по размерам и массам (самая крупная из них — Земля), имеют твёрдую поверхность, сравнительно высокую среднюю плотность, близкую к плотности Земли (5,5 г/см^3), и обладают атмосферами (кроме Меркурия).

Важно Планеты земной группы состоят в основном из тяжёлых (тяжелее гелия) химических элементов.

Наличие атмосферы, содержащей наряду с другими газами углекислый газ, привело к тому, что на поверхности Венеры и Земли действует парниковый эффект. Углекислый газ, а у Земли и водяные пары пропускают солнечный свет, который нагревает поверхность и атмосферу. Нагретая поверхность испускает инфракрасные лучи, но эти лучи углекислый газ не пропускает наружу в космическое пространство, и поверхность не охлаждается. Тепло скапливается у поверхности. Так, температура поверхности Венеры составляет почти 500 °С.

Интересно Если бы атмосфера Земли не содержала углекислый газ и водяной пар, то температура её поверхности была бы на 40° ниже существующей и был бы ледниковый период.

Планеты-гиганты.

Важно Планеты, движущиеся *за поясом астероидов*, образуют группу **планет-гигантов**, возглавляемую Юпитером — самой крупной и массивной планетой Солнечной системы. К этой группе относятся также Сатурн, Уран и Нептун.

Планеты-гиганты обладают значительными размерами, малой средней плотностью (самая большая плотность у Нептуна — 1,66 г/см^3, самая малая у Сатурна — 0,7 г/см^3), быстрым вращением, протяжёнными гелиево-водородными атмосферами с небольшим содержанием аммиака и метана и, по-видимому, не имеют твёрдой поверхности.

Важно Планеты-гиганты состоят из лёгких химических элементов, в основном из водорода и гелия.

Планеты-гиганты окружены кольцами, состоящими из мелких твёрдых частиц. Вокруг планет-гигантов обращаются десятки спутников. Только у Меркурия и Венеры отсутствуют спутники. Крупные спутники (такие, как Луна у Земли) имеют шарообразную форму, а мелкие (как Фобос и Деймос у Марса) — неправильную форму, свойственную большинству астероидов.



Проведите с помощью телескопа или бинокля вечерние наблюдения фаз Венеры, спутников Юпитера и колец Сатурна.

С помощью телескопа изучите рельеф Луны. Найдите кратеры, горы, моря.

Астероиды. В начале XIX в. между орбитами Марса и Юпитера были обнаружены звёздообразные тела — *астероиды*.

Запомни **Астероиды** — небольшие бесформенные тела, которые движутся вокруг Солнца на расстояниях 2,3—3,3 а. е. (1 а. е. = 150 · 10^6 км).

Самый крупный из них — Паллада — имеет в поперечнике около 580 км. Сейчас известно несколько тысяч астероидов, некоторые из них имеют

орбиты, пересекающие орбиту Земли. Общая масса всех астероидов небольшая, существенно меньше массы любой планеты.

Кометы. Яркие кометы появляются сравнительно редко, в среднем одна комета за 10—15 лет. Слабые же по блеску кометы появляются часто (на фотографиях звёздного неба ежегодно обнаруживают несколько комет).

Большинство комет входит в состав нашей Солнечной системы. Под действием притяжения Солнца они, как и планеты, обращаются вокруг него по вытянутым эллиптическим орбитам (рис. 14.11). Самой известной кометой является комета Галлея (см. рис. VIII цветной вклейки), названная так в честь первого исследователя комет, который предсказал очередное появление этой кометы. Она движется по очень вытянутой эллиптической орбите (a = 18 а. е. и e = 0,967) с периодом 76 лет. В перигелии она сближается с Солнцем до расстояния 0,59 а. е. (заходит внутрь орбиты Венеры), а в афелии удаляется до 35,3 а. е. за орбиту Нептуна. Последний раз комета появилась в 1986 г. В момент её прохождения вблизи Солнца для её изучения был осуществлён полёт четырёх космических аппаратов, два из которых советские «Вега-1» и «Вега-2».

Интересно Слово «комета» происходит от греческого слова kometes — волосатый, косматый.



Рис. 14.11

Фотографирование ядра кометы Галлея советскими космическими станциями с расстояния около 8000 км показало, что оно имеет неправильную форму с размерами примерно 16 × 18 × 8 км (см. рис. VII цветной вклейки). В следующий раз её можно увидеть в 2062 г.

На больших расстояниях от Солнца кометы представляют собой глыбы твёрдого вещества из льда, застывших газов и пыли, вмороженных частиц метеорного вещества. При приближении к Солнцу лёд начинает таять и испаряться, вокруг ядра кометы, начальные размеры которого не превышают десятков километров, образуется протяжённая оболочка — *кома*. Под действием давления солнечного света и солнечного ветра часть газов комы отталкивается в сторону, противоположную Солнцу, образуя *хвост* кометы. Массы комет оцениваются в 10^{15}—10^{18} кг.

В конце концов комета теряет вещество и распадается на части.

Метеоры и метеориты.

Запомни **Метеоры** — это вспыхивающие в земной атмосфере мельчайшие твёрдые частицы, которые вторгаются в неё извне с огромной скоростью.

Метеоры часто называют падающими звёздами. В межпланетном пространстве хаотично движется с различными скоростями множество таких

частиц. Массы подавляющего их большинства измеряются десятыми и тысячными долями грамма, в редких случаях — несколькими граммами. Если в атмосферу влетает частица со скоростью свыше 30 км/с, то из-за трения о воздух она быстро раскаляется, вспыхивает и порождает метеор. Чем больше масса и скорость частицы, тем ярче метеорная вспышка. В среднем по всему небу за 1 ч появляются 5—6 ярких метеоров.

Интересно

Слово «метеор» происходит от греческого слова meteora — парящий в воздухе.

Помимо отдельных метеорных частиц, вокруг Солнца движутся целые их рои, называемые *метеорными потоками*. Они порождены распадающимися или уже распавшимися кометами. Каждый метеорный рой обращается вокруг Солнца с постоянным периодом, равным периоду обращения породившей его кометы, и многие из них в определённые дни года встречаются с Землёй. В эти дни число метеоров значительно возрастает, а если метеорный рой компактный, то наблюдаются метеорные, или звёздные, дожди, когда в одной ограниченной области неба за одну минуту вспыхивают сотни метеоров. Так, в середине августа (в ночь с 12-го на 13-е) можно наблюдать поток Персеид, а в апреле (в ночь с 20-го на 21-е) — поток Лирид.

Многие метеорные потоки связаны с кометами. Так, метеорный поток, исходящий из созвездия Ориона (Ориониды), связан с кометой Галлея, а метеорный поток Андромениды — с распавшейся кометой Биэлы.

Запомни

Метеориты — это метеороиды размерами от сантиметров до десятков метров, двигавшиеся в межпланетном пространстве и затем упавшие на Землю.

По химическому составу метеориты подразделяют на три группы: каменные, железокаменные и железные. Самый крупный железный метеорит — Гоба — найден на территории Намибии: он имеет размеры 3 × 3 × 1 м, а массу 60 т.

На месте падения крупных метеоритов образуются метеоритные кратеры значительных размеров. Такие кратеры обнаружены в Аризоне (США), Канаде, на Таймыре (Россия) и в других местах. У Аризонского метеоритного кратера диаметр 1207 м, глубина 174 м, а высота окружающего его вала составляет от 40 до 50 м. На Луне также существуют кратеры, которые можно наблюдать даже в школьный телескоп или подзорную трубу.

На других планетах и их спутниках также обнаружены кратеры метеоритного происхождения. Крупные метеориты могут образовывать кратеры диаметром в несколько десятков километров.

Планеты земной группы. Планеты-гиганты. Планеты-карлики Найти

Астероиды. Кометы. Метеоры. Метеориты Найти

1. К чему приводит изменение количества углекислого газа (и водяных паров) в атмосферах планет земной группы?
2. Почему температура поверхности Венеры столь высокая?

3. Почему планеты-гиганты имеют более сплюснутую форму, чем планеты земной группы?
4. Почему хвост кометы направлен от Солнца?
5. Почему на больших расстояниях от Солнца у комет нет хвостов?
6. Что такое астероиды?
7. Чем отличаются метеоры от метеоритов?

1. Самая большая планета Солнечной системы
1) Марс 2) Земля 3) Уран 4) Юпитер

2. Самая маленькая планета Солнечной системы
1) Нептун 2) Марс 3) Меркурий 4) Сатурн

ЕГЭ

Повторите материал главы 14 по следующему плану:

1. Выпишите основные астрономические понятия и величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин, используемые в астрономии, и их связь с основными единицами СИ.
4. Классифицируйте планеты и малые тела Солнечной системы.
5. Опишите основные астрономические явления, о которых упоминалось в этой главе.

«Солнечная система»

1. Объяснение петлеобразного движения планет в гелиоцентрической системе мира.
2. Созвездие Андромеды (Ориона, Персея, ...), мифология.
3. Исследования Луны космическими аппаратами.
4. Природа крупных кратеров и морей на Луне.
5. Солнечные и лунные затмения.
6. Космические исследования планеты Венера.
7. Физическая природа планет земной группы и планет-гигантов.
8. Образование кратеров на поверхности планет и их спутников.

1. «Созвездия зимнего неба: история их происхождения, мифология, изображения в древних атласах»

2. «Экспедиция на Марс (траектория полёта, продолжительность, жизнеобеспечение космонавтов)»

ГЛАВА 15 СОЛНЦЕ И ЗВЁЗДЫ

В этой главе мы рассмотрим строение Солнца и звёзд, а также их основные характеристики.

§102 СОЛНЦЕ

Как с помощью третьего закона Кеплера определить массу Солнца? Вспомните, что такое плотность потока электромагнитного излучения, что такое плазма.

Основные характеристики Солнца. Солнце лишь одна из бесчисленного множества звёзд, существующих в природе. Благодаря близости Земли к Солнцу мы имеем возможность изучать происходящие на нём процессы и по ним судить об аналогичных процессах в звёздах, непосредственно не видимых из-за колоссального их удаления.

Шарообразное Солнце представляется нам светящимся диском.

Запомни Видимая поверхность Солнца называется **фотосферой**, её радиус считается **радиусом Солнца**.

На среднем расстоянии от Солнца до Земли (a_0 = 1 а. е.) угол, под которым виден радиус фотосферы, $\theta = 16'$, поэтому линейный радиус Солнца

$$R_\odot = a_0 \cdot \sin\theta = 1{,}5 \cdot 10^8 \text{ км} \cdot 0{,}00465 = 700\,000 \text{ км},$$

что в 109 раз превышает радиус Земли, который примерно равен:

$$R_\oplus \approx 6400 \text{ км}.$$

Масса Солнца определяется по движению Земли вокруг Солнца и третьему обобщённому закону Кеплера, согласно которому (если пренебречь массой планеты по сравнению с массой Солнца $M_\odot$)

$$M_\odot = \frac{a^3 \cdot 4\pi^2}{GT^2} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{11})^3 \cdot 4 \cdot 3{,}14^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot (3{,}2 \cdot 10^7)^2} \text{ (кг)} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}.$$

В этой формуле $a = a_0$, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м^3/кг $\cdot$ с^2 — гравитационная постоянная; $T = T_0 = 365{,}25$ сут. — период обращения Земли вокруг Солнца. Так как 1 сут. = 1440 мин = 86 400 с, то $T_0 = 365{,}25 \cdot 86\,400 = 3{,}2 \cdot 10^7$ с.

Масса Земли для сравнения

$$M_\oplus \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

Ускорение свободного падения на поверхности Солнца в 28 раз больше, чем на поверхности Земли, и равно 274 м/с^2.

На фотографических снимках Солнца часто видны тёмные пятна, возникающие в его фотосфере. Если в течение нескольких дней следить за пятнами, то можно заметить их перемещение, что указывает на вращение Солнца вокруг оси. Такие наблюдения показали, что Солнце вращается не как твёрдое тело. Период его обращения вокруг оси вблизи экватора составляет 25 сут., а вблизи полюса — 30 сут. Линейная скорость вращения точки на экваторе Солнца составляет 2 км/с.

Измерение освещённости, которую создаёт Солнце на Земле, показало, что на земную поверхность площадью 1 м^2, расположенную перпендикулярно к солнечным лучам, ежесекундно поступает от Солнца определённая энергия, равная 1370 Дж.

Запомни Энергия, ежесекундно падающая от Солнца на земную поверхность площадью 1 м^2, расположенную перпендикулярно к солнечным лучам, называется **солнечной постоянной:** $E_\odot$ = 1,37 кВт/м^2.

Светимость Солнца $L_\odot$ — это мощность солнечного излучения — энергия, излучаемая Солнцем за 1 с со всей его поверхности.

Для того чтобы определить светимость, достаточно умножить солнечную постоянную на площадь поверхности сферы, в центре которой находится Солнце и радиус которой равен расстоянию от Земли до Солнца: $a_0 = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м. Так как площадь поверхности сферы радиусом a_0 равна $S = 4\pi a_0^2$, где $\pi = 3{,}14$, то светимость Солнца

$$L_\odot = SE_\odot = 4 \cdot 3{,}14 \cdot (1{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{м})^2 \cdot 1{,}37 \cdot 10^3\ \text{Вт/м}^2 = 4 \cdot 10^{26}\ \text{Вт}.$$

На долю Земли приходится всего лишь одна двухсотмиллиардная доля энергии, излучаемой Солнцем, но и её достаточно для расцвета и многообразия жизни на нашей планете.

Судить о температуре Солнца (и звёзд) мы можем только по его (их) излучению. Солнце является источником излучения различных длин волн — от длинноволнового радиоизлучения до коротковолнового рентгеновского и гамма-излучений. На рисунке XIII цветной вклейки показан наблюдаемый спектр Солнца в видимом диапазоне длин волн, полученный с помощью спектрографа. На нём мы видим, что на фоне непрерывного спектра (цветная радуга) видны линии поглощения различных химических элементов.

По наличию спектральных линий астрономы определяют химический состав Солнца. Оказалось, что Солнце почти на 71 % состоит из водорода, 27 % составляет гелий, на остальные химические элементы приходится около 2 % массы.

Астрономы предполагают, что излучение Солнца близко по своим характеристикам к излучению абсолютно чёрного тела, законы излучения которого хорошо известны.

Заклейте зеркало бумагой, оставляя небольшое отверстие диаметром 0,5 см, и направьте зайчик от Солнца на белый лист бумаги. Измерьте диаметр изображения Солнца d (в мм) и расстояние l (в мм) от экрана до зеркала. Вычислите реальный диаметр Солнца по формуле $D = \frac{d}{l} a_0$, где a_0 — расстояние от Земли до Солнца в километрах.

Закон Вина

Длина волны λ_{max}, на которую приходится максимум излучения нагретого тела, связана с температурой T формулой

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{T}. \qquad (15.1)$$

Максимум излучения Солнца приходится на длину волны $\lambda_{max} = 4{,}8 \cdot 10^{-7}$ м, следовательно, температура Солнца должна быть

$$T_\odot = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{4{,}8 \cdot 10^{-7}} = 6000 \text{ К}.$$

Другой метод оценки температуры основан на *законе Стефана—Больцмана*.

Закон Стефана—Больцмана

Мощность излучения i с квадратного метра поверхности абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры T, т. е.

$$i = \sigma T^4, \qquad (15.2)$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$ К) — постоянная величина.

Так как площадь солнечной поверхности $S = 4\pi R_\odot^2$, то светимость Солнца

$$L_\odot = iS = \sigma T^4 4\pi R_\odot^2 = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}. \qquad (15.3)$$

Отсюда следует, что температура солнечной фотосферы $T_\odot = \sqrt[4]{\frac{L_\odot}{\sigma 4\pi R^2}}$. Подставляя в эту формулу указанные выше значения, получаем, что $T_\odot = 5800$ К, что мало отличается от результата, полученного по закону Вина. Обычно среднюю температуру солнечной фотосферы считают близкой к 6000 К.

Строение солнечной атмосферы. Все виды излучений, которые мы воспринимаем от Солнца, образуются в его самых верхних слоях, в атмосфере. Самый глубокий и плотный слой атмосферы — фотосфера — имеет толщину около 200 км, плотность вещества в ней составляет 10^{-4} кг/м^3, что значительно меньше плотности земной атмосферы. Несмотря на малое значение толщины и плотности, фотосфера непрозрачна для всех видов излучений, образующихся в более глубоких слоях Солнца, поэтому мы не можем заглянуть в его подфотосферные слои.

Запомни

Зернистая структура, которая видна в фотосфере, получила название **грануляции** (см. рис. VI на цветной вклейке).

Характерные угловые размеры гранул, напоминающих по виду рисовые зёрна, составляют 1—2′, но линейные их размеры достигают тысяч километров и более. Наблюдения показывают, что грануляция находится в непрерывном движении и изменении. Гранулы живут от 5 до 10 мин, а потом на их месте появляются новые. В центре более яркой и горячей части гранулы

Спроецируйте изображение Солнца в телескопе на белый экран и зарисуйте его. Повторите наблюдения через несколько дней. Убедитесь по изменению положения пятен во вращении Солнца. Подсчитайте полное число пятен на Солнце и убедитесь в изменении их количества.

происходит подъём из-под фотосферы более горячего вещества и опускание под фотосферу более тёмного и холодного вещества, окаймляющего гранулу. Скорость подъёма и опускания газа составляет около 1 км/с, а разница между температурой горячего и холодного вещества близка к 300 К. Таким образом, грануляция на Солнце указывает на то, что энергия в фотосферу поступает из более глубоких и горячих слоёв Солнца путём конвекции.

На ярком фоне фотосферы наблюдаются *тёмные пятна*. На рисунке VI цветной вклейки показан участок фотосферы с пятном. Размеры солнечных пятен могут превышать 10 000 км! Такие крупные пятна хорошо видны даже невооружённым глазом (конечно, только сквозь тёмный светофильтр).

На фоне ослепительно яркой фотосферы пятно кажется нам чёрным. Однако измерения показали, что яркость пятен в 5—10 раз меньше яркости окружающей фотосферы, а их реальный цвет — красноватый. Таким образом, температура пятен около 4000 К.

Наблюдения показали наличие сильного магнитного поля в пятнах. В некоторых пятнах магнитная индукция достигает 0,5 Тл, в то время как в среднем в фотосфере она составляет 10^{-4}—10^{-5} Тл.

На рисунке IX цветной вклейки показана фотография Солнца, полученная во время полного солнечного затмения. На снимке хорошо видна внешняя часть солнечной атмосферы — *корона*, имеющая вид лучистого жемчужного сияния, яркость которого в миллион раз меньше яркости фотосферы. Корона прослеживается до расстояний в десять радиусов Солнца и более.

Солнечная корона нагрета до температуры около $2 \cdot 10^6$ К. При такой температуре вещество короны представляет собой полностью ионизованную плазму, излучающую в рентгеновском диапазоне. И действительно, при наблюдениях в рентгеновские телескопы, которые установлены на космических астрономических обсерваториях за пределами земной атмосферы, солнечная корона представляется в полной красе, в то время как поверхность Солнца (фотосфера) практически не видна.

Во время полных солнечных затмений на краю Солнца, во внутренних слоях солнечной короны, наблюдаются *протуберанцы*.

Запомни

Протуберанцы — это струи горячего вещества Солнца, имеющие вид выступов и фонтанов.

Определите из рисунка IX цветной вклейки высоту протуберанца над фотосферой.

Некоторые из них — спокойные протуберанцы — в течение многих часов висят над солнечной поверхностью, другие — *эруптивные* (взрывные) — внезапно с огромной скоростью взлетают над поверхностью, быстро поднимаются до высоты в десятки и даже сотни тысяч километров и так же быстро падают вниз.

Из короны в межпланетное пространство истекает непрерывный поток частиц (протонов, ядер гелия, ионов, электронов), называемый *солнечным ветром*. Частицы солнечного ветра покидают солнечную корону со скоростью около 800 км/с, поэтому солнечное притяжение не может их удержать. Вблизи Земли скорость солнечного ветра достигает 500 км/с.

Солнечная активность. На рисунке 15.1 показано наблюдаемое изменение числа пятен на Солнце с начала XVII в. Когда наблюдается максимальное число пятен, то говорят о максимуме солнечной активности. В годы максимума солнечной активности значительно возрастает число мощных протуберанцев, в такт с солнечной активностью меняется и форма солнечной короны.

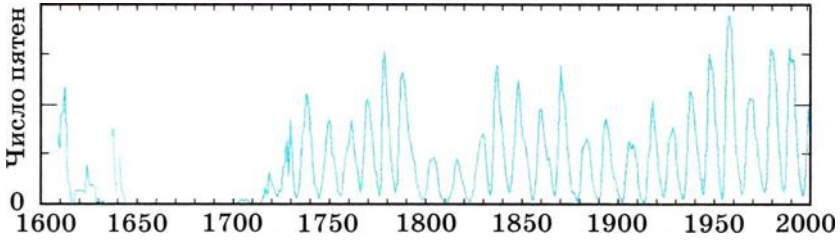


Рис. 15.1

Важно

Цикл солнечной активности длится около 11 лет.

Одним из самых значительных проявлений солнечной активности являются солнечные вспышки, во время которых выделяется колоссальная энергия — в течение десятка минут выделяется энергия до 10^{25} Дж. В результате наблюдений со спутников было установлено, что во время солнечных вспышек происходит резкое усиление ультрафиолетового излучения, появляются мощные рентгеновское и гамма-излучения. Датчики быстрых заряженных частиц, установленные на искусственных спутниках, показали, что при мощных солнечных вспышках в межпланетное пространство выбрасываются с огромными скоростями, иногда доходящими до 100 000 км/с, мириады частиц, обладающих большой кинетической энергией и получивших название *солнечных космических лучей*. Их основной состав — ядра атомов водорода, гелия, а также электроны.

Вспышки и другие проявления солнечной активности оказывают значительное влияние на физические условия в земной атмосфере и околоземном космическом пространстве и, как следствие, на биологические явления.

Фотосфера. Солнечная постоянная. Пятна. Солнечная активность Найти

1. Какую освещённость создаёт Солнце на поверхности Земли?
2. Что указывает на существование конвекции внутри Солнца?
3. Чему равен период солнечной активности и как она себя проявляет?

§103 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЁЗД

Вспомните что такое, как определяется и чему равна светимость Солнца.
Как, используя третий обобщённый закон Кеплера, можно определять массы небесных тел?
При каких температурах происходят термоядерные реакции?

Диаграмма «спектр — светимость». Как и Солнце, звёзды освещают Землю, но из-за огромного расстояния до них освещённость, которую они создают на Земле, на много порядков меньше солнечной. По этой причине и возникают технические проблемы при измерениях освещённости от звёзд. Астрономы строят гигантские телескопы, чтобы уловить слабые излучения звёзд. Чем больше диаметр объектива телескопа, тем более слабые звёзды можно с его помощью исследовать. Измерения показали, что, например, Полярная звезда создаёт освещённость на поверхности Земли $E = 3{,}8 \cdot 10^{-9}$ Вт/м^2, что в 370 млрд раз меньше освещённости, создаваемой Солнцем. Расстояние до Полярной звезды составляет 200 пк, или около 650 св. лет ($r = 6 \cdot 10^{18}$ м). Поэтому светимость Полярной звезды

$$L_{\text{П}} = 4\pi r^2 E = 4 \cdot 3{,}14 \cdot (6 \cdot 10^{18}\ \text{м})^2 \cdot 3{,}8 \cdot 10^{-9}\ \text{Вт/м}^2 = 9{,}1 \cdot 10^{29}\ \text{Вт} = 4600 L_{\odot}.$$

Как видим, несмотря на малую видимую яркость этой звезды, её светимость в 4600 раз превышает солнечную.

Измерения показали, что среди звёзд встречаются звёзды в сотни тысяч раз более мощные, чем Солнце, и звёзды со светимостями, в десятки тысяч раз меньшими, чем у Солнца.

Важно

Измерения температур поверхности звёзд показали, что температура поверхности звезды определяет её видимый цвет и наличие спектральных линий поглощения тех или иных химических элементов в её спектре.

Так, Сириус сияет белым цветом и его температура равна почти 10 000 К. Звезда Бетельгейзе (α Ориона) имеет красный цвет и температуру поверхности около 3500 К. Солнце жёлтого цвета и имеет температуру 6000 К.

По температуре, цвету и виду спектра все звёзды разбиты на спектральные классы, которые обозначаются буквами O, B, A, F, G, K, M. Спектральная классификация звёзд приведена в таблице.

Спектральная классификация звёзд

Спектральный класс	Цвет	Температура, К	Примеры звёзд
O	Голубой	30 000	Беллатрикс (γ Ориона)
B	Бело-голубой	20 000	Регул (α Льва)
A	Белый	10 000	Сириус

Продолжение

Спектральный класс	Цвет	Температура, К	Примеры звёзд
F	Жёлто-белый	8000	Альтаир (α Орла)
G	Жёлтый	6000	Солнце
K	Оранжевый	5000	Альдебаран (α Тельца)
M	Красный	3500	Бетельгейзе (α Ориона)

Важно Между спектральным классом и светимостями звёзд имеется связь, которая представлена в виде диаграммы «спектр — светимость (в светимостях Солнца)» (рис. 15.2).

Эту диаграмму называют *диаграммой Герцшпрунга—Рессела* в честь двух астрономов — Э. Герцшпрунга и Г. Рессела, построивших её. На диаграмме чётко выделяются четыре группы звёзд.

Главная последовательность. В эту группу входит большинство звёзд. К звёздам главной последовательности относится и наше Солнце. Плотности звёзд главной последовательности сравнимы с солнечной плотностью.

Красные гиганты. К этой группе в основном относятся звёзды красного цвета с радиусами, в десятки раз превышающими солнечный, например звезда Арктур (α Волопаса), радиус которой превышает солнечный в 25 раз, а светимость — в 140 раз.

Сверхгиганты. Это звёзды со светимостями, в десятки и сотни тысяч раз превышающими солнечную. Радиусы этих звёзд в сотни раз превышают радиус Солнца. К сверхгигантам красного цвета относится звезда Бетельгейзе (α Ориона). При массе примерно в 15 раз больше солнечной её радиус превышает солнечный почти в 1000 раз. Средняя плотность этой звезды составляет всего $2 \cdot 10^{-11}$ кг/м^3, что более чем в 1 000 000 раз меньше плотности воздуха.

Белые карлики. Это группа звёзд в основном белого цвета

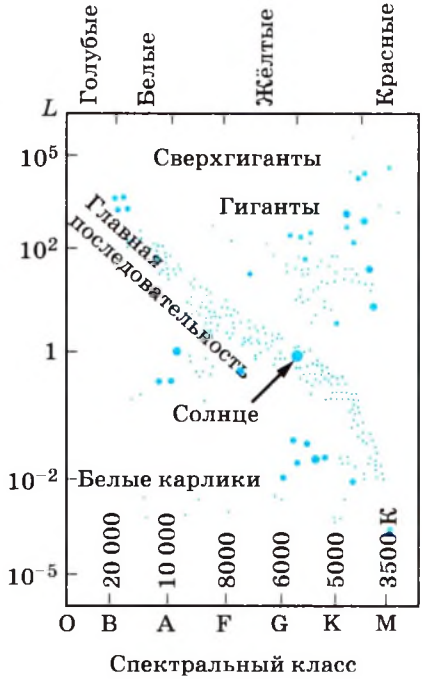


Рис. 15.2

Как, не приставляя термометра к звёздам, астрономы узнают их температуру? Как они определили, что звезда Бетельгейзе (α Ориона) имеет температуру 3500 К?

со светимостями в сотни и тысячи раз меньше солнечной. Они расположены слева внизу диаграммы. Эти звёзды имеют радиусы почти в сто раз меньше солнечного и по размерам сравнимы с планетами. Примером белого карлика служит звезда Сириус В — спутник Сириуса. При массе, почти равной солнечной, и размере, в 2,5 раза большем, чем размер Земли, эта звезда имеет гигантскую среднюю плотность — $\rho = 3 \cdot 10^8$ кг/м^3.

Чтобы понять, чем объясняются наблюдаемые различия звёзд разных групп, вспомним связь между светимостью, температурой и радиусом звезды, которую мы использовали для определения температуры Солнца (см. формулу (15.3)).

Проведите с помощью телескопа или бинокля вечерние наблюдения. Найдите двойную звезду Альбирео (α Лебедя), определите цвет и температуру компонент.

Определите цвет и температуру звёзд Бетельгейзе (α Ориона) и Сириуса (α Большого Пса).

Сравним две звезды спектрального класса К, одна — главной последовательности (ГП), другая — красный гигант (КГ). У них одинаковая температура — $T = 4500$ К, а светимости различаются в тысячу раз:

$$\frac{L_{КГ}}{L_{ГП}} = \left(\frac{R_{КГ}}{R_{ГП}}\right)^2, \quad \frac{R_{КГ}}{R_{ГП}} = \left(\frac{L_{КГ}}{L_{ГП}}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 30,$$

т. е. красные гиганты в десятки раз больше по размерам, чем звёзды главной последовательности.

Массы звёзд удалось измерить только у звёзд, входящих в состав двойных систем. И они определялись по параметрам орбит звёзд и периоду их обращения вокруг друг друга с использованием третьего обобщённого закона Кеплера. Оказалось, что массы всех звёзд лежат в пределах

$$0{,}05M_\odot \leqslant M \leqslant 80M_\odot.$$

Важно Для звёзд главной последовательности имеется связь между массой звезды и её светимостью, т. е. чем больше масса звезды, тем больше её светимость:

$$L_з \approx L_\odot \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4. \qquad (15.4)$$

Так, звезда спектрального класса В имеет массу $M \approx 20M_\odot$ и её светимость почти в 100 000 раз больше солнечной.

Источник энергии Солнца и звёзд. По современным представлениям источником энергии, поддерживающим излучение Солнца и звёзд, служит ядерная энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях образования (синтеза) ядер атомов гелия из ядер атомов водорода. При реакции синтеза из четырёх ядер атомов водорода (четырёх протонов) образуется ядро атома гелия, при этом выделяется энергия связи $\Delta E = 4{,}8 \cdot 10^{-12}$ Дж и образуются две элементарные частицы нейтрино и два позитрона:

$$4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2e^+ + 2\nu + \Delta E.$$

Спектральный класс Веги (α Лиры) А, светимость $L = 85L_\odot$, а Капелла (α Возничего) имеет спектральный класс К, светимость $L = 220L_\odot$. К каким группам звёзд они относятся?

Для протекания ядерных реакций необходима температура выше нескольких миллионов кельвинов, при которой участвующие в реакции протоны с одинаковыми зарядами смогли бы получить достаточную энергию для взаимного сближения, преодоления электрических сил отталкивания и слияния в одно новое ядро. В результате термоядерных реакций синтеза из водорода массой 1 кг образуется гелий массой 0,99 кг, дефект масс $\Delta m = 0{,}01$ кг и выделяется энергия $q = \Delta mc^2 = 9 \cdot 10^{14}$ Дж.

Теперь можно оценить, на сколько времени хватит у Солнца запасов водорода, чтобы поддерживать наблюдаемое свечение, т. е. время жизни Солнца. Запас ядерной энергии

$$E = M_\odot q = 2 \cdot 10^{30} \cdot 9 \cdot 10^{14} = 1{,}8 \cdot 10^{45} \text{ Дж}.$$

Если поделить этот запас ядерной энергии на светимость Солнца $L_\odot$, то мы получим время жизни Солнца:

$$t_\odot = \frac{E}{L_\odot} = \frac{M_\odot q}{L_\odot} = \frac{1{,}8 \cdot 10^{45} \text{ Дж}}{4 \cdot 10^{26} \text{ Дж}} = 4{,}5 \cdot 10^{18} \text{ с} = 1{,}5 \cdot 10^{11} \text{ лет}.$$

Если учесть, что Солнце состоит по крайней мере на 70 % из водорода и ядерные реакции протекают только в центре, в солнечном ядре, масса которого составляет около $0{,}1M_\odot$ и где температура достаточно высокая для протекания термоядерных реакций, то время жизни Солнца и звёзд, похожих на Солнце, составит $t_\odot \approx 10^{10}$ лет. Солнце, по современным данным, существует уже около 5 млрд лет, так что ему ещё жить и жить!

Важно Термоядерные реакции синтеза гелия из водорода являются источником энергии звёзд главной последовательности.

Спектральный класс. Диаграмма «спектр — светимость» Найти

1. Перечислите основные группы звёзд, которые приведены на диаграмме «спектр — светимость».
2. Чем различаются звёзды одного спектрального класса, но принадлежащие к разным группам?
3. Как по цвету и температуре астрономы определяют радиус звезды?

1. Самую низкую температуру поверхности имеют
1) голубые звёзды
2) жёлтые звёзды
3) красные звёзды
4) белые звёзды

2. Жёлтые звёзды типа Солнца имеют температуру поверхности около
1) 3000 К
2) 6000 К
3) 20 000 К
4) 10 800 К

3. К какой группе звёзд относится Капелла, если её светимость $L = 220L_\odot$, а температура 5000 К?
1) к главной последовательности
2) к красным гигантам
3) к сверхгигантам
4) к белым карликам

§104 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ СОЛНЦА И ЗВЁЗД

Дайте определение термоядерной реакции.
Перечислите основные характеристики протонов, позитронов, нейтронов и нейтрино.

Строение Солнца. Мы не можем непосредственно заглянуть внутрь Солнца, поэтому представление о его внутреннем строении получаем только на основе теоретического анализа, используя наиболее общие законы физики и такие характеристики Солнца, как масса, радиус, светимость.

Важно Солнце не расширяется и не сжимается, оно находится в гидростатическом равновесии, так как силе гравитации, стремящейся сжать Солнце, препятствует сила газового давления изнутри.

Расчёты показывают, что для поддержания гидростатического равновесия температура в центре Солнца должна быть примерно $15 \cdot 10^6$ К. На расстоянии $0{,}7R_\odot$ температура падает до порядка 10^6 К. Плотность вещества в центре Солнца около $1{,}5 \cdot 10^5$ кг/м^3, что более чем в 100 раз выше его средней плотности.

Термоядерные реакции протекают в центральной области Солнца радиусом, примерно равным $0{,}3R_\odot$.

Запомни Центральная область Солнца, в которой протекают термоядерные реакции, называется **ядром**.

Интересно Мощность энерговыделения в звезде при термоядерных реакциях равна её светимости — мощности её излучения с поверхности.

Вне ядра температура недостаточна для протекания термоядерных реакций.

Энергия, выделившаяся в ядре Солнца, переносится наружу, к поверхности, двумя способами: лучистым и конвективным переносами. В первом случае энергия переносится излучением, во втором — при механических движениях нагретых масс вещества.

Почему в недрах звёзд вещество должно иметь высокую температуру?

Лучистый перенос энергии происходит в ядре до расстояний $(0{,}6—0{,}7)R_\odot$ от центра Солнца, далее к поверхности энергия переносится конвекцией. Проявление конвекции наблюдается в виде грануляции в фотосфере. Полное время, которое требуется энергии, выделившейся в ядре, чтобы достигнуть поверхности Солнца, составляет около 10 млн лет. Так что свет и тепло, которые согревают и освещают нашу Землю сегодня, были выработаны в термоядерных реакциях в центре Солнца 10 млн лет назад.

Как вы думаете, что произойдёт со звездой после исчерпания ею всего ядерного горючего?

Понаблюдайте вечером созвездия и найдите их наиболее яркие звёзды. Найдите планеты, которые видны в вашем регионе.

Конечно, астрономы ищут способы заглянуть внутрь Солнца и проверить теоретические представления о его строении. На этом пути им на помощь пришли физики, изучающие элементарные частицы. Дело в том, что при термоядерных реакциях синтеза гелия из водорода наряду с выделением энергии происходит рождение элементарных частиц — нейтрино. В отличие от излучения нейтрино практически не задерживаются веществом. Возникая в недрах Солнца и распространяясь со скоростью, близкой к скорости света, они через 2 с покидают поверхность Солнца и через 8 мин достигают Земли. Для наблюдений солнечных нейтрино был построен специальный нейтринный телескоп, который в течение многолетних наблюдений и зарегистрировал ожидаемый поток нейтрино от Солнца. Эти наблюдения окончательно подтвердили правильность наших теоретических моделей строения Солнца как звезды. Поэтому мы в полной мере можем использовать полученные результаты для разработки моделей других звёзд.

Другие звёзды главной последовательности по строению во многом похожи на Солнце.

Красные гиганты и сверхгиганты. Отличительной особенностью этих звёзд является отсутствие ядерных реакций в самом центре, несмотря на высокие температуры. Ядерные реакции протекают в тонких слоях вокруг плотного центрального ядра. Так как температура звезды уменьшается к поверхности, то в каждом слое идёт определённый тип термоядерных реакций.

В самых внешних слоях ядра, где температура составляет около $15 \cdot 10^6$ К, из водорода образуется гелий; глубже, где температура выше, из гелия образуется углерод; далее из углерода — кислород, и в самых глубоких слоях у очень массивных звёзд при термоядерных реакциях образуется железо.

Почему в обычных звёздах при термоядерных реакциях не образуются химические элементы тяжелее железа?

Итак, в красных гигантах и сверхгигантах формируются слоевые источники энергии и образуется большинство химических элементов вплоть до атомов железа.

Интересно

Такие важные для жизни химические элементы, как углерод и кислород, образуются только в недрах красных гигантов и сверхгигантов.

Белые карлики. Эти звёзды были названы белыми карликами, так как сначала среди них были обнаружены звёзды белого цвета, а значительно позже — жёлтого и других цветов. Размеры их небольшие, всего лишь тысячи и десятки тысяч километров, т. е. они сравнимы с размерами Земли. Но их массы близки к массе Солнца, и поэтому их средняя плотность — сотни килограммов в кубическом сантиметре. Примером такой звезды служит спутник Сириуса, обозначаемый обычно как Сириус В. У этой звезды спектрального класса А с температурой 9000 К диаметр лишь в 2,5 раза превышает диаметр Земли, а масса равна солнечной, так что средняя плотность превышает 100 кг/см^3.

Пульсары и нейтронные звёзды. В 1967 г. астрономы с помощью радиотелескопов обнаружили удивительные радиоисточники, которые испускали периодические импульсы радиоизлучения.

Запомни Астрономические объекты, испускающие периодические импульсы радиоизлучения, получили название **пульсаров.**

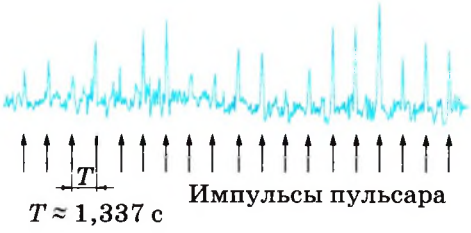


Рис. 15.3

Периоды импульсов пульсаров (пульсаров сейчас известно свыше 400) заключены в пределах от нескольких секунд до 0,001 с. Удивляет высокая стабильность повторения импульсов; так, первый открытый пульсар, который обозначается как PSR 1919, расположенный в неприметном созвездии Лисички, имел период T = 1,33730110168 с (рис. 15.3).

Высокая стабильность периода, доступная только при измерении современными атомными часами, заставила вначале предположить, что астрономы имеют дело с сигналами, посылаемыми внеземными цивилизациями. В конце концов было доказано, что явление пульсации возникает в результате быстрого вращения звёзд, причём период следования импульсов равен периоду вращения нейтронной звезды.

Эти необычные звёзды имеют радиусы около 10 км и массы, сравнимые с солнечной. Плотность нейтронной звезды фантастическая и равна $2 \cdot 10^{17}$ кг/м^3. Она сравнима с плотностью вещества в ядрах атомов. При такой плотности вещество звезды состоит из плотно упакованных нейтронов.

Запомни Звёзды, вещество которых состоит из плотно упакованных нейтронов, получили название **нейтронных звёзд**.

Интересно В нейтронной звезде нейтроны упакованы так плотно, что касаются друг друга.

Чёрные дыры. В конце XVIII в. известный астроном и математик П. Лаплас (1749—1827) привёл простые, основанные на теории тяготения Ньютона рассуждения, которые позволили предсказать существование необычных объектов, получивших название *чёрных дыр*. Известно, что для преодоления притяжения небесного тела массой M и радиусом R нужна вторая космическая (параболическая) скорость $v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R^2}}$. При меньшей скорости тело станет спутником небесного тела, при $v \geqslant v_2$ оно навсегда покинет небесное тело и никогда не вернётся к нему. Для Земли v_2 = 11,2 км/с, на поверхности Солнца v_2 = 617 км/с. На поверхности нейтронной звезды массой, равной массе Солнца, и радиусом около 10 км v_2 = 170 000 км/с и составляет всего около 0,6 скорости света. Как видно из формулы, при радиусе небесного

тела $R = 2GM/c^2$ вторая космическая скорость будет равна скорости света c = 300 000 км/с. При ещё меньших размерах вторая космическая скорость будет превышать скорость света. По этой причине даже свет не сможет покинуть такое небесное тело и дать информацию о процессах, происходящих на его поверхности, нам — далёким наблюдателям.

Запомни

Чёрная дыра — область пространства, в которой гравитационное притяжение настолько сильно, что вторая космическая скорость для находящихся в этой области тел должна была бы превышать скорость света, что невозможно, поэтому ни вещество, ни излучение не могут эту область покинуть.

В настоящее время обнаружены чёрные дыры в составе двойных звёздных систем. Так, в созвездии Лебедя наблюдается тесная двойная система, одна из звёзд, излучающая видимый свет, — обычная звезда спектрального класса B, другая — невидимая звезда малого размера — излучает рентгеновские лучи и имеет массу около $10M_\odot$. Эта невидимая звезда представляет собой чёрную дыру с размерами около 30 км. Рентгеновское излучение испускает не сама чёрная дыра, а нагретый до нескольких миллионов градусов диск, вращающийся вокруг чёрной дыры. Этот диск состоит из вещества, которое чёрная дыра своим тяготением вытягивает из яркой звезды (см. рис. XV на цветной вклейке).

Солнечное нейтрино. Нейтронные звёзды. Чёрные дыры — Найти

1. Равновесие между какими силами обеспечивает устойчивое состояние звезды?
2. Какие процессы теплопроводности переносят энергию от центра Солнца наружу?
3. Какие реакции служат источником энергии Солнца и звёзд?
4. Как устроен красный гигант?
5. Что такое пульсары?

1. Пульсар — это
1) быстро вращающаяся звезда типа Солнца
2) быстро вращающийся красный гигант
3) быстро вращающаяся нейтронная звезда
4) быстро вращающийся белый карлик

2. Какие наблюдения подтвердили протекание термоядерных реакций синтеза гелия из водорода в солнечном ядре?
1) наблюдение солнечного ветра
2) наблюдение солнечных пятен
3) наблюдение рентгеновского излучения Солнца
4) наблюдение потока солнечных нейтрино

3. В каких звёздах образуются химические элементы вплоть до железа?
1) в звёздах спектральных классов O и B главной последовательности
2) в красных гигантах и сверхгигантах
3) в нейтронных звёздах
4) в белых карликах

§105 ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД: РОЖДЕНИЕ, ЖИЗНЬ И СМЕРТЬ ЗВЁЗД

Равновесие каких сил необходимо для стабильного и устойчивого состояния звезды?
Какой вид энергии поддерживает высокую температуру звезды и её равновесие?

В Млечном Пути наблюдаются газопылевые облака. Некоторые из них настолько плотные, что начинают сжиматься под действием собственного тяготения. По мере сжатия плотность и температура облака повышаются, и оно начинает обильно излучать в инфракрасном диапазоне спектра.

Запомни Газопылевое облако на стадии сжатия получило название **протозвезда**.

Важно Когда температура в недрах протозвезды повышается до нескольких миллионов кельвинов, в них начинаются термоядерные реакции превращения водорода в гелий, протозвезда прекращает сжиматься и превращается в обычную звезду главной последовательности.

Продолжительность пребывания звёзд на главной последовательности определяется мощностью излучения звезды (светимостью) и запасами ядерной энергии.

После выгорания водорода в недрах звезды она раздувается и становится красным гигантом или сверхгигантом в зависимости от массы.

Раздувшаяся оболочка звезды небольшой массы уже слабо притягивается её ядром и, постепенно удаляясь от него, образует планетарную туманность (см. рис. X на цветной вклейке).

В дальнейшем звезда типа Солнца сбросит оболочку и будет наблюдаться планетарная туманность, а на месте звезды останется лишь горячее ядро звезды — углеродный белый карлик.

Эволюция массивных звёзд происходит более бурно. В конце своей жизни такая звезда может взорваться *сверхновой звездой*, а её ядро, резко сжавшись, может превратиться в сверхплотный объект — нейтронную звезду или даже чёрную дыру.

Запомни **Сверхновая звезда** — это взрыв, которым ознаменована смерть старой звезды и в течение которого её яркость увеличивается в сотни миллионов и миллиарды раз.

Сверхновые звёзды быстро увеличивают яркость, а затем медленно, в течение нескольких месяцев, угасают и перестают быть видимыми.

Сброшенная оболочка, обогащённая гелием и другими тяжёлыми элементами, образовавшимися в недрах звезды, рассеивается в пространстве и служит материалом для формирования звёзд нового поколения.

На фотографии планетарной туманности «Кольцо» (см. рис. X цветной вклейки) в 1 мм — 2,5″, расстояние до туманности 700 пк, скорость её расширения 19 км/с. Оцените, сколько лет назад красный гигант начал сбрасывать свою оболочку.

Интересно

Во время взрыва сверхновой звезды образуются химические элементы тяжелее железа, которые во время взрыва выбрасываются в космическое пространство. За несколько месяцев выделяется столько энергии, что Солнцу её хватило бы на миллиарды лет.

В частности, есть основания полагать, что Солнце — звезда второго поколения.

Где в космосе в настоящее время происходит образование звёзд?

Важно

Таким образом, в процессе эволюции протозвезда переходит на стадию звезды главной последовательности, а исчерпав водород в ядре, становится красным гигантом.

Звёзды типа Солнца становятся белыми карликами, а звёзды с большими массами взрываются и становятся либо нейтронными звёздами, либо чёрными дырами.

Протозвезда. Планетарная туманность. Сверхновая звезда

1. Чем определяется время жизни звезды главной последовательности?
2. Чем предположительно станет Солнце в конце своей эволюции?
3. Что такое сверхновая звезда?
4. Что может остаться в конце эволюции массивной звезды?

Повторите материал главы 15 по следующему плану:

1. Выпишите основные астрономические понятия и величины и дайте их определения.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Классифицируйте звёзды.
4. Опишите основные явления, связанные с Солнцем и звёздами.

«Солнце и звёзды»

1. Взаимосвязь солнечной активности с процессами в биосфере.
2. Спектры и химический состав звёзд.
3. Необычайные свойства вещества звёзд белых карликов.
4. Построение теоретической модели строения звёзд главной последовательности.
5. Открытие пульсаров.
6. Строение и эволюция Солнца.
7. Сверхновые звёзды.

«Солнечная активность и её влияние на биосферу»

ГЛАВА 16 СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Млечный Путь — наша Галактика — представляет собой гигантскую спиральную галактику, заполненную звёздами, звёздными скоплениями, газом и пылью. Вместе с другими галактиками она является одним из крупнейших образований Вселенной. Узнаем, какие выводы о прошлом, настоящем и будущем видимой Вселенной можно сделать, исследуя галактики.

§106 МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ — НАША ГАЛАКТИКА

Вспомните способ определения масс небесных тел по их движению в гравитационном поле (см. § 99).

При наблюдениях звёздного неба вдали от крупных городов на нём в безлунную ночь хорошо видна широкая светящаяся полоса — *Млечный Путь*. Своё название Млечный Путь получил от древнегреческих мифов. Согласно одному из них Млечный Путь — это молоко, которое будто бы младенец Геркулес пролил, когда его кормила богиня Гера. Действительно, белёсая полоса Млечного Пути напоминает пролитое молоко. Г. Галилей в конце 1610 г., наблюдая Млечный Путь в телескоп, установил, что он состоит из колоссального множества очень слабых звёзд; его звёздная структура хорошо видна даже в обычный бинокль. Млечный Путь тянется серебристой полосой по обоим полушариям, замыкаясь в звёздное кольцо.

Запомни Огромная звёздная система, подавляющее большинство звёзд которой сосредоточено в Млечном Пути, называется **Галактикой**.

Интересно Слово «галактика» происходит от греческого слова galaktikós — молочный.

Солнечная система входит в состав Галактики.

От созвездия Лебедя до созвездия Центавра Млечный Путь выглядит раздвоенным. Отсутствие звёзд в тёмной части Млечного Пути объясняется наличием разреженной тёмной пылевой и газовой материи, концентрирующейся в пространстве к галактической плоскости. Эта материя поглощает и ослабляет свет далёких звёзд.

Газ и пыль в Галактике распределены очень неоднородно. Помимо разреженных пылевых облаков, наблюдаются плотные тёмные облака пыли. Когда эти плотные облака освещены яркими звёздами, они отражают их свет, и тогда мы видим *отражательные туманности*, как те, что видны в скоплении звёзд Плеяды. Если около газопылевого облака имеется горячая звезда, то она возбуждает свечение газа, и тогда мы видим *диффузную туманность*, примером которой служит туманность Ориона (см. рис. XVII на цветной вклейке).

На фотографии туманности Ориона (см. рис. XVII вклейки) в 1 мм — 1,5′, расстояние до туманности 460 пк. Оцените размер и массу туманности, если средняя плотность газа и пыли в ней $\rho = 5 \cdot 10^{-22}$ г/см^3.

Почему горячие звёзды возбуждают свечение диффузных (планетарных) туманностей, а холодные нет?

Примером диффузных туманностей особого типа служат *планетарные туманности*, названные так по тому, как они выглядят в телескоп, — похожие на планетные диски. Ярким примером планетарной туманности является туманность Кольцеобразная в созвездии Лиры (см. рис. X на цветной вклейке). В центре такой расширяющейся туманности находится звезда белый карлик, которая своим ультрафиолетовым излучением возбуждает свечение сброшенной оболочки. Планетарная туманность — «последний выдох» умирающей звезды типа нашего Солнца.

Важно Исследования распределения звёзд, газа и пыли показали, что наш Млечный Путь — Галактика представляет собой плоскую систему, имеющую спиральную структуру (см. рис. XIV на цветной вклейке).

В Галактике около 100 млрд звёзд. Среднее расстояние между звёздами в Галактике около 5 св. лет. Но в центре Галактики, в её ядре, плотность звёзд значительно выше и расстояния между звёздами в сотни раз меньше, чем среднее. Центр Галактики, который расположен в созвездии Стрельца, скрыт от нас большим количеством газа и пыли, поглощающих свет звёзд. Но в инфракрасном диапазоне, излучение которого газ и пыль поглощают плохо, ядро Галактики видно хорошо.

Мы находимся внутри Галактики, поэтому нам трудно представить её внешний вид, но во Вселенной есть много других похожих галактик, и по ним мы можем судить о нашем Млечном Пути. На рисунках XI и XII цветной вклейки представлены спиральная галактика Водоворот и галактика Сомбреро, видимая с ребра. Тёмная полоса обусловлена наличием газа и пыли, которые концентрируются в плоскости галактики, как и в Млечном Пути.

Галактика вращается.

Важно Солнце, находящееся на расстоянии около 8 кпк (26 000 св. лет) от центра Галактики, обращается со скоростью около 220 км/с вокруг центра Галактики, совершая один оборот почти за 200 млн лет.

Внутри орбиты Солнца сосредоточена материя, масса которой порядка $10^{11} M_{\odot}$, а полная масса Галактики оценивается в несколько сотен миллиардов солнечных масс.

В настоящее время астрономы тщательно изучают центр нашей Галактики. Именно его свойства, процессы, в нём происходящие, определяют структуру всей Галактики.

Важно Наблюдения за движением отдельных звёзд около центра Галактики показали, что там, в небольшой области с размерами, сравнимыми с размерами Солнечной системы, сосредоточена невидимая материя, масса которой превышает массу Солнца в 2 млн раз. Это указывает на существование в центре Галактики массивной чёрной дыры.

Млечный Путь похож на галактику Сомбреро (см. рис. XII на вклейке). Диаметр этой галактики равен 30 кпк. Оцените толщину газопылевого слоя и диаметр центральной наиболее яркой области, окружающей ядро.

Кроме звёзд, газа и пыли, наша Галактика заполнена космическими лучами (релятивистскими частицами) — протонами, электронами и ядрами атомов других химических элементов, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света. Под действием магнитного поля, которое тоже пронизывает всю Галактику, космические лучи движутся по запутанным траекториям, не покидая Галактику. Релятивистские электроны космических лучей, двигаясь в магнитном поле, излучают радиоволны. Это радиоизлучение астрономы исследуют с помощью радиотелескопов, изучая распределение магнитного поля и космических лучей в Галактике.

Интересно Масса чёрной дыры в центре ядра нашей Галактики около $2 \cdot 10^6 M_\odot$, а её гравитационный радиус примерно $6 \cdot 10^6$ км.

Галактика. Диффузная туманность. Спиральная структура — Найти

1. На фотографии спиральной галактики, видимой с ребра (см. рис. XII цветной вклейки), заметна тёмная полоса, тянущаяся вдоль экватора. Чем это можно объяснить?
2. С какой скоростью обращается Солнце вокруг центра Галактики?
3. Что находится в центре Млечного Пути?
4. На основании каких наблюдений изучают распределение магнитного поля и космических лучей в Галактике?

1. Нашу Галактику можно представить в виде
1) гигантского звёздного шара
2) гигантской сплюснутой системы звёзд
3) гигантской бесформенной совокупности звёзд
4) гигантского сплюснутого диска из звёзд, газа и пыли, образующих спирали

2. Диаметр Галактики равен примерно
1) 10 кпк 2) 100 000 св. лет 3) 1 000 000 а. е. 4) $2 \cdot 10^6$ св. лет

3. Где в Галактике расположено Солнце?
1) в центре Галактики
2) на периферии Галактики
3) на расстоянии $\approx$ 8 кпк от центра
4) на расстоянии $\approx$ 150 000 св. лет от центра

4. Какой массивный объект находится в центре Млечного Пути?
1) плотное скопление звёзд
2) плотное газопылевое облако
3) нет ничего необычного
4) массивная чёрная дыра

§107 ГАЛАКТИКИ

Охарактеризуйте нашу Галактику. Что входит в её состав?

В 20-х гг. XX в. было установлено, что объекты, называвшиеся ранее эллиптическими и спиральными туманностями, находятся за пределами нашей Галактики и являются самостоятельными звёздными системами — галактиками (по числу входящих в них звёзд они не уступают нашей звёздной системе). Изучение строения галактик, их распределения и движения в пространстве имеет решающее значение для понимания законов эволюции всей части наблюдаемой нами Вселенной.

Число галактик, доступных наблюдениям в крупнейшие телескопы, достигает десятков миллиардов.

Важно Несмотря на исключительное многообразие внешнего вида, большинство галактик всё же можно объединить в несколько основных типов: *эллиптические*, *спиральные*, *неправильные*.

Запомни **Эллиптические галактики** — галактики, имеющие вид кругов или эллипсов.

Их яркость плавно уменьшается от центра к периферии. Никакой внутренней структуры у этих галактик нет. Наблюдения показывают, что эти галактики не вращаются, в них очень мало газа и пыли. Массы самых крупных эллиптических галактик достигают $10^{13} M_{\odot}$.

Запомни **Спиральные галактики** — дискообразные вращающиеся галактики, состоящие из ядра, диска и нескольких спиральных рукавов, или ветвей.

У обычных спиральных галактик эти ветви отходят непосредственно от ядра. У *пересечённых* спиральных галактик ядро пересекается по диаметру поперечной полосой — перемычкой (баром). От концов этой перемычки и начинаются спиральные ветви. Так, одна из ближайших к нам звёздных систем, Туманность Андромеды, является спиральной галактикой, а галактика NGC1300 — спиральной галактикой с перемычкой (см. соответственно рис. XIX, XVIII на цветной вклейке). Считается, что наша Галактика похожа на Туманность Андромеды.

Попытайтесь вечером найти созвездие Андромеды и в телескоп рассмотреть знаменитую Туманность Андромеды.

Спиральные галактики вращаются, в них много газа и пыли, которые концентрируются к плоскости галактики в спиральных рукавах, в них много молодых горячих звёзд спектральных классов O и B. Эти звёзды возбуждают свечение диффузных газовых туманностей, разбросанных вместе

с пылевыми облаками вдоль спиральных ветвей. Обилие газово-пылевых облаков и присутствие в них голубых звёзд спектральных классов O и B говорят об активных процессах звёздообразования, происходящих в спиральных рукавах этих галактик. Массы спиральных галактик составляют от 10^{10} до $10^{12} M_\odot$.

Запомни **Неправильные галактики** — галактики неправильной формы, у которых отсутствует чётко выраженное ядро и не обнаружено вращение.

В каких типах галактик возможно рождение новых звёзд? Какие наблюдения подтверждают это?

Примерами неправильных галактик служат Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако — самые близкие к нам галактики, видимые невооружённым глазом в Южном полушарии неба, вблизи Млечного Пути. Эти две галактики являются спутниками нашей Галактики.

Специальный класс галактик представляют *взаимодействующие* галактики. Обычно это двойные галактики, между которыми наблюдаются светлые перемычки, хвосты и т. д.

Активные галактики и квазары.

Запомни **Активные галактики** — галактики, в ядрах которых происходят бурные процессы.

Так, в галактике M87 в созвездии Девы наблюдается яркий выброс вещества со скоростью около 3000 км/с, масса этого выброса составляет примерно $10^5 M_\odot$. Эта галактика оказалась мощным источником радиоизлучения.

Почему радиоизлучение от обычных галактик мало?

Радионаблюдения галактик показали, что большинство из них являются слабыми источниками радиоизлучения, основная доля их излучения приходится на свет звёзд галактики. Однако существуют такие галактики, радиоизлучение которых не только сравнимо, но и значительно превышает их оптическое излучение. Эти галактики получили название *радиогалактик*. На рисунке XVI цветной вклейки показана фотография одной из мощнейших радиогалактик — Центавр А. На фотографии видно, что галактика пересечена мощной полосой поглощающего вещества.

Анализ свойств радиоизлучения показывает, что оно вызывается облаками горячей плазмы, выброшенной из ядра галактики. Облака горячей плазмы движутся со скоростью, близкой к скорости света.

Ещё более мощными источниками радиоизлучения являются *квазары*.

Запомни **Квазары** — квазизвёздные (похожие на звёзды) радиоисточники — компактные ядра галактик, характеризующиеся мощнейшим радиоизлучением.

Примером такого источника является ближайший к нам квазар C273 в созвездии Девы. Его светимость достигает $10^{12} L_\odot$. Светимости большинства квазаров в десятки и сотни раз превышают светимости обычных галактик.

Квазары являются также мощными источниками инфракрасного, рентгеновского и гамма-излучений. А вот размеры квазаров оказались небольшими, около 1 а. е., т. е. сравнимы с размерами Солнечной системы. Тщательные исследования показали, что квазары представляют собой активные ядра галактик, структура которых пока недоступна современной технике наблюдений.

Интересно

За радиоизлучение активных галактик и квазаров ответственны электроны, движущиеся в магнитном поле со скоростями, близкими к скорости света (релятивистские электроны).

По современным представлениям в ядрах галактик, как и в ядре нашей Галактики, находятся массивные чёрные дыры. Поэтому наиболее разработанной моделью квазара является модель с массивной чёрной дырой, расположенной в центре определённого типа галактик с высокой звёздной плотностью. Длительное и мощное энерговыделение может быть полностью объяснено выпадением вещества галактики на чёрную дыру. Масса такой чёрной дыры составляет около $10^8 M_\odot$, а её радиус — $3 \cdot 10^8$ км. Находясь в центре галактики с высокой звёздной плотностью, такая чёрная дыра может захватывать целые звёзды. Для обеспечения наблюдаемой светимости квазаров достаточно, чтобы чёрная дыра захватывала хотя бы одну звезду в год. При высоких плотностях звёзд в ядрах галактик такие частые захваты звёзд чёрной дырой вполне реальны.



Как вы думаете, что чаще происходит — столкновения между звёздами или галактиками?

В обычных галактиках плотности звёзд в ядре невелики, поэтому такие захваты звёзд редки, и мы не видим проявлений большой активности у обычных галактик.

Скопления галактик. Известно, что диаметр нашей Галактики достигает почти 30 кпк (100 000 св. лет), диаметр галактики Андромеды (M31) — 40 кпк. Расстояние от нас до Туманности Андромеды составляет 670 кпк (2 млн св. лет), следовательно, превышает диаметры крупных галактик почти в 20 раз. Среднее же расстояние между звёздами примерно такое же, как между Солнцем и звёздой α Центавра, т. е. около 275 000 а. е., и больше диаметра Солнца ($1{,}5 \cdot 10^6$ км = 0,01 а. е.) примерно в 27,5 млн раз. Таким образом, галактики значительно теснее сближены в пространстве, чем звёзды между собой.

Систематические исследования распределения галактик по небу показали, что наряду с отдельными галактиками наблюдаются скопления галактик. Так, наша Галактика, Туманность Андромеды, Большое и Малое Магеллановы Облака и ещё несколько звёздных систем образуют *Местную группу*, в которую входят 35 галактик. Галактики Местной группы связаны общим тяготением и движутся вокруг общего центра масс.

Сейчас известно около 4000 скоплений галактик, в которых насчитывается сотни и тысячи звёздных систем. В среднем диаметры скоплений близки к 8 Мпк (26 млн св. лет). Одним из наибольших является скопление галактик в созвездии Волосы Вероники. Оно находится на расстоянии около 70 Мпк от нас. В этом богатом скоплении насчитывается около 40 000 галактик.

Важно Наш Млечный Путь вместе с Местной группой галактик расположен на окраине скопления галактик, центр которого находится в созвездии Девы.

Интересно Наблюдения показали, что Туманность Андромеды приближается к Млечному Пути со скоростью 275 км/с и через 2,4 млрд лет они столкнутся.

В скоплениях галактики расположены близко друг к другу, поэтому между ними часто происходят столкновения, приводящие к их слиянию. Образовавшаяся более крупная галактика чаще сталкивается с другими, поглощая их. Этот процесс слияния астрономы назвали *каннибализмом галактик*. Таким образом образовались самые крупные галактики в скоплениях, такие, как гигантская эллиптическая галактика M81, находящаяся в центре богатого скопления галактик в созвездии Девы. А радиогалактику Центавр А, показанную на рисунке XVI цветной вклейки, мы наблюдаем непосредственно в процессе столкновения.

Интересно Сверхскопления галактик являются самыми крупными структурами во Вселенной.

Наблюдения показали, что скопления распределены в пространстве неравномерно, они собраны в сверхскопления вытянутой формы, содержащие десятки скоплений галактик. Размеры сверхскоплений достигают сотен миллиардов световых лет.

Красное смещение в спектрах галактик и закон Хаббла. Свет галактик в основном представляет собой суммарный свет миллиардов звёзд и газа. Для изучения физических свойств галактик астрономы используют методы спектрального анализа света.

Наблюдения показывают, что линии в спектрах всех известных галактик смещены к красному концу спектра.

Запомни Явление смещения линий в спектрах всех известных галактик к красному концу спектра называется **красным смещением**.

При этом отношение смещения спектральной линии $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ к длине волны λ_0 оказалось для всех линий одинаковым в спектре данной галактики. Отношение $z = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, где λ_0 — длина волны спектральной линии, наблюдаемой в лаборатории, характеризует красное смещение.

Общепринятая в настоящее время интерпретация этого явления связана с эффектом Доплера, согласно которому смещение спектральных линий вызвано движением (удалением) излучающего объекта (галактики) со скоростью v по направлению от наблюдателя. При малых красных смещениях ($z \ll 1$) скорость объекта может быть найдена по формуле Доплера:

$$v = c\,\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = cz, \qquad (16.1)$$

где $c = 3 \cdot 10^5$ км/с — скорость света.

После того как были найдены расстояния до галактик, а по красному смещению — их скорости, известный астроном Э. Хаббл установил интересную зависимость, названную *законом Хаббла*.

Закон Хаббла

Скорости удаления галактик возрастают прямо пропорционально расстояниям до них:

$$v = Hr. \qquad (16.2)$$

В этой формуле коэффициент пропорциональности H называется *постоянной Хаббла*. Её числовое значение зависит от выбранных единиц величин. Если в законе Хаббла скорость выражена в километрах в секунду, а расстояние — в мегапарсеках, то постоянная Хаббла $H \approx 70$ км/(с · Мпк).

Используя закон Хаббла, удаётся измерить расстояния до галактик по их красному смещению.

Так, самый близкий к нам квазар 3C273 имеет красное смещение $z = 0{,}158$. Это означает, что он удаляется от нас со скоростью $v = cz = 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}158 = 47\,400$ (км/с). Из закона Хаббла следует, что расстояние до него $r = v/H = 680$ Мпк $= 2{,}2$ млрд св. лет.

У ближайшей к нам галактики — Туманности Андромеды — наблюдается смещение спектральных линий в синюю сторону. Чем можно объяснить это смещение?

На фотографии рисунка XVI цветной вклейки в 1 мм — 0,7′. Радиогалактика Центавр А имеет красное смещение $z = 0{,}00087$. Оцените линейный размер галактики, толщину слоя поглощающего вещества в галактике, скорость удаления галактики и расстояние до неё. К какому типу относится эта галактика?

Типы галактик. Квазары. Красное смещение. Закон Хаббла — Найти

1. Перечислите основные типы галактик.
2. Что такое красное смещение?
3. С помощью какого эффекта объясняют красное смещение в спектрах галактик?
4. Сформулируйте закон Хаббла.
5. Туманность Андромеды приближается к Млечному Пути со скоростью 280 км/с, расстояние до неё около 2 млн св. лет. Через сколько лет произойдёт столкновение между галактиками?

1. Наша Галактика
1) эллиптическая
2) неправильная
3) спиральная
4) активная

2. Туманность Андромеды
1) эллиптическая
2) неправильная
3) спиральная
4) активная

3. Красное смещение галактики равно 0,1. На каком расстоянии она находится?

§108 СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

На что указывает наблюдаемое красное смещение линий в спектрах галактик? Чему равна максимальная скорость движения тел?

Интересно Слово «космология» происходит от греческих слов kosmos — мир, Вселенная и logos — закон, учение.

Наука, изучающая строение и эволюцию Вселенной, называется *космологией*.

Большое значение для развития современных представлений о строении и эволюции Вселенной имеет общая теория относительности, созданная А. Эйнштейном (1879—1955). Она обобщает теорию тяготения Ньютона на большие массы вещества и скорости его движения, сравнимые со скоростью света. Действительно, в галактиках сосредоточена колоссальная масса вещества, а скорости далёких галактик и квазаров сравнимы со скоростью света. Согласно общей теории относительности гравитационное взаимодействие передаётся с конечной скоростью, равной скорости света. (В теории Ньютона предполагается, что гравитационное взаимодействие передаётся мгновенно.)

Почему классическая механика и теория тяготения Ньютона неприменимы для описания строения и эволюции Вселенной?

Общая теория относительности накладывает определённые ограничения на геометрические свойства пространства, которое уже нельзя считать евклидовым. Согласно этой теории движение и распределение материи в пространстве нельзя рассматривать в отрыве от геометрических свойств пространства и времени.

Посмотрите на ночное небо. Тёмное оно или нет? Предположим, что наша Вселенная статична (в ней ничего не меняется), бесконечна, концентрация звёзд постоянна и в ней справедлива геометрия Евклида. Покажите качественно, что в этом случае небо должно быть очень ярким и днём и ночью.

Расширяющаяся Вселенная. Впервые космологическую модель Вселенной в рамках общей теории относительности рассмотрел советский математик А. Фридман. Он показал, что Вселенная, однородно заполненная веществом, должна быть нестационарной, и, исходя из этого, объяснил наблюдаемую картину разбегания галактик. Он показал, что в зависимости от средней плотности вещества Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. При расширении Вселенной скорость разбегания галактик должна быть пропорциональна расстояниям до них — вывод, который подтвердил Хаббл открытием красного смещения в спектрах галактик.

Критическое значение плотности вещества, от которой зависит характер его движения:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}, \qquad (16.3)$$

где G — гравитационная постоянная, а H — постоянная Хаббла.

Учитывая, что 1 Мпк = $3{,}08 \cdot 10^{19}$ км, найдём $H = 2{,}3 \cdot 10^{-18}$ с$^{-1}$. Тогда согласно формуле (16.3) критическая плотность вещества

$$\rho_{кр} = \frac{3 \cdot (2{,}3 \cdot 10^{-18}\ с^{-1})^2}{8 \cdot 3{,}14 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ м^3/(кг \cdot с^2)} \approx 10^{-26}\ кг/м^3 = 10^{-29}\ г/см^3.$$

По теории Фридмана, если средняя плотность Вселенной больше критической ($\rho > \rho_{кр}$), то в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, а при средней плотности, равной или меньшей критической ($\rho \leqslant \rho_{кр}$), расширение не прекратится.

Интересно

Если средняя плотность вещества во Вселенной равна критической, то её геометрические свойства должны описываться геометрией Евклида, если меньше критической, то геометрией Лобачевского.

Средняя плотность вещества, сосредоточенная в виде звёзд в галактиках, равна приблизительно $2 \cdot 10^{-30}$ г/см^3, что почти в 5 раз меньше критической.

Важно

Наблюдаемое разбегание галактик указывает на расширение Вселенной.

Благодаря работам Нобелевских лауреатов С. Перлмуттера, А. Райсса и Б. Шмидта (2011), наблюдавших за вспышками сверхновых звёзд в очень удалённых галактиках, стало ясно, что Вселенная расширяется с ускорением, т. е., кроме всемирного тяготения, существует всемирное антитяготение — отталкивание одних галактик от других. Эта сила, природа которой пока не ясна, проявляет себя на больших космологических расстояниях и связана, вероятно, с заполняющей всё межгалактическое пространство **тёмной энергией**. Таким образом, можно предположить, что в будущем расширение Вселенной не прекратится, а будет происходить всё быстрее и быстрее.



Возьмите воздушный шар, нанесите на него точки-галактики и начните надувать, имитируя расширение Вселенной. Пусть одна точка — наша Галактика. Как будут вести себя соседние точки-галактики, будут ли они удаляться от нас? Что будет видеть астроном из другой галактики? Можно ли говорить, что есть центр «Вселенной» на поверхности шара? Как вы думаете, есть ли центр у нашей Вселенной?

Кроме этого, во Вселенной присутствует особый вид материи, который не испускает электромагнитное излучение и не взаимодействует с ним, что вызывает большие сложности при исследовании этой **тёмной материи**. Мы можем обнаружить её только по влиянию её гравитационного поля на взаимодействие и скорости вращения галактик. Учёные предполагают, что тёмная материя является холодной, т. е. состоит из тяжёлых частиц (возможно, из гипотетических тяжёлых суперсимметричных частиц).

Тёмная материя и тёмная энергия — это физические объекты, изучение которых только начинается.

Интересно

Данные современных исследований говорят о том, что Вселенная состоит примерно на 4 % из обычного вещества, на 23 % из так называемой тёмной материи и на 73 % из ещё более таинственной тёмной энергии, вызывающей ускоренное расширение Вселенной.

Радиус Вселенной. Его можно легко оценить с помощью закона Хаббла. Так как максимальная скорость не может превышать скорости света, то максимальное расстояние R, до которого мы можем наблюдать небесные тела, соответствует скорости разбегания галактик $v = c = 3 \cdot 10^5$ км/с, откуда

$$R = \frac{c}{H} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}}{70 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}} = 4{,}3 \cdot 10^3 \text{ Мпк} = 1{,}4 \cdot 10^{10} \text{ св. лет} = 1{,}32 \cdot 10^{26} \text{ м}.$$

Возраст Вселенной. Если наблюдения пока не позволяют нам точно определить характер будущего расширения Вселенной, то оценить, когда в прошлом это расширение началось, можно с помощью закона Хаббла.

Действительно, если наблюдаемая нами галактика удаляется со скоростью v и сейчас после «начала» расширения находится на расстоянии r от Земли, то своё удаление она начала в момент

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = \frac{1}{2{,}3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}} = 0{,}43 \cdot 10^{18} \text{ с} = 13{,}7 \cdot 10^9 \text{ лет}.$$

Эти рассуждения применимы для любой галактики.

Таким образом, около 13 млрд лет назад всё вещество видимой Вселенной было сосредоточено в небольшом объёме и плотность вещества была настолько высокой, что ни галактик, ни звёзд не существовало. Пока не ясны ни физические процессы, протекавшие до этого сверхплотного состояния вещества, ни причины, вызвавшие расширение Вселенной. Ясно одно: со временем расширение привело к значительному уменьшению плотности вещества и на определённом этапе расширения стали формироваться галактики и звёзды.

Интересно Первые звёзды и галактики образовались, когда возраст Вселенной был около 1 млрд лет.

Запомни

Наблюдаемое разбегание галактик напоминает разлёт вещества во время взрыва, поэтому описанная теория расширения Вселенной получила название **теории Большого взрыва.**

Время в 13,7 млрд лет, прошедшее с начала Большого взрыва, называют **возрастом Вселенной.**

Интересно Вещество Вселенной состоит на 77 % из водорода и на 21 % из гелия, а на остальные элементы приходится 2 %. Основное количество гелия образовалось в первые секунды её жизни.

Модель «горячей Вселенной». В 1968 г. было обнаружено излучение, которое не связано ни с одним известным источником радиоизлучения. Оно идёт со всех сторон и похоже на излучение абсолютно чёрного тела. Это микроволновое излучение имеет максимум на длине волны $\lambda_{max} = 1$ мм, что согласно закону смещения Вина соответствует температуре излучения 2,7 К.

В прошлом, на ранних этапах эволюции Вселенной, плотность и температура этого излучения были существенно выше.

Таким образом, в прошлом не только плотность, но и температура вещества были очень высокими. Так, например, когда возраст Вселенной был всего несколько секунд, температура вещества и излучения была десятки и сотни миллионов кельвинов.

Конечно, ни о каких галактиках и звёздах в этот период говорить не приходится. Они образовались значительно позднее, когда температура и плотность вещества стали ниже. Так как наблюдаемое микроволновое излучение с температурой 2,7 К связано с горячим веществом на ранних этапах эволюции Вселенной, то излучение получило название **реликтового** (оставшегося от прошлых эпох), а модель расширяющейся Вселенной называют **моделью «горячей Вселенной»**.

Важно Наблюдаемое реликтовое излучение указывает на то, что Вселенная в прошлом была не только плотной, но и очень горячей (имела высокую температуру).

Космология. Расширяющаяся Вселенная. Радиус и возраст Вселенной — Найти

Модель «горячей Вселенной». Реликтовое излучение — Найти

1. Какие наблюдения указывают на то, что Вселенная не статична, а непрерывно меняется (эволюционирует)?
2. Астрономы насчитали около 10^{11} галактик в видимой Вселенной, каждая галактика содержит около 10^{11} звёзд с массами, сравнимыми с солнечной. Оцените среднюю плотность видимого вещества во Вселенной и сравните полученный результат с критической плотностью.
3. Сейчас наблюдаются очень далёкие галактики, расстояния до которых почти 12 млрд св. лет. Каков был возраст Вселенной, когда был излучён свет этих галактик, дошедший сейчас до нас?

1. Что указывает на расширение Вселенной?
1) красное смещение в спектрах далёких галактик
2) вращение галактик вокруг оси
3) чёрные дыры в ядрах галактик
4) наличие газа и пыли в спиральных галактиках

2. Что указывает на высокую температуру вещества на начальных этапах эволюции Вселенной?
1) реликтовое излучение
2) распределение галактик в пространстве
3) высокая температура в звёздах
4) ничто не указывает

3. Солнечная система образовалась около 4,5 млрд лет назад. Чему тогда был равен возраст Вселенной?
1) 4,5 млрд лет 2) 0 3) 8,5 млрд лет 4) 1 млрд лет

§109 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «АСТРОНОМИЯ»

Для решения задач по астрономии требуется знание третьего закона Кеплера, понятия светимости и её связи с температурой звезды, радиусом, освещённостью и расстоянием до звезды; умение читать диаграмму Герцшпрунга—Рессела; зная основные параметры Земли и Солнца, уметь сравнивать их с параметрами небесных тел.

Параметры Земли: $M_\oplus = 6 \cdot 10^{24}$ кг, $R_\oplus = 6400$ км, $\rho_\oplus = 5500$ кг/м^3.

Параметры Солнца: $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ кг, $R_\odot = 700\,000$ км, $\rho_\odot = 1400$ кг/м^3.

1 пк $= 3 \cdot 10^{16}$ м $= 3{,}26$ св. года.

Задача 1. Определите массу Юпитера по движению его спутника Ио, если спутник обращается вокруг Юпитера по круговой орбите на расстоянии $a = 422 \cdot 10^3$ км с периодом $T = 1{,}769$ сут.

Р е ш е н и е. Из третьего обобщённого закона Кеплера (14.2), полагая $M_\text{Ю} = M_1 \gg M_2 = M_\text{Ио}$, имеем $M_\text{Ю} = 4\pi^2 a^3/GT^2 = 1{,}9 \cdot 10^{27}$ кг.

Задача 2. Во сколько раз радиус звезды-сверхгиганта со светимостью в $10\,000 L_\odot$ больше, чем радиус звезды главной последовательности, если их температуры одинаковы и равны 5800 К?

Р е ш е н и е. Звезда главной последовательности с данной температурой — Солнце. Так как $L = \sigma T^4 4\pi R^2$, то отношение радиусов

$$R_\text{СГ} / R_\text{ГП} = \sqrt{L_\text{СГ} / L_\text{ГП}} = 100.$$

Задача 3. Звезда Антарес (α Скорпиона) спектрального класса М имеет температуру $T_\text{А} = 3300$ К, её светимость $L_\text{А} = 30\,000 L_\odot$, масса $M_\text{А} = 19 M_\odot$. К какому типу звёзд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела она относится, чему равны её радиус и плотность?

Р е ш е н и е. По диаграмме Герцшпрунга—Рессела находим, что Антарес относится к красным сверхгигантам.

Так как $L = \sigma T^4 4\pi R^2$, то

$$\frac{R_\text{А}}{R_\odot} = \left(\frac{T_\odot}{T_\text{А}}\right)^2 \sqrt{\frac{L_\text{А}}{L_\odot}} = \left(\frac{5800}{3300}\right)^2 \cdot \sqrt{30\,000} = 540.$$

Для плотности имеем соотношение

$$\frac{\rho_\text{А}}{\rho_\odot} = \left(\frac{R_\odot}{R_\text{А}}\right)^3 \cdot \frac{M_\text{А}}{M_\odot} = 1{,}2 \cdot 10^{-7}.$$

Тогда $\rho_\text{А} = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ г/см^3.

Задача 4. Оцените время жизни звезды спектрального класса В.

Р е ш е н и е. Масса звезды $M = 20 M_\odot$. Так как $L \sim M^4$, а запасы ядерного горючего (водорода) $E \sim M$, то время жизни звезды $t_\text{В} = E/L \sim 1/M^3$.

Сравнение с характеристиками Солнца даёт

$$t_\text{В} = t_\odot (M_\odot/M)^3 = 10^{10} (M_\odot/M)^3 = 1{,}25 \cdot 10^6 \text{ лет}.$$

Задача 5. В 2011 г. в галактике Водоворот, расстояние до которой 21 млн св. лет, вспыхнула сверхновая звезда. В максимуме блеска она создавала освещённость на Земле $E = 1{,}7 \cdot 10^{-13}$ Вт/м^2. Оцените светимость этой сверхновой звезды в максимуме блеска и сравните её с солнечной светимостью.



Р е ш е н и е. Светимость звезды $L = E \cdot 4\pi r^2 = 4\pi \cdot 1{,}7 \times \times 10^{-13} \cdot (2{,}1 \cdot 10^7 \cdot 9 \cdot 10^{15})^2 = 1{,}6 \cdot 10^{47}$ Вт $= 2 \cdot 10^8 L_\odot$. Сверхновая звезда светила как небольшая галактика, состоящая из двухсот миллионов звёзд!

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите массу Марса по движению его спутника Деймоса, среднее расстояние от которого до планеты $a = 23\,500$ км, период обращения 1,26 сут.

2. Планета-карлик Плутон удалена от Солнца на расстояние 39,5 а. е. Сколько лет длится год на Плутоне?

3. Радиус Урана 24 500 км, а масса $8{,}76 \cdot 10^{25}$ кг. Определите среднюю плотность планеты и сравните её с плотностью воды и Земли.

4. Звезда Ригель (β Ориона) спектрального класса А имеет светимость $2 \cdot 10^5 L_\odot$ и массу $40 M_\odot$. К какой группе звёзд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела она относится? Чему равны её радиус и средняя плотность?

5. Используя зависимость светимости звезды от массы (см. формулу 15.4)) и учитывая тот факт, что запасы ядерной энергии пропорциональны её массе, оцените, как зависит время жизни звезды от её массы и во сколько раз отличается время жизни звезды с массой $M = 10 M_\odot$ от времени жизни звезды типа Солнца.

6. Галактика с видимым угловым диаметром $15''$ имеет красное смещение 0,25. Оцените её линейный диаметр. Сколько лет идёт свет от неё до Земли?

7. Освещённость, которую создаёт квазар 3С273 на Земле, $E = 1{,}5 \times \times 10^{-14}$ Вт/м^2, расстояние до квазара 670 Мпк. Оцените его светимость и сравните со светимостью Солнца.



Повторите материал главы 16 по следующему плану:

1. Выпишите основные астрономические понятия и дайте им определение.
2. Классифицируйте галактики.
3. Сформулируйте закон Хаббла и запишите его математическое выражение.
4. Опишите основные явления, связанные с галактиками.



«Вселенная — наш дом»

1. Строение Млечного Пути.
2. Как астрономы определяют расстояния до звёзд и галактик?
3. Необычность квазаров, их природа.
4. Процессы звёздообразования в галактиках.
5. Термоядерные реакции во Вселенной и реликтовое излучение.



«Масштабная структура Вселенной: от микро- до макромира»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЕДИНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Итак, изучение школьного курса физики вами закончено. В большей или меньшей степени каждый из вас приобщился к результатам той огромной работы по изучению различных форм движения материи, строения и свойств материальных тел, которая была проделана на протяжении многих веков учёными всего мира. Физика знакомит нас с наиболее общими законами природы.

Важно Цель физики заключается в отыскании общих законов природы и в объяснении конкретных процессов на их основе.

По мере продвижения к этой цели перед учёными постепенно выстраивалась величественная и сложная картина единства природы. Мир представляет собой не совокупность разрозненных, независимых друг от друга событий, а разнообразные и многочисленные проявления одного целого.

Механическая картина мира. Многие поколения учёных поражала и продолжает поражать величественная и цельная картина мира, которая была создана на основе механики Ньютона. Согласно Ньютону весь мир состоит «из твёрдых, весомых, непроницаемых, подвижных частиц». Эти «первичные частицы абсолютно тверды: они неизмеримо более тверды, чем тела, которые из них состоят, настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются вдребезги». Отличаются они друг от друга главным образом количественно, своими массами. Всё богатство, всё качественное многообразие мира — это результат различий в движении частиц. Внутренняя сущность частиц остаётся на втором плане.

Важно Основанием для единой механической картины мира послужил всеобъемлющий характер открытых Ньютоном законов движения тел.

Этим законам с удивительной точностью подчиняются как громадные небесные тела, так и мельчайшие песчинки, гонимые ветром. И даже ветер — движение не видимых глазом частиц воздуха — подчиняется тем же законам, законам механики. На протяжении долгого времени учёные были уверены, что единственными фундаментальными законами природы являются законы механики Ньютона. Французский учёный Лагранж считал, что нет человека счастливее Ньютона: «...ведь только однажды одному человеку суждено построить картину мира».

Однако простая механическая картина мира оказалась несостоятельной. При исследовании электромагнитных процессов выяснилось, что они не подчиняются механике Ньютона. Дж. Максвелл открыл новый тип фундаментальных законов, которые не сводятся к механике Ньютона, — это законы поведения электромагнитного поля.

Электромагнитная картина мира и теория относительности. В механике Ньютона предполагалось, что тела непосредственно через пустоту действуют

друг на друга и эти взаимодействия осуществляются мгновенно (теория дальнодействия). После создания электродинамики представления о силах существенно изменились. Каждое из взаимодействующих заряженных тел создаёт электромагнитное поле, которое с конечной скоростью распространяется в пространстве. Взаимодействие осуществляется посредством этого поля (теория близкодействия).

Электромагнитные силы чрезвычайно широко распространены в природе, даже, казалось бы, такие чисто механические силы, как сила упругости и сила трения, объясняются также электромагнитным взаимодействием.

Электромагнитные силы действуют в атомном ядре, атоме, молекуле, между отдельными молекулами в макроскопических телах. Это происходит потому, что в состав всех атомов входят электрически заряженные частицы. Действие электромагнитных сил обнаруживается и на очень малых (ядро), и на космических (электромагнитное излучение звёзд) расстояниях.

Как когда-то была построена механическая модель мира, развитие электродинамики привело к попыткам построить *единую электромагнитную картину мира*.

Важно

Утверждалось, что все события в мире (по единой электромагнитной картине мира) управляются законами электромагнитных взаимодействий.

Кульминации электромагнитная картина мира достигла после создания *специальной теории относительности*. Было понято фундаментальное значение конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий, найдены релятивистские уравнения движения, заменяющие уравнения Ньютона при больших скоростях.

Теория относительности заставила нас пересмотреть представления о пространстве и времени. Современные ускорители частиц позволяют разогнать частицы до огромных скоростей. В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) достигается скорость частиц порядка 0,99999 скорости света. Такие скорости дают возможность подтвердить все выводы теории относительности — сокращение длины, замедление времени, нелинейное увеличение импульса.

И. Ньютон писал: «Абсолютное, истинное или математическое время само по себе и в силу своей внутренней природы течёт равномерно, безотносительно к чему-либо внешнему». В теории относительности пространство и время уже не являются независимыми, как в классической механике. Было введено четырёхмерное пространство, по координатным осям которого откладываются пространственные координаты и время. Всякой частице в этом пространстве соответствует некоторая линия, называемая *мировой линией*.

Заметим, что в настоящее время физики предполагают существование 10- и даже 11-мерного пространства.

Если во времена расцвета механической картины мира делались попытки свести электромагнитные явления к механическим процессам в особой среде (мировом эфире), то теперь уже стремились, наоборот, вывести законы движения частиц из электромагнитной теории. Частицы вещества пытались рассматривать как «сгустки» электромагнитного поля. Однако объяснить все происходящие в природе процессы электромагнитным взаимодействием не

удалось. Уравнения движения частиц и закон гравитационного взаимодействия не могут быть выведены из теории электромагнитного поля. Кроме того, были открыты электрически нейтральные частицы и новые типы взаимодействий.

Важно Природа оказалась сложнее, чем предполагали вначале: ни единый закон движения, ни единственная сила не способны охватить всего многообразия процессов в мире.

Единство строения материи. Мир чрезвычайно разнообразен. Но как это ни удивительно, вещество звёзд точно такое же, как и вещество, из которого состоит Земля. Атомы, из которых состоят все тела Вселенной, совершенно одинаковы. Живые организмы состоят из тех же атомов, что и неживые.

Все атомы имеют одинаковую структуру и построены из элементарных частиц трёх видов. У них есть ядра, состоящие из протонов и нейтронов, окружённые электронами. Ядра и электроны взаимодействуют друг с другом посредством электромагнитного поля, квантами которого являются фотоны.

Взаимодействие же между протонами и нейтронами в ядре осуществляют в основном те мезоны, которые представляют собой кванты ядерного поля. При β-распаде решающую роль играет слабое взаимодействие. Частицы, ответственные за слабое взаимодействие, экспериментально обнаружены, они представляют собой кванты поля сил, обеспечивающих это взаимодействие.

При изучении β-распада была обнаружена новая частица — нейтрино. В настоящее время уже известно большое число элементарных частиц.

В первой половине XX в. был открыт фундаментальный факт:

Важно все элементарные частицы способны превращаться друг в друга.

В 1970-е гг. была создана теория, согласно которой все сильно взаимодействующие частицы состоят из субэлементарных частиц — кварков шести видов.

Согласно Стандартной модели материя состоит из 24 частиц — 6 видов кварков и 6 видов лептонов, при этом каждой частице соответствует античастица.

На основе теории кварков была объяснена структура большинства элементарных частиц.

Важно После открытия элементарных частиц и их превращений основным принципом единой картины мира стало *единство в строении материи*.

В основе этого единства лежит материальность всех элементарных частиц. Различные элементарные частицы — это различные конкретные формы существования материи.

Современная физическая картина мира. Единство мира не исчерпывается единством строения материи. Оно проявляется и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.

Важно Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий тел друг с другом, в природе, по современным данным, имеются лишь четыре типа сил. Это *гравитационные силы, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия*.

Заметим, что посредники гравитации — гравитоны — пока не обнаружены.

Слабые взаимодействия проявляются главным образом при превращениях элементарных частиц друг в друга. С проявлением всех четырёх типов сил мы встречаемся в безграничных просторах Вселенной, в любых телах на Земле (в том числе и в живых организмах), в атомах и атомных ядрах, при всех превращениях элементарных частиц.

Революционное изменение классических представлений о физической картине мира произошло после открытия квантовых свойств материи.

Важно С появлением квантовой физики, описывающей движение микрочастиц, возникла реальная возможность создания единой физической картины мира.

Разделение материи на вещество, имеющее прерывное строение, и непрерывное поле потеряло абсолютный смысл. Каждому полю соответствуют кванты этого поля: электромагнитному полю — фотоны, ядерному — мезоны, а на более глубоком уровне — глюоны, осуществляющие взаимодействие кварков.

В свою очередь, все частицы обладают волновыми свойствами. Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.

Описание, казалось бы, взаимоисключающих корпускулярных и волновых свойств в рамках одной теории оказалось возможным благодаря тому, что законы движения всех без исключения микрочастиц носят статистический (вероятностный) характер. Этот факт делает невозможным однозначное предсказание того или иного поведения микрообъектов.

Важно Принципы квантовой теории являются совершенно общими, применимыми для описания движения всех частиц, взаимодействий между ними и их взаимных превращений.

Итак, современная физика, несомненно, демонстрирует нам черты единства природы. Но всё же многого, быть может, даже самой физической сути единства мира, выяснить пока ещё не удалось.

Неизвестно, почему существует столь много различных элементарных частиц, почему они имеют те или иные значения массы, заряда и других характеристик. До сих пор все эти величины определяются экспериментально. Благодаря современным ускорителям физики пытаются понять силы взаимодействия частиц, выделить частицы, из которых состоит материя.

Важно Предпринимаются попытки создания общей теории для всех типов взаимодействий, между которыми существует определённая связь. Электромагнитные, сильные и слабые взаимодействия уже объединены в рамках одной теории.

Эта объединённая теория получила название *теории Великого объединения.*

Однако остаётся неясным, почему посредством безмассовых частиц — фотонов — осуществляется электромагнитное взаимодействие, а слабое осуществляют тяжёлые частицы — W- и Z-бозоны. Согласно теории все бозоны должны быть безмассовыми. Английский физик-теоретик Питер Хиггс в 1964 г. предположил, что существует частица (*бозон Хиггса*), при взаимодействии с которой все частицы приобретают массу.

Бозон Хиггса долгое время обнаружить не удавалось. Однако 4 июля 2012 г. на конференции в Женеве было объявлено, что в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в результате экспериментов каждый из двух детекторов Большого адронного коллайдера (БАК) зафиксировал распад частицы, по физическим характеристикам похожей на бозон Хиггса. В результате дальнейших исследований было доказано, что это именно бозон Хиггса, поэтому можно считать, что последняя, 17-я частица Стандартной модели найдена и эта модель справедлива. В 2013 г. П. Хиггс и Ф. Энглер получили Нобелевскую премию за это открытие.

Конечной целью физики является включение в эту теорию сил гравитации. На пути к этой цели была создана теория струн, согласно которой элементарные частицы представляются как вибрирующие микроскопические струны, колеблющиеся в пространстве. Но эта теория, при всём её математическом изяществе, также несовершенна. Соединение сил гравитации с другими силами природы в единой теории необходимо для понимания того, что произошло сразу же после Большого взрыва.

Кроме объединения сил взаимодействия, необходимо объединение квантовой теории и теории относительности.

«Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, ещё не удалось проникнуть в них, и радость творческих исканий и открытий всё ещё продолжает существовать». Эти слова, сказанные Галилеем три с половиной столетия назад, актуальны до сих пор.

Научное мировоззрение. Фундаментальные законы, устанавливаемые в физике, по своей сложности и общности намного превосходят те факты, с которых начинается исследование любых явлений. Но они столь же достоверны и объективны, как и знания о простых явлениях, наблюдаемых непосредственно. Эти законы не нарушаются никогда, ни при каких условиях.

Несмотря на то что физика становится всё более сложной, требующей знания сложного математического аппарата, с помощью которого разрабатываются современные теории, цель науки остаётся прежней — понимание и объяснение законов природы.

Кроме этой задачи, в настоящее время многие учёные работают над практическими проблемами, решение которых позволяет усовершенствовать приборы, создавать новые материалы. Всем этим занимается прикладная физика.

Всё большее и большее число людей осознают, что объективные законы, которым следует природа, исключают чудеса, а понимание этих законов позволит человечеству создать физическую картину мира, включающую мир атомов, окружающий нас мир и требующий больших материальных и интеллектуальных усилий для познания, но завораживающий нас мир Вселенной.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ[1]

№ 1. НАБЛЮДЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК

Цель работы: исследовать взаимодействие тока с постоянным магнитом.

Оборудование: источник тока, реостат, ключ, витки проволоки, катушка, полосовой магнит, штатив, динамометр, амперметр, соединительные провода.

Порядок выполнения работы

Первый опыт

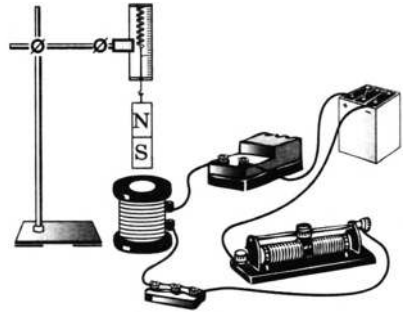


Рис. Л.1

1. На штативе подвесьте динамометр, к динамометру прикрепите магнит, под магнитом расположите катушку и соберите электрическую схему согласно рисунку Л.1.

2. Установите бегунок реостата в положение, соответствующее максимальному сопротивлению.

3. Замкните цепь.

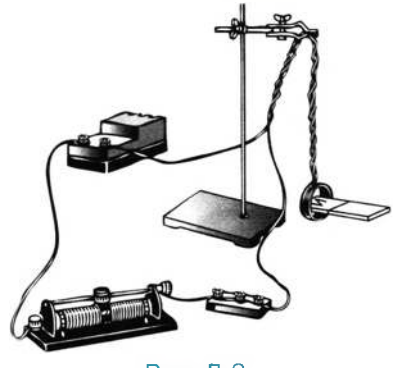
4. Изменяйте силу тока, уменьшая сопротивление реостата, и записывайте показания динамометра в таблицу (таблицу сделайте в тетради).

Физическая величина	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
I, А						
F, Н						

5. Измените направление тока в катушке. Проведите аналогичные измерения, также записывая результаты измерений в таблицу. Отметьте изменения показаний динамометра.

6. Нарисуйте катушку и обозначьте полюсы её магнитного поля.

7. Постройте график зависимости силы взаимодействия катушки с магнитом от силы тока, сделайте вывод.


Рис. Л.2

Второй опыт

1. На штативе подвесьте витки из проволоки и соберите электрическую схему согласно рисунку Л.2.

---

[1] Инструкции к лабораторным работам составлены А. Б. Долицким, А. З. Сивяковым и Н. А. Парфентьевой при участии Ю. И. Дика и Г. Г. Никифорова.

2. Поднесите к мотку проволоки магнит и понаблюдайте за движением витков проволоки. Запишите свои наблюдения.

3. Поверните магнит и поднесите его к виткам проволоки другим полюсом. Наблюдения запишите.

4. Измените направление тока в витках проволоки и поднесите к ним магнит сначала одним полюсом, затем другим.

5. Покажите направление тока в витках проволоки.

6. Объясните результаты опытов.

№ 2. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

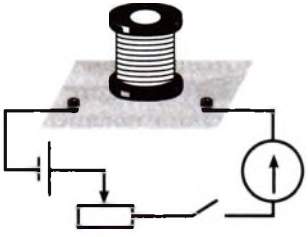


Рис. Л.3

Цель работы: изучить одно из самых важных явлений электромагнетизма — явление электромагнитной индукции.

Оборудование: источник тока, гальванометр, катушка *1*, железный сердечник, U-образный магнит, магнитная стрелка, реостат, ключ, витки проволоки или катушка *2*, диаметр которой больше диаметра катушки *1*, соединительные провода.

Подготовительный этап

1. Соберите схему согласно рисунку Л.3. В катушку вставьте железный сердечник. Замкните цепь, заметьте при этом, в какую сторону отклонится стрелка гальванометра. С помощью магнитной стрелки установите расположение магнитных полюсов катушки. В дальнейшем при выполнении работы можно будет судить о расположении магнитных полюсов катушки с током по направлению отклонения стрелки гальванометра.

2. Отключите от цепи реостат и ключ, замкните гальванометр на катушку, сохранив порядок соединения их клемм.

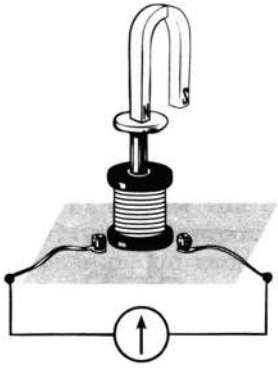


Рис. Л.4

Порядок выполнения работы

1. Приставьте сердечник к одному из полюсов U-образного магнита и вдвиньте внутрь катушки (рис. Л.4), наблюдая одновременно за стрелкой гальванометра.

2. Повторите наблюдение, выдвигая сердечник из катушки, а также меняя полюсы магнита.

3. Зарисуйте схему опыта и проверьте выполнение правила Ленца в каждом случае.

4. Наденьте вторую катушку или витки проволоки на первую катушку так, чтобы их оси совпадали. Замкните гальванометр на витки или вторую катушку (рис. Л.5).

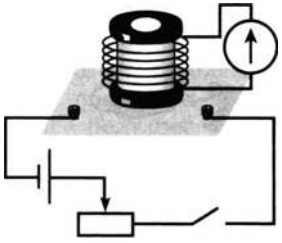


Рис. Л.5

5. Вставьте в обе катушки железный сердечник и присоедините первую катушку через выключатель и реостат к источнику питания (см. рис. Л.5).

6. Замыкая и размыкая ключ, наблюдайте за отклонением стрелки гальванометра.

7. Зарисуйте схему опыта и проверьте выполнение правила Ленца.

№ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МАЯТНИКА

Цель работы: определить ускорение свободного падения при помощи маятника, оценить возможность и точность измерения ускорения данным способом.

Оборудование: часы с секундной стрелкой, измерительная лента с погрешностью $\Delta_л = 0{,}5$ см, шарик с отверстием, нить, штатив с муфтой и кольцом.

Порядок выполнения работы

1. Установите на краю стола штатив. У его верхнего конца укрепите с помощью муфты кольцо и подвесьте к нему шарик на нити. Шарик должен висеть на расстоянии 1—2 см от пола.

2. Измерьте лентой длину l маятника (длина маятника должна быть не менее 50 см).

3. Возбудите колебания маятника, отклонив шарик в сторону на 5—8 см и отпустив его.

4. Измерьте в нескольких экспериментах время t 50 колебаний маятника и вычислите $t_{ср}$: $t_{ср} = \dfrac{t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_n}{n}$, где n — число опытов по измерению времени.

5. Вычислите среднюю абсолютную погрешность измерения времени:

$$\Delta t_{ср} = \frac{|t_1 - t_{ср}| + |t_2 - t_{ср}| + |t_3 - t_{ср}| + \ldots + |t_n - t_{ср}|}{n}$$

и результаты занесите в таблицу (таблицу сделайте в тетради).

Номер опыта	t, с	$t_{ср}$, с	t, с	$t_{ср}$, с	l, м

6. Вычислите ускорение свободного падения по формуле $g_{ср} = 4\pi^2 \dfrac{lN^2}{t_{ср}^2}$.

7. Определите относительную погрешность измерения времени ε_t.

8. Определите относительную погрешность измерения длины маятника $\varepsilon_l = \dfrac{\Delta l}{l}$. Значение Δl складывается из погрешности измерительной ленты и погрешности отсчёта, равной половине цены деления ленты: $\Delta l = \Delta l_л + \Delta l_{отсч}$.

9. Вычислите относительную погрешность измерения g по формуле

$$\varepsilon_g = \varepsilon_l + 2\varepsilon_\pi + 2\varepsilon_t,$$

учитывая, что погрешностью округления π можно пренебречь, если $\pi = 3{,}14$; также можно пренебречь ε_l, если она в 4 раза (и более) меньше $2\varepsilon_t$.

10. Определите $\Delta g = \varepsilon_g g_{ср}$ и запишите результат измерения в виде

$$g_{ср} - \Delta g \leqslant g \leqslant g_{ср} + \Delta g.$$

Убедитесь в достоверности измерений и проверьте принадлежность известного значения g полученному интервалу.

№ 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

Цель работы: изучить законы преломления света и определить показатель преломления стекла.

Оборудование: стеклянная пластина, лист миллиметровой бумаги, булавки или остро заточенный карандаш, миллиметровая линейка, лазерная указка или источник света и щель, позволяющие получить узкий световой пучок.

Порядок выполнения работы

В работе измеряется показатель преломления стеклянной пластины, имеющей форму трапеции. Перед тем как направить на пластину световой пучок, её располагают на столе на листе миллиметровой бумаги (или листе бумаги в клетку) так, чтобы одна из её параллельных граней совпала с предварительно отмеченной линией на бумаге. Эта линия укажет границу раздела двух сред воздух—стекло. Остро заточенным карандашом проводят линию вдоль второй параллельной грани. Эта линия изображает границу раздела двух сред стекло—воздух. После этого, не смещая пластину, на её первую параллельную грань направляют узкий световой пучок под каким-либо углом к грани. Вдоль падающего на пластину и вышедшего из неё световых пучков остро заточенным карандашом ставят точки *1*, *2*, *3* и *4* (рис. Л.6). После этого источник света выключают, пластину снимают и с помощью линейки прочерчивают входящий, выходящий и преломлённый лучи (рис. Л.7). Через точку B границы раздела двух сред воздух—стекло проводят перпендикуляр к границе, отмечают углы падения α и преломления β. Далее с помощью циркуля проводят окружность с центром в точке B и строят прямоугольные треугольники ABE и CBD.

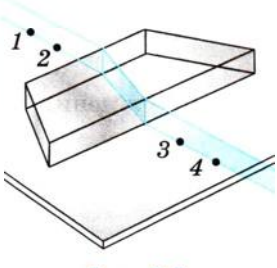


Рис. Л.6

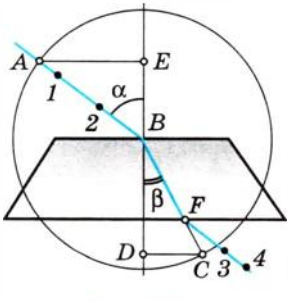


Рис. Л.7

Так как $\sin\alpha = \dfrac{AE}{AB}$, $\sin\beta = \dfrac{CD}{BC}$ и $AB = BC$, то формула для определения показателя преломления стекла примет вид $n_{пр} = \dfrac{AE}{DC}$.

Длины отрезков AE и DC измеряют по миллиметровой бумаге или с помощью линейки. При этом в обоих случаях инструментальную погрешность можно считать равной 1 мм. Погрешность отсчёта надо взять также равной 1 мм для учёта неточности в расположении линейки относительно края светового пучка.

Максимальную относительную погрешность измерения показателя преломления определяют по формуле $\varepsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta DC}{DC}$.

Максимальную абсолютную погрешность определяют по формуле $\Delta n = n_{\text{пр}}\varepsilon$.

Окончательный результат измерения показателя преломления можно записать так: $n = n_{\text{пр}} \pm \Delta n$.

Проведение эксперимента

1. Подготовьте бланк отчёта с таблицей для записи результатов измерений и вычислений.

Измерено		**Вычислено**				
AE, мм	DC, мм	$n_{\text{пр}}$	ΔAE, мм	ΔDC, мм	ε, %	Δn

2. Направьте световой пучок так, чтобы он падал на грань пластины под углом. Убедитесь в том, что пучок испытывает двукратное преломление (см. рис. Л.6).

3. Измерьте показатель преломления стекла относительно воздуха при каком-нибудь угле падения. Результат измерения запишите с учётом вычисленных погрешностей.

4. Повторите то же при другом угле падения.

5. Сравните результаты, полученные по формулам

$$n_{1\text{пр}} - \Delta n_1 < n_1 < n_{1\text{пр}} + \Delta n_1,$$
$$n_{2\text{пр}} - \Delta n_2 < n_2 < n_{2\text{пр}} + \Delta n_2.$$

6. Сделайте вывод о зависимости (или независимости) показателя преломления от угла падения. (Метод сравнения результатов измерений изложен во введении к лабораторным работам в учебнике физики для 10 класса.)

Контрольный вопрос

Чтобы определить показатель преломления стекла, достаточно измерить транспортиром углы α и β и вычислить отношение их синусов. Какой из методов определения показателя преломления предпочтительнее: этот или использованный в работе?

№ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ И ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

Цель работы: научиться практически получать и графически строить изображения в собирающей линзе; определить оптическую силу линзы.

Оборудование: линейка, два прямоугольных треугольника, длиннофокусная собирающая линза, лампочка на подставке с колпачком, источник тока, выключатель, соединительные провода, экран, направляющая рейка.

Порядок выполнения работы

В качестве предмета используется светящаяся рассеянным светом буква в колпачке осветителя. Действительное изображение этой буквы получают на экране.

1. Соберите электрическую цепь, подключив лампочку к источнику тока через выключатель.

2. Поставьте лампочку на один край стола, а экран — на другой край. Между ними поместите линзу, включите лампочку и передвигайте линзу вдоль рейки, пока на экране не будет получено резкое изображение светящейся буквы.

Для уменьшения погрешности измерений, связанной с настройкой на резкость, целесообразно получить уменьшенное (и, следовательно, более яркое) изображение.

3. Измерьте расстояния d и f, обратив внимание на необходимость тщательного отсчёта расстояний.

При неизменном d повторите опыт несколько раз, каждый раз заново получая резкое изображение. Вычислите $f_{ср}$, $D_{ср}$, $F_{ср}$. Результаты измерений расстояний (в миллиметрах) занесите в таблицу в тетради.

Номер опыта	f, 10^{-3} м	$f_{ср}$, 10^{-3} м	d, 10^{-3} м	$D_{ср}$, дптр	$F_{ср}$, м

4. Абсолютную погрешность ΔD измерения оптической силы линзы можно вычислить по формуле $\Delta D = \frac{\Delta_1}{d^2} + \frac{\Delta_2}{f^2}$, где Δ_1 и Δ_2 — абсолютные погрешности измерений d и f.

При определении Δ_1 и Δ_2 следует иметь в виду, что измерение расстояний d и f не может быть проведено с погрешностью, меньшей половины толщины линзы h.

Так как опыты проводятся при неизменном d, то $\Delta_1 = \frac{h}{2}$. Погрешность измерения f будет больше из-за неточности настройки на резкость примерно ещё на $\frac{h}{2}$. Поэтому $\Delta_2 = \frac{h}{2} + \frac{h}{2} = h$.

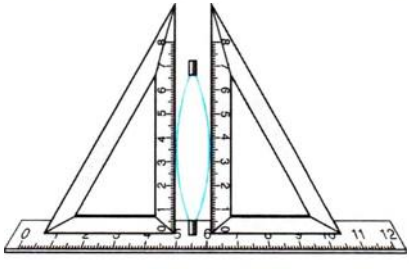


Рис. Л.8

5. Измерьте толщину линзы h (рис. Л.8) и вычислите ΔD по формуле $\Delta D = \frac{h}{2d^2} + \frac{h}{f^2}$.

6. Запишите результат в следующем виде: $D_{ср} - \Delta D \leqslant D \leqslant D_{ср} + \Delta D$.

№ 6. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Цель работы: получить дифракционный спектр и определить длину волны света.

Оборудование: дифракционная решётка *1* в держателе *2*, линейка *3*, по которой может перемещаться экран *4* с узкой щелью *5* посередине, на экране линейка с миллиметровыми делениями (рис. Л.9). Установка крепится на штативе *6*. За экраном находится источник света.

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку согласно рисунку Л.9. Экран должен находиться на расстоянии 50 см от решётки.

2. Убедитесь в том, что если смотреть сквозь решётку и прорезь в экране на источник света, то на чёрном фоне экрана наблюдаются дифракционные спектры первого и второго порядков. Если картина смещена, то, перемещая решётку в держателе, установите её так, чтобы дифракционные спектры были параллельны шкале экрана.

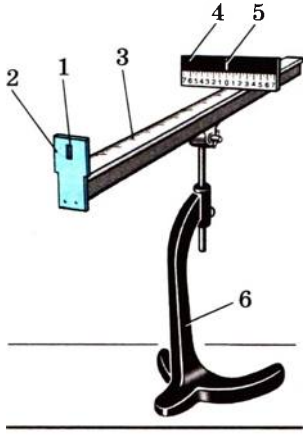


Рис. Л.9

3. Составьте самостоятельно таблицу, куда вы будете заносить значения измеренных величин.

4. Измерьте расстояния, равные $2x$, между линиями сначала красного, а затем фиолетового цвета в спектре первого порядка.

5. Измерьте расстояние l от дифракционной решётки до экрана.

6. Занесите в таблицу период d дифракционной решётки (он указан на самой решётке).

7. Вычислите длину волны красного цвета в спектре первого порядка справа и слева от щели в экране, определите среднее значение результатов измерений.

8. Повторите то же для фиолетового цвета.

9. Сравните полученные результаты с длинами волн красного и фиолетового цвета на рисунке V, *1* цветной вклейки.

Контрольный вопрос

Чем отличается дифракционный спектр от дисперсионного?

№ 7. ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ КОМПАКТ-ДИСКА (CD)

Цель работы: оценить объём информации, содержащейся на компакт-диске (CD).

Теоретическая часть

На применяемых в компьютерах компакт-дисках информация записывается в виде тёмных меток (углублений), расположенных на витках спирали. При этом витки спирали тесно примыкают друг к другу так, что каждый

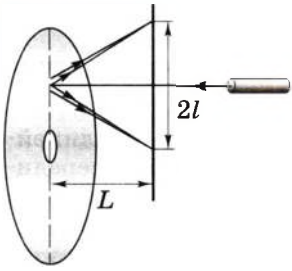


Рис. Л.10

участок диска представляет собой практически дифракционную решётку. Определив расстояние между дорожками и зная среднюю длину дорожки, а также ширину участка диска, на котором произведена запись, можно оценить количество содержащейся в нём информации. При этом следует допустить, что расстояние между тёмными метками имеет то же значение, что и расстояние между дорожками. Для определения этого расстояния можно рассмотреть дифракционный спектр, полученный в отражённом свете от дифракционной решётки, образованной дорожками на поверхности диска. При этом удобно использовать монохроматический источник света — бытовой лазер или лазерную указку. Направив луч лазера на край диска, можно наблюдать несколько дифракционных максимумов (рис. Л.10).

Оборудование: компакт-диск (CD), пластилин, лазерная указка, лист бумаги, линейка с миллиметровой шкалой, карандаш.

Порядок выполнения работы

1. Составьте таблицу и записывайте в неё результаты измерений, а также длину волны лазерного луча (обычно $\lambda = 0{,}6$ мкм).

2. С помощью пластилина закрепите диск на столе таким образом, чтобы плоскость диска была перпендикулярна плоскости стола.

3. Разместите лазерную указку на стопке тетрадей так, чтобы лазерный луч был параллелен столу, направлен перпендикулярно диску и попадал на его рабочую поверхность. Расстояние между выходным окном лазера и диском должно быть 100—150 мм.

4. Поместите лист бумаги за лазером и наблюдайте световые пятна, соответствующие различным порядкам дифракции.

5. Проделайте в бумаге маленькое отверстие. Поместите лист бумаги на пути луча. Лазерный луч должен проходить через отверстие и на бумаге должны появиться два симметричных пятна, соответствующие спектру первого порядка.

6. Отметьте карандашом положения этих пятен.

7. Измерьте расстояние $2l$ между этими пятнами (см. рис. Л.10).

8. Измерьте расстояние L между листом бумаги и диском.

9. Вычислите синус угла, соответствующий первому порядку дифракции:

$$\sin\alpha = \frac{l}{\sqrt{l^2 + L^2}}.$$

10. Вычислите период решётки: $d = \dfrac{\lambda}{\sin\alpha}$.

11. Измерьте линейкой ширину r рабочей зоны диска, т. е. ширину зеркальной зоны, и вычислите число дорожек на диске: $N_1 = r/d$.

12. Определите средний радиус зеркальной зоны — от центра до середины зеркальной поверхности: $R_{ср} = (R_1 + R_2)/2$, где R_1 и R_2 — малый и большой радиусы зеркальной зоны диска.

13. Вычислите среднее количество информационных меток на дорожке: $N_2 = 2\pi R_{ср}/d$.

14. Определите объём информации на диске — число бит: $N_b = N_1 N_2$.

В этой работе не имеет смысла рассчитывать погрешности, так как вы выполнили только приблизительную оценку объёма записанной на диске информации.

Рекомендация. Такой же способ оценки объёма информации можно использовать и для DVD. Вы можете это сделать и сравнить объёмы информации, записанной на разных дисках.

Контрольный вопрос

Сравните полученное значение со стандартным объёмом информации, записываемой на подобном диске. За счёт чего у вас получилось другое значение?

№ 8. НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ

Цель работы: наблюдать разного вида спектры.

Оборудование: проекционный аппарат, спектральные трубки с водородом, неоном или гелием, высоковольтный индуктор, источник питания, штатив, соединительные провода (эти приборы общие для всего класса), стеклянная пластина со скошенными гранями (на каждого учащегося).

Порядок выполнения работы

При попадании излучения нагретого твёрдого тела на призму мы получаем непрерывный (*сплошной*) спектр, состоящий из участков, окрашенных в разные цвета. Если источником света является, например, одноатомный газ, то мы получаем *линейчатый* спектр, состоящий из отдельных линий.

Наблюдать спектры можно с помощью дифракционной решётки, а также с помощью призмы. В первом случае нам помогает явление дифракции света, а во втором — явление дисперсии. В этой работе для наблюдения спектров мы используем явление дисперсии.

1. Расположите пластину горизонтально перед глазом. Сквозь грани, составляющие угол 45°, наблюдайте светлую вертикальную полоску на экране — изображение раздвижной щели проекционного аппарата.

2. Выделите основные цвета полученного сплошного спектра и запишите их в наблюдаемой последовательности.

3. Повторите опыт, рассматривая полоску через грани, образующие угол 60°. Запишите различия наблюдаемых спектров.

4. Наблюдайте линейчатые спектры водорода, гелия или неона, рассматривая светящиеся спектральные трубки сквозь грани стеклянной пластины. Запишите наиболее яркие линии спектров.

5. Объясните, почему вид спектров различен в зависимости от способа его наблюдения, для этого нарисуйте ход лучей при разных углах между гранями для лучей двух разных длин волн. Сделайте выводы.

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

§ 3. 2. $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Дж. **3.** ≈1,23 А.

§ 5. 1. ≈0,57 мм; $3{,}6 \cdot 10^{-9}$ с. **2.** $\approx 2{,}8 \cdot 10^{-4}$ м; $\approx 3{,}1 \cdot 10^{-4}$ м. **3.** $\approx 2{,}4 \times 10^{-12}$ Дж. **4.** $\alpha = \arcsin\left(\frac{Lq_pB}{m_pv}\right)$. **5.** $\frac{mv_0 \operatorname{tg}\alpha}{gl}$.

§ 10. 4. 0,2 А. **5.** 0,15 В. **6.** $\frac{B\pi r^2}{4R}(4 - \pi)$.

§ 12. 1. 0,1 Гн; 0,8 Дж. **2.** 128 Дж. **3.** $2{,}5 \cdot 10^3$.

§ 15. 1. ≈16 Н/м. **2.** ≈20 с. **3.** 0,4 м. **4.** ≈9 рад/с; $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ Дж. **5.** ≈0,071 м.

§ 20. 1. $5 \cdot 10^{-3}$ Дж. **2.** $u = 0{,}44\cos\frac{t}{3 \cdot 10^{-3}}$ (В); $i = -\frac{2}{3} \cdot 10^{-3} \sin\frac{t}{3 \cdot 10^{-3}}$ (А). **3.** $\frac{U_1}{2}$; $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$. **4.** 3.

§ 24. 1. ≈0,63 В. **2.** ≈0,28 А. **3.** 2,12 А. **4.** ≈109 Ом; 100 Гц; ≈18 мА.

§ 28. 1. На 3000. **2.** 91%; 0,1. **3.** 188 км. **4.** На 46 кВт. **5.** $1{,}04 \cdot 10^7$ Вт; $3{,}1 \cdot 10^5$ Вт.

§ 32. 1. ≈5000 м/с. **2.** π. **3.** Уменьшится в ≈4,2 раза.

§ 34. 1. 4 м/с. **2.** 40 Гц. **3.** 0. **4.** 240 Гц. **5.** $(2n + 1)340$ Гц, $n = 0, 1, 2, \ldots$.

§ 43. 1. От $\lambda_1 \approx 92$ м до $\lambda_2 \approx 565$ м. **2.** Так как антенна горизонтальна, вектор напряжённости электрического поля также расположен горизонтально. Следовательно, вектор магнитной индукции вертикален. **3.** Да, так как на Луне нет ионосферы, которая отражает радиоволны и позволяет передавать сигналы на большие расстояния.

§ 46. 1. Явление обусловлено прямолинейностью распространения света сквозь малое отверстие в ставне. **2.** Размеры полутени зависят от расстояния от непрозрачной преграды до экрана. При малом расстоянии (ноги) полутень мала, а при большом (голова) велика. Если бы фонарь был точечным источником, тени от головы и ног были бы одинаково резкими. **3.** $k \cdot 528$ об/с (где $k = 1, 2, 3, \ldots$). **4.** $x = 2l \sin\alpha = 10$ см.

§ 49. 1. ≈0,55; ≈1,24. **2.** $n = 2$. **4.** ≈44,8°. **5.** 9°. **6.** ≈3,6 м.

§ 52. 1. Изображение будет таким же чётким, но его освещённость уменьшится. **5.** 0,12 м. **6.** 2 см. **7.** 4,8 м. **8.** 3 м. **9.** $2{,}2 \cdot 10^{-3}$ с.

§ 59. 1. Светлое пятно. **2.** $\approx 5{,}2 \cdot 10^{-7}$ м. **3.** 3,75 мм. **4.** 100 нм. **5.** 7,73 мкм. **6.** 7,2 см.

§ 65. 1. С точки зрения наблюдателя на земле удар молнии в точке B (позади поезда) произошёл раньше. **2.** $\approx 10^6$ В. **4.** 0,6 м. **5.** $1{,}82 \cdot 10^{-11}$ кг. **6.** *c*.

§ 73. 1. Постоянная Планка численно равна тангенсу угла наклона прямой $E_к(\nu)$ к оси абсцисс. **2.** $\approx 1{,}5$. **3.** $\approx 4 \cdot 10^{-19}$ Дж. **4.** $2{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $5{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж; $2{,}9 \cdot 10^{-36}$ кг; $5{,}8 \cdot 10^{-36}$ кг. **5.** $8{,}1 \cdot 10^{-8}$ м. **6.** 540 нм. **7.** $1{,}8 \cdot 10^{-11}$ Кл. **8.** $5{,}7 \cdot 10^{-7}$ Па.

§ 77. 1. $2{,}19 \cdot 10^6$ м/с; $9 \cdot 10^{22}$ м/с^2. **2.** $\approx 4{,}88 \cdot 10^{-7}$ м. **3.** $5{,}14 \cdot 10^{11}$ В/м; 27,2 В. **4.** 10,2 эВ $\leqslant E <$ 12,1 эВ. **5.** $3{,}38 \cdot 10^{15}$ Гц; $3{,}78 \cdot 10^{15}$ Гц. **6.** $2{,}46 \cdot 10^{15}$ Гц. **7.** 10,2 В.

§ 81. 1. 1. **2.** ≈ 870 МэВ. **3.** F — 9, 10; Ar — 18, 22; Br — 35, 45; Cs — 55, 78; Au — 79, 118. **4.** $\approx 2{,}3$ МэВ. **5.** $\approx 0{,}1456$ а. е. м. **6.** $\approx 30{,}4$ МэВ.

§ 85. 1. Восемь α-превращений, шесть β-превращений. **2.** Через 3200 лет. **3.** В $\sqrt{2}$ раз. **4.** Позитрон и нейтрино. **5.** $7{,}5 \cdot 10^5$.

§ 91. 1. $^4_2$He **2.** 202 МэВ. **3.** 0,86 МэВ. **4.** 17,6 МэВ.

§ 109. 1. $\approx 64 \cdot 10^{23}$ кг. **2.** 248 лет. **3.** ≈ 1400 кг/м^3. **4.** Сверхгигант; 140 $R_\odot$; $\approx 2 \cdot 10^{-2}$ кг/м^3. **5.** $t \sim 1/M^3$; $10^{-3} t_\odot \approx 10^7$ лет. **6.** 75 000 пк; $3{,}26 \cdot 10^9$ лет. **7.** $1{,}9 \cdot 10^{11} L_\odot$.

ОТВЕТЫ К ОБРАЗЦАМ ЗАДАНИЙ ЕГЭ

№ задания	Параграфы								
	1	2	3	4	5	7	8	9	10
1	3	2	2	2	2	2	1	3	0,08 Кл
2		3	500 мТл	4	$2{,}4 \cdot 10^{-23}$ кг · м/с	3	1	3	0,2 м
3	3	3	45°	1	$8{,}9 \cdot 10^{-9}$ с	2	4	3	1 м/с
4	—	2	$B \geqslant \frac{2mg}{3aI}$	4	1,74 м	3	2	1	8 м/с^2
5	—	3	0,2 Тл	—	—	3	2	3	—
6	—	1	—	—	—	1	—	—	—

№ задания	Параграфы								
	13	14	17	19	20	21	22	24	32
1	1	4	3	А2; Б3	9 мА	3	2	400 Гц	2
2	3	3	1	—	$4 \cdot 10^{-4}$ с	2	3	≈209 Вт	3
3	1	1	3	—	—	—	1	—	0,05 м
4	4	—	—	—	—	—	—	—	$\frac{\upsilon_1\upsilon_2}{\nu(\upsilon_1 - \upsilon_2)}$
5	2	—	—	—	—	—	—	—	4 м
6	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15 с

№ задания	Параграфы											
	35	36	37	39	40	45	47	48	49	50	52	53
1	4	3	4	1	1	3	4	1	14	4	0,15 м	4
2	4	2	2	3	3	4	—	1	1200 м	2	20 см	1
3	2	3	—	4	2	—	—	3	28°	1	60 см	4
4	2	2	—	3	4	—	—	1	1,76 м	4	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7 м	2	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

№ задания	Параграфы								
	54	58	59	60	62	63	65	71	73
1	4	1	600	4	1	3	1 МэВ	4	410 км/с
2	4	3	0,04 м	3	1	4	1	2	0,051 м
3	2	2	0,25 мкм	—	4	1	74,25 МэВ	2	$1{,}83 \cdot 10^{-4}$ м/с^2
4	3	3	—	—	2	3	—	1	—
5	—	—	—	—	4	2	—	1	—

№ задания	Параграфы								
	75	76	77	78	80	81	83	84	85
1	3	2	$4 \cdot 10^{15}$ Гц	4	3	2	3	4	2,7 К
2	2	4	811 км/с	2	3	3	3	2	$1{,}5 \cdot 10^{7}$ м/с
3	3	3	$1{,}46 \cdot 10^{6}$ м/с	4	—	4	—	3	—
4	2	2	—	1	—	—	—	1	—
5	2	—	—	3	—	—	—	—	—

№ задания	Параграфы									
	87	88	89	91	101	103	104	106	107	108
1	3	3	2	7,55 МэВ	4	3	3	4	3	1
2	3	3	2	−1,2 МэВ	3	2	4	2	3	1
3	1	1	1	2,4 пДж	—	2	2	3	400 Мпк	3
4	1	1	—	630 млн т	—	—	—	4	—	—
5	3	—	—	589 млн т	—	—	—	—	—	—

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автоколебания 101
Адроны 361
Активность 314
Альфа-распад 312
Амплитуда колебаний 60
Аннигиляция 357
Античастица 358
Астероид 375
Астрономическая единица 367
Афелий 369

Барионы 361
Басов Н. Г. 289
Беккерель А. 310
Беккерель (единица активности) 319
Бета-распад 312
Бозон 355
Бор Н. 284

Вебер (единица магнитного потока) 33
Вектор магнитной индукции 7
Взаимодействие магнитное 5
– сильное 301
Волна 116
– акустическая 125
– де Бройля 269
– когерентная 133, 206
– плоская 123
– плоскополяризованная 137
– поперечная 117, 226
– продольная 119
– стоячая 134

Галактика активная 398
– наша 394
– неправильная 398
– спиральная 397
– эллиптическая 397
Гамма-лучи 257, 312
Генератор переменного тока 87, 105
Генри (единица индуктивности) 48
Герц Г. 146
Герц (единица частоты) 60
Гипотеза Ампера 27
– де Бройля 269
Глюон 363
Грануляции 381
Грей (единица дозы поглощённого излучения) 350
Громкоговоритель 14

Давление света 272
Деление ядер 333
Детектирование 153, 155
Дефект масс 305
Действующее значение переменного напряжения 90
– силы переменного тока 89
Дисперсия 204
Дифракция 136, 158, 213
Дифракционная решётка 218
Длина волны 120
Доза излучения 350
Домены 28

Естественный свет 226

Жолио-Кюри *И.* и *Ф.* 328

Закон Ампера 13
– Вина 381
– Кеплера второй 369
– – первый 369
– – третий 370
– отражения 175
– преломления 180
– радиоактивного распада 318
– сложения скоростей классический 237
– – – релятивистский 237
– Стефана—Больцмана 381
– фотоэффекта второй 262
– – первый 261
– – третий 265
– Хаббла 401
– электромагнитной индукции 37
Затмение лунное 372
– солнечное 371
Звезда нейтронная 390
– сверхновая 392
Зиверт (единица эквивалентной дозы поглощённого излучения) 351

Излучение видимое 204
– индуцированное 289
– инфракрасное 254
– рентгеновское 255
– спонтанное 289
– тепловое 246
– ультрафиолетовое 254
Изотопы 300, 346
Импульс релятивистский 240
Индуктивность 47
Интерференция 131
– механических волн 131
– света 206
– электромагнитных волн 158

Источник когерентный 133
– точечный 149

Катодолюминесценция 247
Квазары 398
Квант 259
Кварк 362
Колебания 53
– вынужденные 70
– гармонические 59
– Затухающие 69
– Механические 53
– свободные 54
– электромагнитные 74
Колебательный контур 74
Кольца Ньютона 208
Комета 376
Коэффициент самоиндукции 47
– трансформации 107
Красная граница фотоэффекта 264
Красное смещение 400
Курчатов И. В. 339

Лазер 289
Лебедев П. Н. 272
Ленц Э. Х. 36
Лептон 359
Линза 191
Луч 123, 148, 171

Масса критическая 338
Массовое число 300
Математический маятник 56
Мезоны 361
Метеор 376
Метеорит 377
Микрофон 41
Модель атома по Бору 285
– – протонно-нейтронная 300
– – Резерфорда 282
– – Томсона 280
Модуляция 153, 155

Нейтрино 300, 315, 389
Нейтрон 299, 328
Нуклон 300

Оптическая сила линзы 194
Опыты Герца 147
– Майкельсона—Морли 231
– Резерфорда 280
– Рёмера 172
– Фарадея 32
– Физо 173
– Юнга 213

Параллакс 368
Парсек 368
Перигелий 369
Период колебаний 60
– полураспада 318
Планк М. 259
Плотность потока излучения 148
– – – спектральная 249
Поверхность волновая 123
Позитрон 315
Показатель преломления 180, 181
Поле вихревое 9, 140
– электромагнитное 142
Полное (внутреннее) отражение 183
Поляризация 137
Попов А. С. 151
Постоянная Планка 259
– Ридберга 279
– солнечная 380
Постулаты Бора 284
Поток магнитный 33
Правило Ленца 36
Принцип Гюйгенса 174
– Гюйгенса—Френеля 214
– неопределённости Гейзенберга 270
– относительности 229
– соответствия 241
Просветление оптики 211
Протон 282, 299
Протуберанцы 382
Прохоров А. М. 289
Пульсар 390

Работа выхода 263
Радиоактивность 311
– естественная 311
– искусственная 327
Радиолокация 161
Радиоприёмник 156
Реактор ядерный 337
Реакция деления цепная 334
– термоядерная 340
– ядерная 329, 334
Резерфорд Э. 280
Резонанс 72
– акустический 136
– электрический 96
Рентген В. 255

Самоиндукция 47
Сахаров А. Д. 341
Светимость 380
Сила Ампера 13
– внешняя 53

– внутренняя 53
– Лоренца 20
– ядерная 301
Склодовская-Кюри М. 311
Склонение 366
Сопротивление активное 88
– ёмкостное 92
– индуктивное 94
– полное 94
Спектр 203
– линейчатый 251
– непрерывный (сплошной) 250
– поглощения 252
– полосатый 251
Спектральный анализ 252
Спин 28, 355
Столетов А. Г. 29, 260

Тамм И. Е. 341
Таунс Ч. 289
Телевидение 163
Температура Кюри 29
Тесла (единица магнитной индукции) 13
Ток насыщения 261
Трансформатор 106
Трек 324

Увеличение линзы 198
Угол отражения 175
– падения 174
– предельный 184
– преломления 179
– преломляющий призмы 182
Уравнение гармонической бегущей волны 123

Фабрикант В. А. 289
Фаза колебаний 62
Ферми Э. 330
Фермионы 355, 361
Ферромагнетик 28
Формула Бальмера—Ридберга 279
– линзы 197
– Томсона 81
Фотолюминесценция 248
Фотон 268
Фотоэффект 260
Френель О. 214
Фронт волны 124

Хемилюминесценция 247

Частицы виртуальные 303
Частота колебаний 60
– собственная 61, 136
– циклическая (круговая) 60
Чедвик Дж. 299
Чёрная дыра 391

ЭДС индукции 37
– самоиндукции 47
Эйнштейн А. 230
Эклиптика 365
Эксцентриситет 369
Электролюминесценция 247
Энергетический уровень 286
Энергия ионизации 287
– кинетическая релятивистская 241
– колебательного контура 75
– магнитного поля тока 49
– покоя 239
– релятивистская 241
– связи 306
– – удельная 306

Юнг Т. 207

Явление электромагнитной индукции 31
Ядро атомное 282

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (Продолжение)

Глава 1. Магнитное поле 5
§ 1. Магнитное поле. Индукция магнитного поля ..... —
§ 2. Сила Ампера 11
§ 3.* Примеры решения задач по теме «Сила Ампера» 17
§ 4. Действие магнитного поля на движущуюся заряженную частицу. Сила Лоренца 20
§ 5.* Примеры решения задач по теме «Сила Лоренца» 24
§ 6. Магнитные свойства вещества 27

Глава 2. Электромагнитная индукция 31
§ 7. Электромагнитная индукция. Магнитный поток ..... —
§ 8. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции 35
§ 9.* ЭДС индукции в движущихся проводниках 40
§ 10.* Примеры решения задач по теме «Закон электромагнитной индукции» 43
§ 11. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля 47
§ 12.* Примеры решения задач по теме «Самоиндукция. Энергия магнитного поля» 50

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Глава 3. Механические колебания 53
§ 13. Свободные колебания ..... —
§ 14. Гармонические колебания 59
§ 15.* Примеры решения задач по теме «Гармонические колебания» 66
§ 16. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс 69

Глава 4. Электромагнитные колебания 74
§ 17. Свободные электромагнитные колебания ..... —
§ 18.* Аналогия между механическими и электромагнитными колебаниями 77
§ 19. Гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре. Формула Томсона 80
§ 20.* Примеры решения задач по теме «Гармонические электромагнитные колебания» 83
§ 21. Переменный электрический ток. Резистор в цепи переменного тока 86
§ 22.* Конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока 91
§ 23. Резонанс в электрической цепи 96
§ 24.* Примеры решения задач по теме «Переменный электрический ток» 98
§ 25.* Автоколебания 101

§ 26.* Генератор переменного тока. Трансформатор 105
§ 27.* Производство, передача и потребление электрической энергии 109
§ 28.* Примеры решения задач по теме «Трансформатор. Передача электроэнергии» 113

Глава 5. Механические волны 116
§ 29. Волновые явления. Характеристики волны ..... —
§ 30.* Распространение волн в упругих средах. Уравнение гармонической бегущей волны 122
§ 31. Звуковые волны 125
§ 32.* Примеры решения задач по теме «Механические волны» 128
§ 33. Интерференция, дифракция и поляризация механических волн 131
§ 34.* Примеры решения задач по теме «Интерференция и дифракция механических волн» 138

Глава 6. Электромагнитные волны 140
§ 35. Электромагнитное поле. Электромагнитная волна ..... —
§ 36.* Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн. Плотность потока электромагнитного излучения 146
§ 37.* Изобретение радио А. С. Поповым. Принципы радиосвязи 151
§ 38.* Модуляция и детектирование 155
§ 39. Свойства электромагнитных волн 157
§ 40.* Распространение радиоволн. Радиолокация 160
§ 41.* Понятие о телевидении 163
§ 42. Развитие средств связи 166
§ 43.* Примеры решения задач по теме «Электромагнитные волны» 168

ОПТИКА

Глава 7. Световые волны 172
§ 44. Скорость света ..... —
§ 45. Принцип Гюйгенса. Закон отражения света 174
§ 46.* Примеры решения задач по теме «Закон прямолинейного распространения света. Законы отражения света» 176
§ 47. Законы преломления света 179
§ 48. Полное отражение света 183
§ 49.* Примеры решения задач по теме «Закон преломления света. Полное отражение света» 187
§ 50. Линзы. Построение изображений в линзе 191
§ 51. Формула тонкой линзы. Увеличение линзы 197
§ 52.* Примеры решения задач по теме «Линзы» 199
§ 53. Дисперсия света 203
§ 54. Интерференция света 206
§ 55.* Некоторые области применения интерференции 211

§ 56. Дифракция света 213
§ 57.* Границы применимости геометрической оптики 216
§ 58. Дифракционная решётка 218
§ 59.* Примеры решения задач по теме «Интерференция и дифракция света» 221
§ 60. Поперечность световых волн. Поляризация света 225

Глава 8. Элементы теории относительности 229
§ 61.* Законы электродинамики и принцип относительности ..... —
§ 62. Постулаты теории относительности 232
§ 63. Основные следствия из постулатов теории относительности 236
§ 64. Элементы релятивистской динамики 239
§ 65.* Примеры решения задач по теме «Элементы специальной теории относительности» 242

Глава 9. Излучение и спектры 246
§ 66. Виды излучений. Источники света ..... —
§ 67.* Спектры и спектральный анализ 249
§ 68. Шкала электромагнитных волн 254

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 10. Световые кванты 260
§ 69. Фотоэффект ..... —
§ 70.* Применение фотоэффекта 266
§ 71. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм 268
§ 72.* Давление света. Химическое действие света 272
§ 73.* Примеры решения задач по теме «Световые кванты. Фотоэффект» 275

Глава 11. Атомная физика 279
§ 74. Строение атома. Опыты Резерфорда ..... —
§ 75. Квантовые постулаты Бора. Модель атома водорода по Бору 284
§ 76.* Лазеры 289
§ 77.* Примеры решения задач по теме «Атомная физика» 294

Глава 12. Физика атомного ядра 299
§ 78. Строение атомного ядра. Ядерные силы ..... —
§ 79.* Обменная модель ядерного взаимодействия 303
§ 80. Энергия связи атомных ядер 305
§ 81.* Примеры решения задач по теме «Энергия связи атомных ядер» 308
§ 82. Радиоактивность 310
§ 83.* Виды радиоактивного излучения 313
§ 84. Закон радиоактивного распада. Период полураспада 318
§ 85.* Примеры решения задач по теме «Закон радиоактивного распада» 321

§ 86.* Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц ... 323
§ 87. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции ... 327
§ 88. Деление ядер урана. Цепная реакция деления ... 332
§ 89.* Ядерный реактор ... 337
§ 90. Термоядерные реакции ... 340
§ 91.* Примеры решения задач по теме «Ядерные реакции» ... 342
§ 92. Применение ядерной энергии ... 344
§ 93.* Изотопы. Получение и применение радиоактивных изотопов ... 346
§ 94.* Биологическое действие радиоактивных излучений ... 350

Глава 13. Элементарные частицы ... 353
§ 95. Три этапа в развитии физики элементарных частиц ... —
§ 96. Открытие позитрона. Античастицы ... 357
§ 97.* Лептоны ... 359
§ 98.* Адроны. Кварки ... 361

АСТРОНОМИЯ

Глава 14. Солнечная система ... 365
§ 99.* Видимые движения небесных тел. Законы Кеплера ... —
§ 100. Система Земля—Луна ... 371
§ 101. Физическая природа планет и малых тел Солнечной системы ... 374

Глава 15. Солнце и звёзды ... 379
§ 102. Солнце ... —
§ 103. Основные характеристики звёзд ... 384
§ 104.* Внутреннее строение Солнца и звёзд ... 388
§ 105. Эволюция звёзд: рождение, жизнь и смерть звёзд ... 392

Глава 16. Строение Вселенной ... 394
§ 106. Млечный Путь — наша Галактика ... —
§ 107. Галактики ... 397
§ 108.* Строение и эволюция Вселенной ... 402
§ 109.* Примеры решения задач по теме «Астрономия» ... 406

Заключение ... 408
Единая физическая картина мира ... —

Лабораторные работы ... 413
Ответы к задачам для самостоятельного решения ... 422
Ответы к образцам заданий ЕГЭ ... 424
Предметно-именной указатель ... 426

Учебное издание

Серия «Классический курс»

Мякишев Геннадий Яковлевич
Буховцев Борис Борисович
Чаругин Виктор Максимович

ФИЗИКА

11 класс

Учебник для общеобразовательных организаций

Базовый и углублённый уровни

Редакция физики
Заведующий редакцией *В. В. Жумаев*
Ответственный за выпуск *Н. В. Мелешко*
Редакторы *Н. В. Мелешко, Г. Н. Федина*
Художники *В. С. Давыдов, М. Е. Савельева*
Художественный редактор *Т. В. Глушкова*
Компьютерная вёрстка и техническое редактирование *О. В. Сиротиной*
Корректор *Н. В. Бурдина*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93— 953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать 07.02.19. Формат 70×90$^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookCSanPin. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 29,25 + 0,48 форз. + 0,58 вкл. Доп. тираж 25 000 экз. Заказ № 3888УДП.

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».
Российская Федерация, 127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3, этаж 4, помещение I.

Предложения по оформлению и содержанию учебников — электронная почта «Горячей линии» — fpu@prosv.ru.

Отпечатано в России.

Отпечатано по заказу АО «ПолиграфТрейд»
в АО «Первая Образцовая типография»,
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ».
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14.

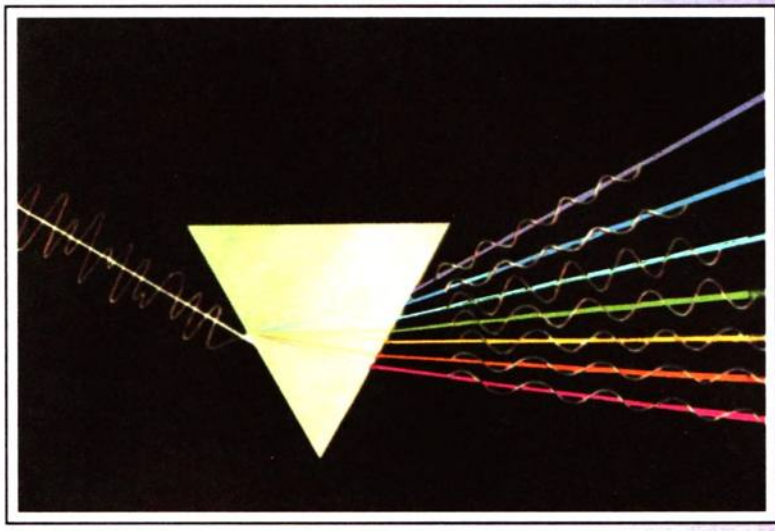


Рис. I. Схема разложения белого света с помощью призмы. Различным цветам соответствуют различные длины волн. Никакой определённой длины волны белому свету не соответствует.

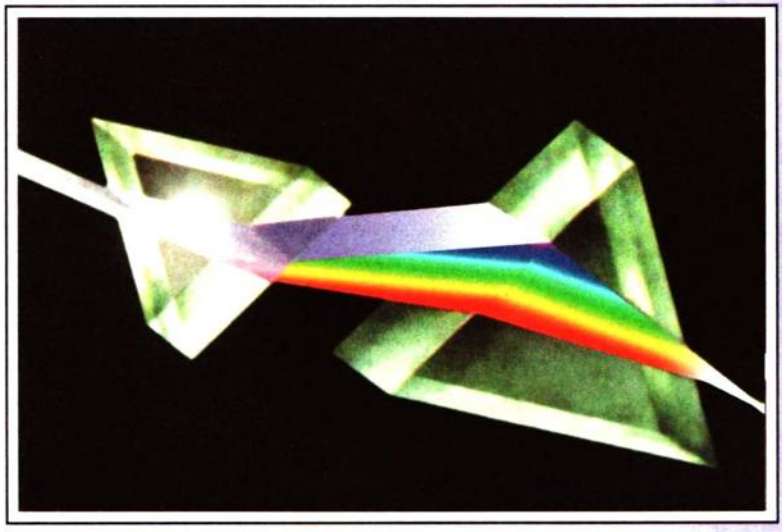


Рис. II. Разложение и синтез белого света с помощью призм.

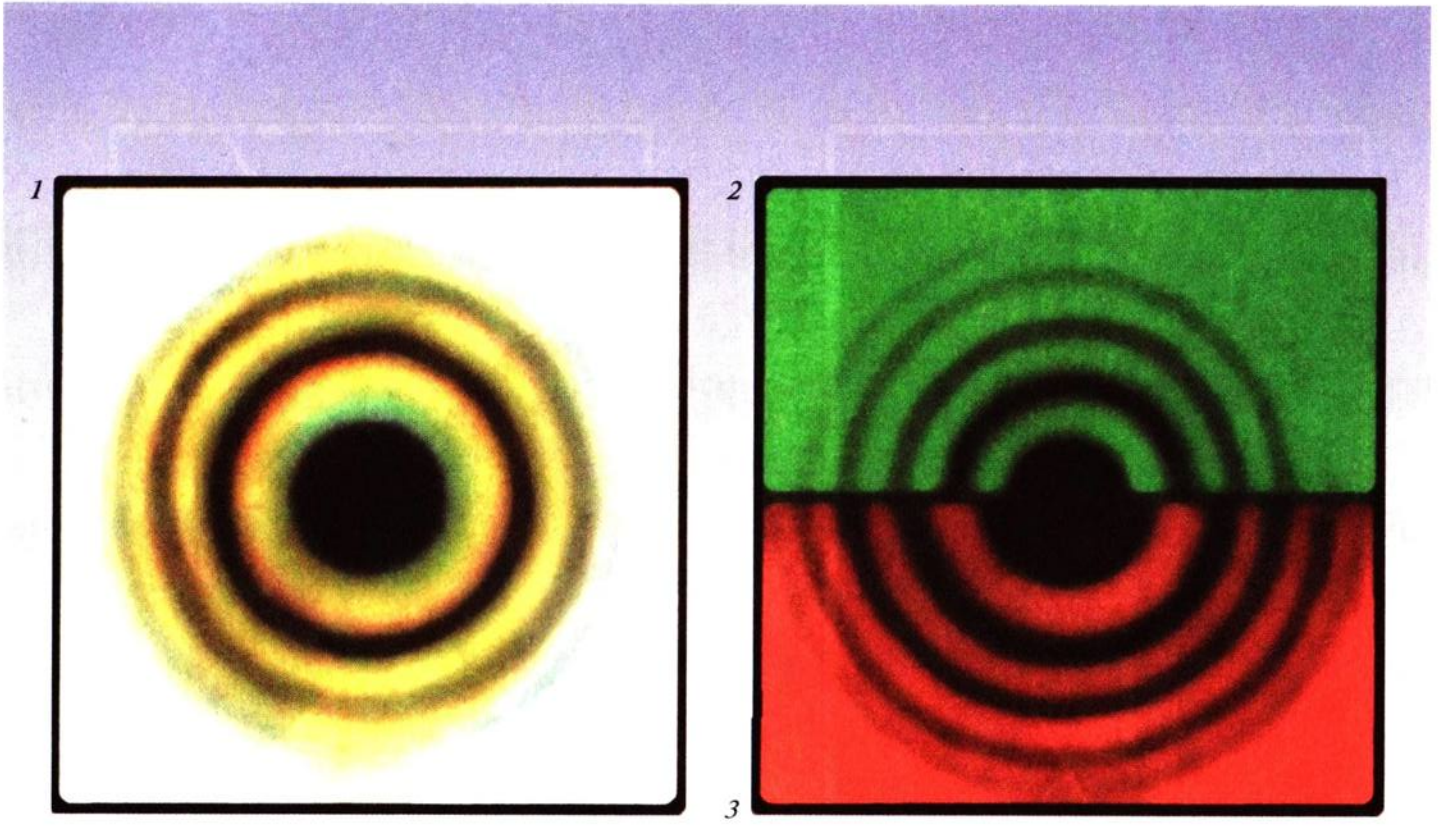


Рис. III. Кольца Ньютона в отражённом свете: *1* – в белом; *2* – в зёленом; *3* – в красном.

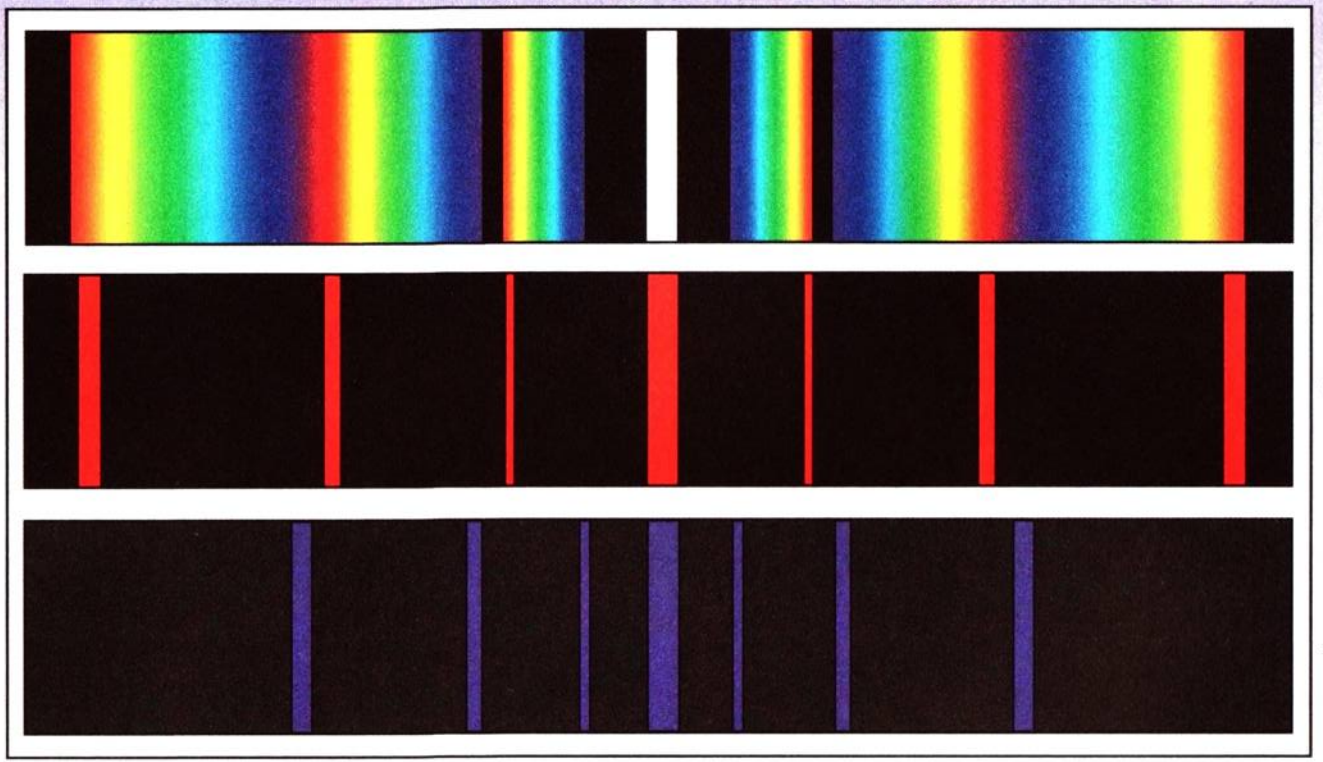


Рис. IV. Спектры, полученные с помощью дифракционной решётки: *1* – для белого света; *2* – для монохроматического красного света; *3* – для монохроматического фиолетового света.

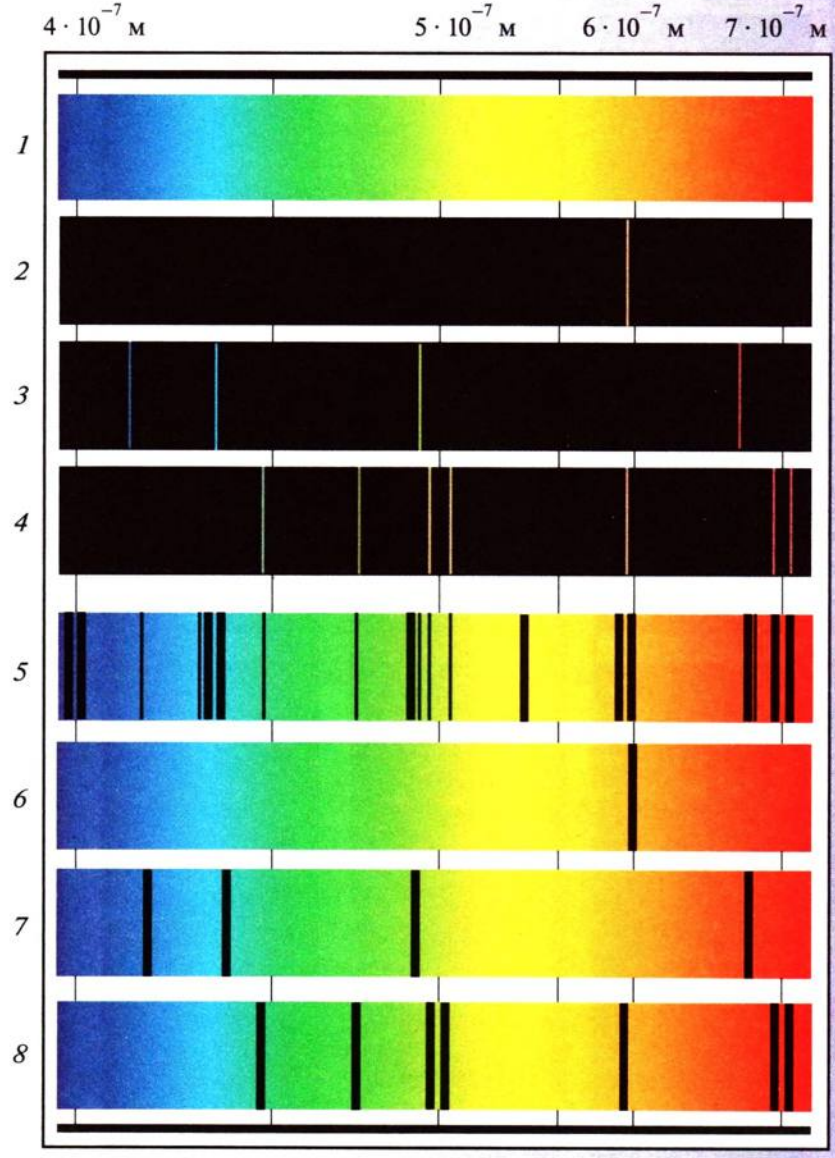


Рис. V. Спектры испускания: *1* – сплошной; *2* – натрия; *3* – водорода; *4* – гелия. Спектры поглощения: *5* – солнечный; *6* – натрия; *7* – водорода; *8* – гелия.

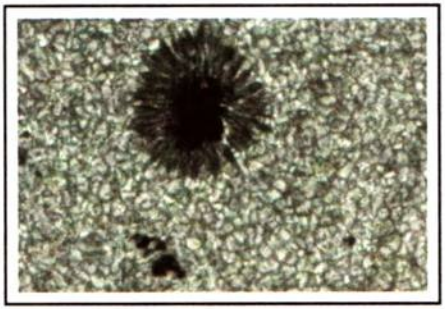


Рис. VI. Пятно и грануляция на Солнце.



Рис. VII. Фотография ядра кометы Галлея.

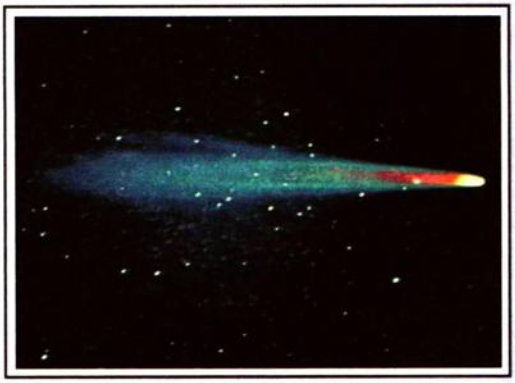


Рис. VIII. Комета Галлея.

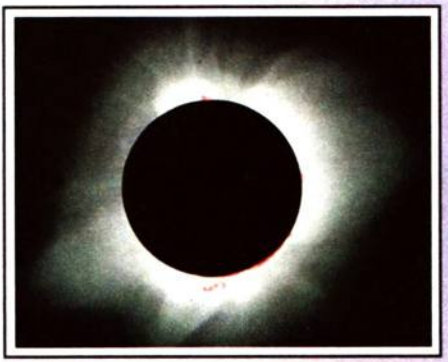


Рис. IX. Солнечная корона и протуберанец во время полного солнечного затмения.

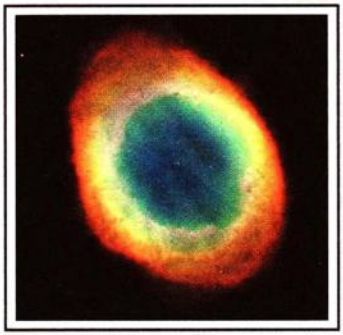


Рис. X. Планетарная туманность Кольцеобразная в созвездии Лира.



Рис. XI. Спиральная галактика Водоворот.

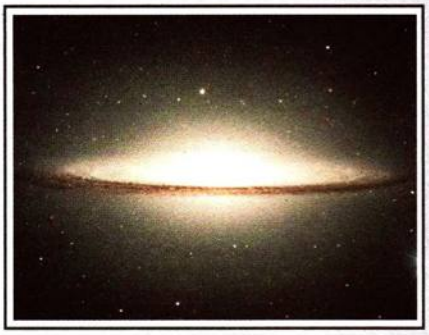


Рис. XII. Спиральная галактика Сомбреро, видимая с ребра.

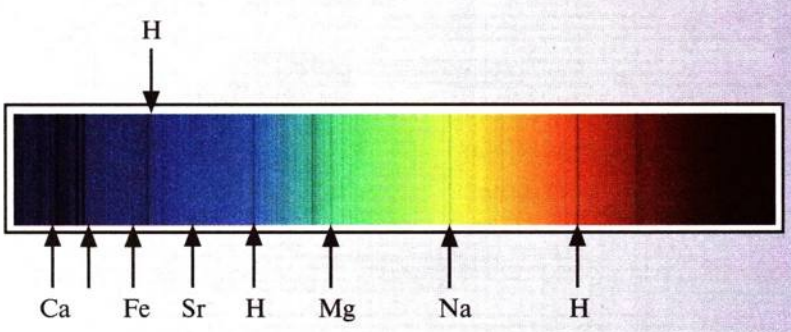


Рис. XIII. Солнечный спектр.

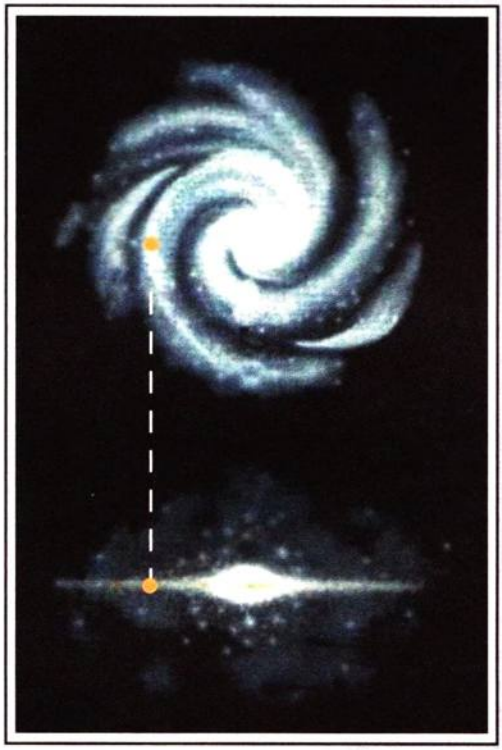


Рис. XIV. Схема строения Млечного Пути.



Рис. XV. Тесная двойная система с чёрной дырой в созвездии Лебедя.

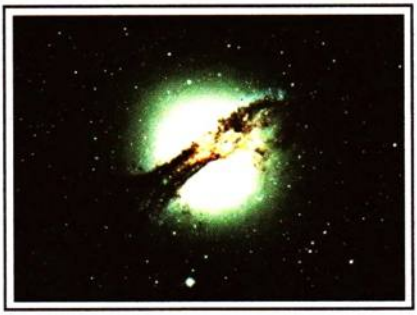


Рис. XVI. Радиогалактика Центавр А.



Рис. XVII. Туманность Ориона.

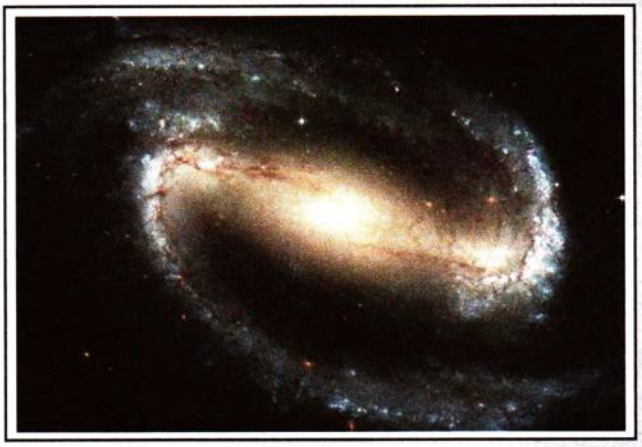


Рис. XVIII. Спиральная галактика с перемычкой.

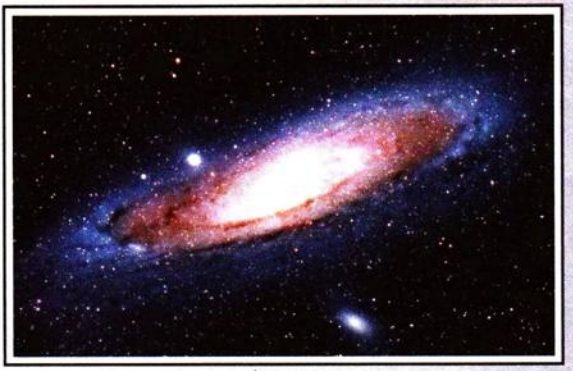
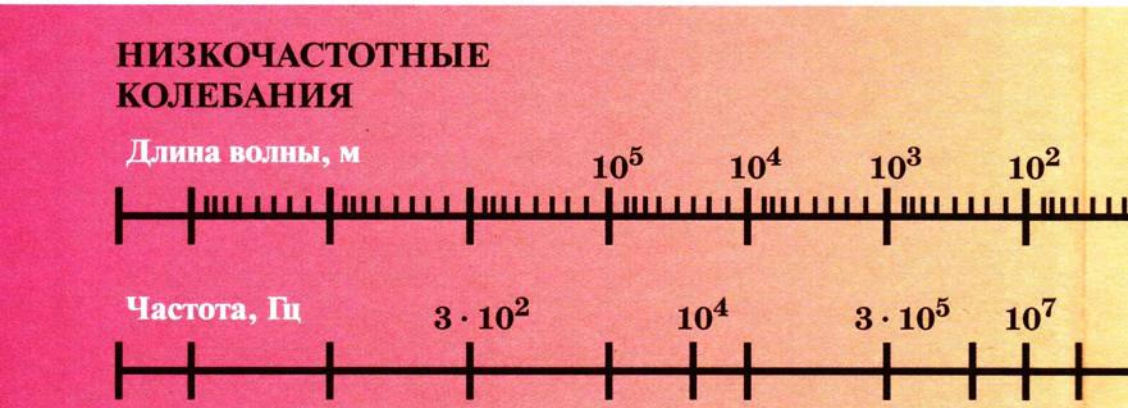
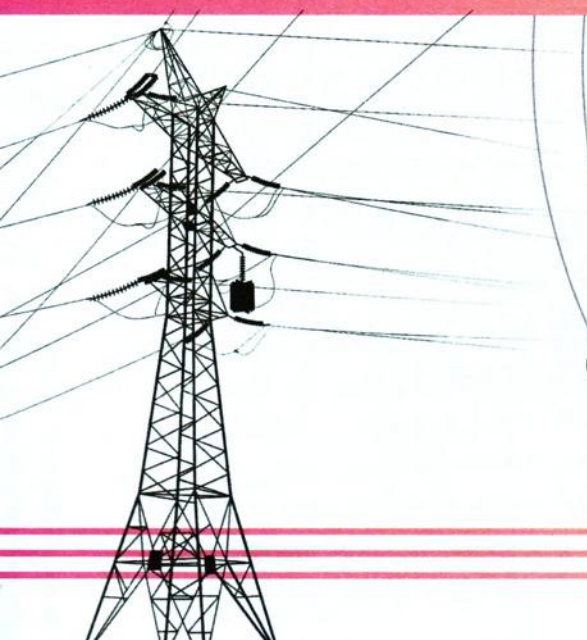


Рис. XIX. Туманность Андромеды.

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГН

ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧ

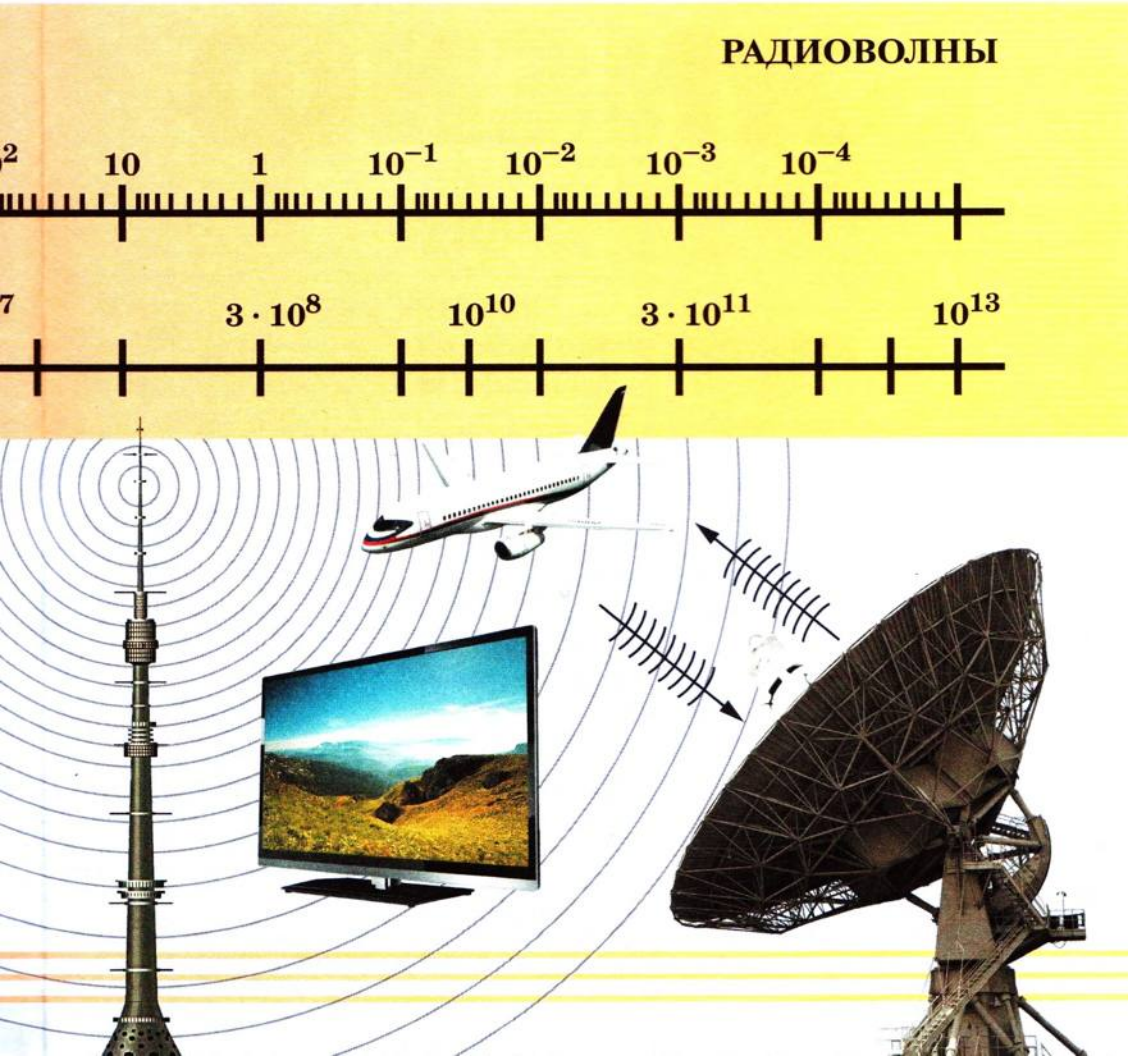






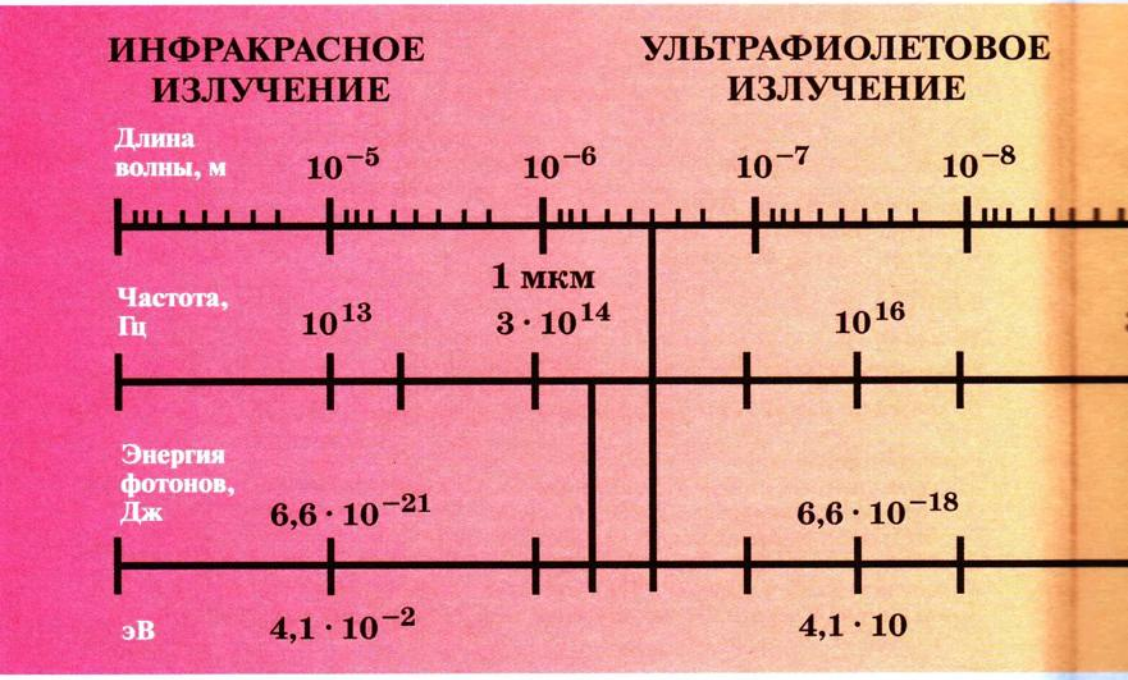
ТНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

ИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ



ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИ

ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛЕКУЛ





ВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

