

ФИЗИКА

Учебник

11

Общественно-гуманитарное
направление

Раздел I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Глава 1. Механические колебания

Глава 2. Электромагнитные колебания

Глава 3. Переменный ток

Раздел II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 4. Электромагнитные волны

Раздел III. ОПТИКА

Глава 5. Волновая оптика

Глава 6. Геометрическая оптика

Раздел IV. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 7. Атомная и квантовая физика

Глава 8. Физика атомного ядра

Раздел V. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Глава 9. Нанотехнология и наноматериалы

Раздел VI. КОСМОЛОГИЯ

Глава 10. Космология

Условные
обозначения:Практические
заданияТворческие
заданияЗадания для
развития
критического
мышленияВопросы для
самоконтроляЗадачи для
самостоятель-
ного решения■ Задания
средней
сложности* Задания
повышенной
сложностиМатериал для
дополнитель-
ного чтения

Предисловие

Дорогие учащиеся! 11 класс — последний год обучения в школе, поэтому вам необходимо приложить максимальные усилия, чтобы каждый день был предельно насыщенным и полезным для вас.

Школьное образование станет начальной ступенью к освоению вами вершин профессиональных знаний. В современном мире в ходе глобального развития цивилизации приоритетное место начинает занимать наука. Ее достижения дали начало таким новым отраслям, как инженерная генетика, атомная энергетика, лазерная техника, микроэлектроника, космическая техника, спутниковая система связи. На данном этапе современной истории создано новейшее оборудование, компьютеры, которые способствуют дальнейшему развитию человеческого интеллекта; быстрое развитие нанотехнологии и ее достижения стремительно меняют современный мир. Сегодня наука поднялась на более высокий уровень. Решающая заслуга в этом принадлежит физике, которая является основополагающей для многих других наук.

Основой физики являются теоретические и экспериментальные исследования. В результате этого появляются новые виды систем связи и транспорта, которые сближают континенты и человеческие сообщества между собой, продолжаются исследования космоса, создаются новые искусственные биологические виды. Физические методы исследования заняли доминирующее положение в геологии, медицине, квантовой химии, молекулярной биологии и биофизике. В последние столетия сделаны невероятные открытия на переднем крае науки — в физике элементарных частиц. Мы становимся свидетелями сотворения нового мира.

Учебник включает много новых разделов, затрагивающих самые передовые области знаний: механические и электромагнитные колебания и волны; волновая оптика; теория относительности; атомная и ядерная физика; физика элементарных частиц. То есть материал учебника охватывает все разделы физики, которые вы изучали ранее, но освещает их на более высоком научном и методическом уровне, чтобы у вас создалось целостное представление о физике — науке. Не опускайте рук. «Упорный и терпеливый увидит благоприятный конец начатого дела, ищущий знания, найдет его». Знания становятся организующей основой мирового сообщества. Желаем успехов в достижении поставленной цели!

Авторы

Раздел I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Глава 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 1. Уравнения и графики механических гармонических колебаний



Ключевые понятия:

- ✓ колебания
- ✓ период, частота, амплитуда колебаний
- ✓ уравнения гармонических колебаний
- ✓ графики гармонических колебаний

На этом уроке вы:



- расширите и углубите свои знания о гармонических механических колебаниях;
- экспериментально, аналитически и графически изучите законы механических гармонических колебаний.

Колебательное движение. В природе и в повседневной жизни широко распространен особый вид процессов, в котором все его характеристики принимают одинаковое значение через равные промежутки времени. Такой процесс называется *периодическим*. В механике, если материальная точка (тело) движется вблизи положения равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону, то такое периодическое движение называется колебательным. Таким образом, *колебательным называется периодический процесс, в котором любая физическая величина, характеризующая его, поочередно принимает то положительное, то отрицательное значение относительно положения устойчивого равновесия*. Вокруг нас постоянно происходит множество различных колебательных процессов: дети качаются на качелях, рабочий пользуется отбойным молотком, по мосту проходит транспорт, работают линии электропередач, люди разговаривают, поют, играют на струнных инструментах (рис 1.1).

С понятием колебаний и некоторыми их характеристиками вы познакомились в 9 классе.

Это вы знаете

Движения, или процессы, которые через более или менее равные промежутки времени регулярно повторяются, называются колебаниями. Колебания — это периодический процесс.

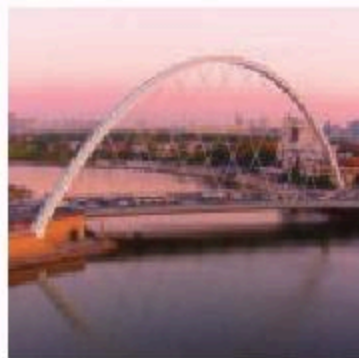
По физической природе периодического процесса колебания разделяются на механические и электромагнитные. Оказалось, что законы изменения характеристик колебаний различной природы одинаковы,



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.1. Примеры колебаний различной природы

они могут быть описаны одинаковыми уравнениями. Колебательные движения различной природы характеризуются одними и теми же параметрами. Поэтому мы будем изучать в этой главе сначала механические, потом по аналогии электромагнитные колебания.

Это вы знаете

Основные характеристики колебаний:

Период колебаний T — это минимальный промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание. Измеряется в секундах.

Частота колебаний ν — это число колебаний в одну секунду, величина, обратная периоду:

$\nu = \frac{1}{T}$. Измеряется в герцах (Гц), имеет размерность s^{-1} .

Амплитуда колебаний — это максимальное значение, которое может принять изменяющаяся физическая величина.

Физическая система, в которой могут существовать свободные колебания, называется колебательной системой.

Колебательная система, выведенная из равновесия и предоставленная сама себе, совершает свободные (собственные) колебания. Частота (период) таких колебаний определяется физическими параметрами колебательной системы.

Механические гармонические колебания. Механическими колебаниями называются периодические (или почти периодические) изменения физической величины, описывающей механическое движение (скорость, смещение, кинетическая и потенциальная энергия и т. п.). Например, механические колебания совершает маленький массивный шарик, закрепленный к свободному концу упругой пружины, если верхний конец ее закрепить к потолку, затем растянуть пружину и отпустить.

Равномерное движение материальной точки по окружности также является периодическим, так как через каждый полный оборот она возвращается в исходное положение. При этом проекция материальной точки на плоскость, перпендикулярную плоскости окружности, будет совершать колебания (рис. 1.2).

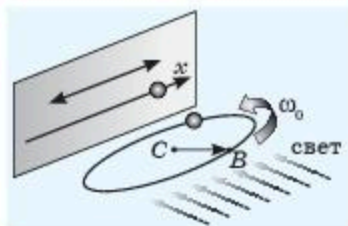


Рис. 1.2

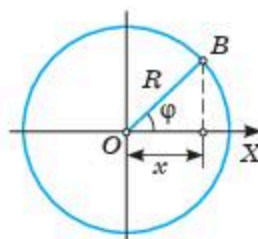


Рис. 1.3. Схема опыта "Движение по окружности и колебания"

Как видно из рисунка 1.3, при равномерном вращении материальной точки B по окружности координата x (смещение) ее проекции на плоскость, перпендикулярную плоскости окружности будет совершать колебательное движение вдоль оси Ox .

Периодические изменения физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса в зависимости от времени, называются гармоническими колебаниями. Уравнениями гармонических колебаний являются:

$$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1)$$

$$x = x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1.2)$$

В этих уравнениях: x — смещение, x_m — амплитуда колебаний, ω_0 — циклическая или круговая частота собственных колебаний, t — время. Величина, стоящая под знаком косинуса $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, называется **фазой гармонического колебания**. При $t = 0$ $\varphi = \varphi_0$, поэтому φ_0 называют **начальной фазой**.

В механических колебаниях колеблющейся величиной могут быть: смещение x тела от положения равновесия, скорость, ускорение, механическая энергия.

Рассмотрим графики гармонических колебаний при различных значениях амплитуды колебаний x_m , периода T (или частоты ν), а также начальной фазы φ_0 (рис. 1.4).

На рисунке 1.4, а представлены графики уравнения (1.1) для двух разных значений амплитуды колебаний $x'_m > x_m$ с одинаковыми значе-

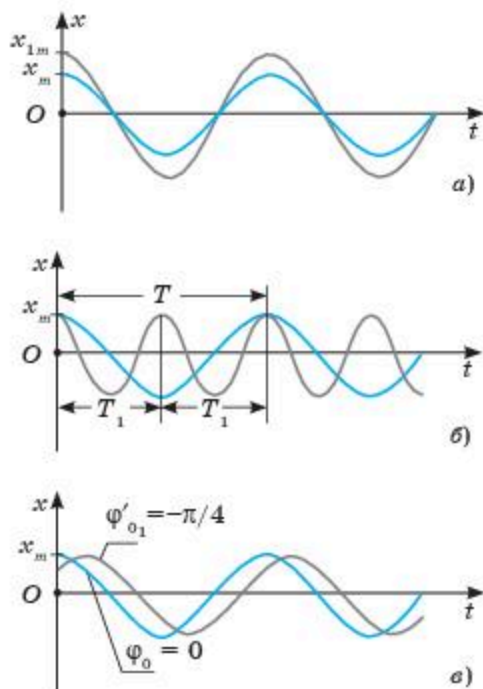


Рис. 1.4. Графики гармонических колебаний

ниями периода колебаний и начальной фазы $\varphi_0 = 0$.

Графики гармонических колебаний на рисунке 1.4, б отличаются только значениями периода колебаний $T = 2T'$.

На рисунке 1.4, в представлены графики гармонических колебаний с разными значениями начальной фазы.

Если материальная точка совершает гармонические колебания, то при этом периодически изменяются также ее скорость и ускорение. Скорость материальной точки определяется как производная от смещения $v = v_x = x' = [x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)]' = -x_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Последнее выражение можно привести к виду:

$$v = v_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (1.3)$$

Здесь $v_m = \omega_0 x_m$ — амплитуда колебаний скорости.

Сравнивая выражения (1.1) и (1.3), можно увидеть, что колебания скорости опережают колебания смещения по фазе на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 1.5, а и б). Это означает, что максимальные по модулю значения скорости достигаются в те моменты времени, когда тело проходит через положения равновесия ($x = 0$).

Ускорение $a = a_x$ тела при гармонических колебаниях определяется как производная от скорости:

$$a = v'(t) = -\omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 x(t). \quad (1.4)$$

Формулу (1.4) можно привести к виду:

$$a = -a_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi). \quad (1.5)$$

Здесь $a_m = \omega_0^2 x_m$ амплитуда колебаний ускорения материальной точки.

Знак “-” в выражении (1.4) означает, что ускорение $a(t)$ всегда имеет знак, противоположный знаку смещения $x(t)$, следовательно, по второму закону Ньютона сила, заставляющая тело совершать гармонические колебания, направлена всегда в сторону положения равновесия ($x = 0$).

Сравнивая выражения (1.1) и (1.5) приходим к выводу, что колебания смещения и ускорения колеблющейся точки всегда происходят в противофазе (рис. 1.4, а, в).

Энергия механических колебаний. В процессе механических колебаний происходит непрерывное превращение кинетической энергии колебательной системы в потенциальную энергию, и обратно.

Определим кинетическую энергию по известной формуле:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Подставим сюда скорость колебаний $v = x'(t) = -x_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$:

$$E_k = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

Учитывая соотношение $\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$, найдем кинетическую энергию по формуле:

$$E_k = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Таким образом, в процессе механических колебаний кинетическая энергия системы совершает также гармонические колебания, но с частотой, в два раза превышающей частоту самих колебаний. *Потенциальную энергию* определим по формуле: $E_p = \frac{kx^2}{2}$. Подставив сюда

$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ получим: $E_p = \frac{kx_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$; учитывая, что $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$;

$k = \omega_0^2 m$, $\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}$, получим:

$$E_p = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{4} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Таким образом, потенциальная энергия системы также изменяется с циклической частотой, равной $2\omega_0$.

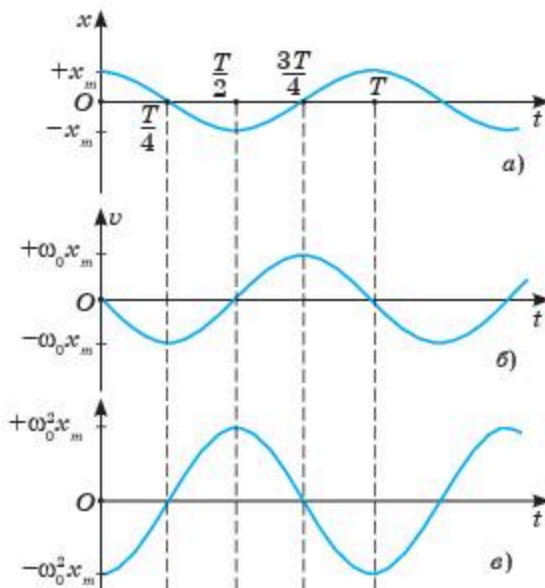


Рис. 1.5. Графики колебаний смещения, скорости и ускорения тела, совершающего гармонические колебания.

Определим полную энергию системы:

$$E = E_k + E_p = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) + 1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Отсюда:

$$E = \frac{mx_m^2 \omega_0^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}. \quad (1.6)$$

Полная энергия системы не зависит от времени и для гармонических колебаний является постоянной величиной.

Запомните

Мы рассмотрели закономерности свободных гармонических колебаний идеальной колебательной системы, в которой отсутствует рассеяние энергии. В реальных колебательных системах всегда в той или иной мере происходит рассеяние энергии колебаний и колебания постепенно затухают.

Моделью колебательной системы, совершающей гармонические колебания, могут быть математический и пружинный маятник.

Это вы знаете

Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на нерастяжимой и невесомой нити, находящуюся в поле силы тяжести (рис. 1.5, а).

На практике математическим маятником может служить тело небольших размеров, подвешенное на тонкой нерастяжимой нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой тела (рис. 1.5, а).

Пружинный маятник — это колебательная система, состоящая из абсолютно упругой, невесомой пружины и материальной точки (маленького массивного шарика) массы m (рис. 1.6, б, в). Период колебаний математического маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.7)$$

Период собственных колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1.8)$$

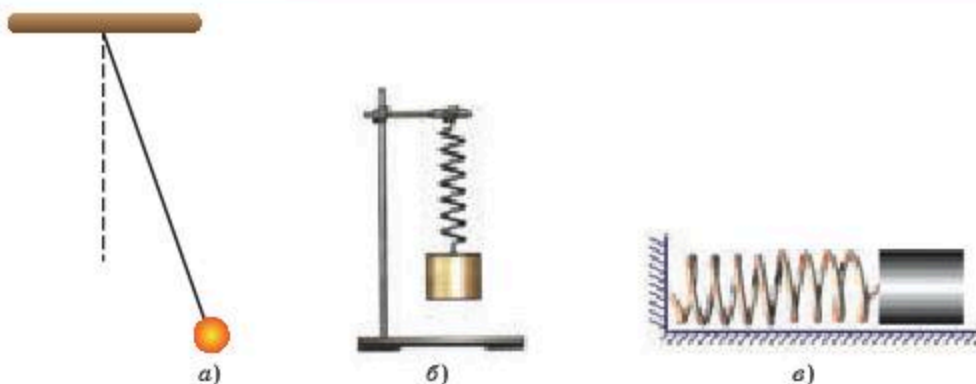


Рис. 1.6. Математический (а) и пружинный (б, в) маятники

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Маятник Фуко — это экспериментальный прибор, с помощью которого можно наглядно наблюдать суточное вращение Земли (рис. 1.7).

Его изобрел французский физик, член Парижской Академии наук, Жан Бернар Леон Фуко (родился в Париже 18 сентября 1819 года).

Впервые Жан Фуко продемонстрировал свой эксперимент 8 января 1851 года под куполом Пантеона в Париже. Маятник Фуко представляет собой стальную проволоку длиной 67 м.

К концу проволоки Фуко прикрепил груз весом 28 кг, а на нижней стороне груза закрепил металлический стержень, и подвесил маятник к вершине купола Пантеона. Под маятником соорудили круглое ограждение диаметром примерно в три метра, центр которого находился ровно под острием стержня, и насыпали на него песок. Маятник отклонили от вертикали и отпустили, он начал колебаться, сбрасывая острием стержня песок при прохождении стержня через ограждение. Самое интересное — при каждом последующем качании он сбрасывал песок примерно в трех миллиметрах от предыдущего места. Это означает, что плоскость колебаний маятника относительно пола поворачивается по часовой стрелке. Примерно за 32 часа плоскость колебаний совершила полный оборот и вернулась в прежнее положение. Почему так происходит? На круге из песка есть точка, максимально близкая к северному полюсу — а значит, она ближе к земной оси, чем центр. При повороте Земли на 360° северный край кольца будет двигаться по кругу меньшего радиуса, чем центр, и за сутки пройдет меньшее расстояние. Эту разницу и отражает маятник Жан Фуко. Таким образом, с помощью эксперимента Фуко было наглядно продемонстрировано суточное вращение Земли. В разное время маятники Фуко были установлены: в Исаакиевском соборе (Санкт-Петербург), японском городе Нагасаки в храмовом комплексе Фукусайдзи, в базилике Сан-Петронио (Болонья), в костеле Святых Иоаннов (Вильнюс) и т.д.



Рис. 1.7. Маятник Фуко в Парижском Пантеоне



1. Как можно отличить колебания от всех других видов движения?
2. Приведите примеры колебательных процессов
3. Какие колебания называются гармоническими?
4. Напишите уравнение гармонических колебаний
5. Что называют амплитудой колебаний? Периодом? Частотой?
6. Как изменяются скорость и ускорение материальной точки в процессе гармонических колебаний?
7. От каких физических величин зависит период собственных колебаний математического маятника?
8. От каких физических величин зависит период собственных колебаний пружинного маятника?
9. Как из подручных средств можно сделать математический маятник?
10. Можно ли самостоятельно сконструировать пружинный маятник? Объясните как.



Из приведенного на рисунке 1.8 графика определите амплитуду, период и частоту, начальную фазу колебаний.



Рассмотрите картинки на рисунке 1.1. Расскажите, какие колебания происходят в каждом примере, и объясните какова их природа. Напишите краткий рассказ.

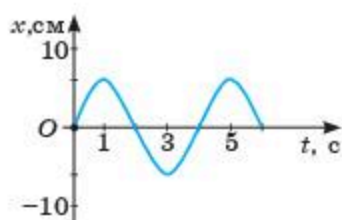


Рис. 1.8



Длина математического маятника увеличивается, масса пружинного маятника уменьшается. Как при этом изменяются остальные параметры? Заполните таблицу 1.1, используя слова: уменьшится, увеличится, не изменится.

Таблица 1.1

Маятник	Амплитуда	Период	Частота	Полная энергия
Математический				
Пружинный				

Примеры решения задач

1. Уравнение колебаний материальной точки: $x = 10\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ см. Определите амплитуду, начальную фазу, период колебаний. Определите скорость материальной точки в момент времени $t = 2$ с?

Дано:

$$x = 10\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ см}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$x_m \text{ — ? } \varphi_0 \text{ — ? } T \text{ — ?}$$

$$v \text{ — ?}$$

Решение. Сравнив уравнение колебаний, данное в условии задачи с уравнением гармонических колебаний $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ легко определить: $x_m = 10$ см, $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$, $\omega_0 = \pi$,
 $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{6,28}{3,14\text{с}^{-1}} = 2 \text{ с}.$

Уравнение скорости колебаний материальной точки:

$$v = x'(t) = -x_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -10\pi \sin\left(2\pi + \frac{\pi}{3}\right);$$

$$v = -31,4 \cdot 0,87 = -27,3 \text{ см/с.}$$

Знак “-” указывает на то, что в момент времени $t = 2$ с направление скорости совпадает с отрицательным направлением оси x .

2. Математический маятник за 20 секунд совершает 10 полных колебаний. Определите длину этого маятника.

Дано:

$$t = 20 \text{ с}$$

$$N = 10$$

$$l = ?$$

Решение. Период колебаний маятника определим по формуле: $T = \frac{t}{N}$. С другой стороны, период математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

$$\frac{t}{N} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ возведем в квадрат: } \frac{t^2}{N^2} = 4\pi^2 \frac{l}{g},$$

$$\text{отсюда: } l = \frac{t^2 \cdot g}{N^2 \cdot 4\pi^2} = \frac{400 \cdot 9,8}{100 \cdot 4 \cdot 9,86} \approx 1 \text{ м.}$$

$$l \approx 1 \text{ м.}$$



Упражнение 1

1. Материальная точка за промежуток времени $\Delta t = 1,0$ мин совершила $N = 120$ колебаний. Определите период T , частоту ν и циклическую частоту ω колебаний материальной точки.

Ответ: 0,5 с; 2 Гц; 12,56 рад/с.

2. Уравнение колебаний материальной точки имеет вид: $x = 5 \cos \pi t$ см. Найдите амплитуду, период и частоту колебаний.

Ответ: 5 см; 2 с; 0,5 Гц.

3. Напишите уравнение и нарисуйте график гармонического колебания, если амплитуда колебаний равна 7 см, частота колебаний 0,5 Гц, начальная фаза равна нулю.

Ответ: $x = 7 \cos \pi t$ см.

4. Какую длину имеет математический маятник с периодом колебаний $T = 1$ с?

Ответ: $l \approx 25$ см.

5. Длину нити математического маятника увеличили в два раза. Во сколько раз в результате изменилась частота колебаний?

Ответ: уменьшилась в 1,41 раза.

6. За одно и то же время один математический маятник совершил $n_1 = 20$, а второй маятник — $n_2 = 40$ колебаний. Как соотносятся их длины?

Ответ: $l_1/l_2 = 4$.

Самое важное в главе 1

Физическая система, в которой могут существовать свободные колебания, называется колебательной системой.

Механическими гармоническими колебаниями называются изменения смещения тела x от положения равновесия, скорости и ускорения, происходящие по закону синуса или косинуса в зависимости от времени.

Уравнения гармонических колебаний:

$$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

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

Полная энергия механических колебаний:

$$E = \frac{m x_m^2 \omega_0^2}{2}.$$

Период колебаний математического маятника

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

Период колебаний пружинного маятника:

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

Глава 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

§2. Свободные электромагнитные колебания



Ключевые понятия:

- ✓ электромагнитные колебания
- ✓ катушка
- ✓ конденсатор
- ✓ колебательный контур
- ✓ энергия электрического поля
- ✓ энергия магнитного поля
- ✓ электродвижущая сила самоиндукции

На этом уроке вы:



- изучите условия возникновения свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре;
- познакомитесь с закономерностями изменения электромагнитной энергии с течением времени в колебательном контуре.

Это вы знаете

По физической природе колебания разделяются на механические и электромагнитные. Законы изменения характеристик колебаний различной природы одинаковы, они могут быть описаны одинаковыми уравнениями. Колебательные движения различной природы характеризуются одними и теми же параметрами.

Перейдем к изучению электромагнитных колебаний. Электромагнитные колебания имеют важное практическое значение.

На использовании электромагнитных колебаний основана выработка электрической энергии, вся электротехника и радиоэлектроника, работа всех современных радиотехнических устройств и т. д. В электромагнитных колебаниях периодически изменяются: величина заряда, напряжение, сила тока, напряженность электрического поля, индукция магнитного поля и другие электродинамические величины.

Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре. *Электромагнитными колебаниями называются периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, сопровождающиеся взаимными превращениями энергии электрического и магнитного полей.*

Свободные электромагнитные колебания можно возбудить, подключив заряженный конденсатор к катушке индуктивности. В такой колебательной системе возникают затухающие колебания, так как сообщенная системе энергия расходуется на нагревание и излучение электромагнитных волн (рис. 2.1).

Чтобы установить основные закономерности возбуждения и протекания свободных электромагнитных колебаний, сначала сопротивление

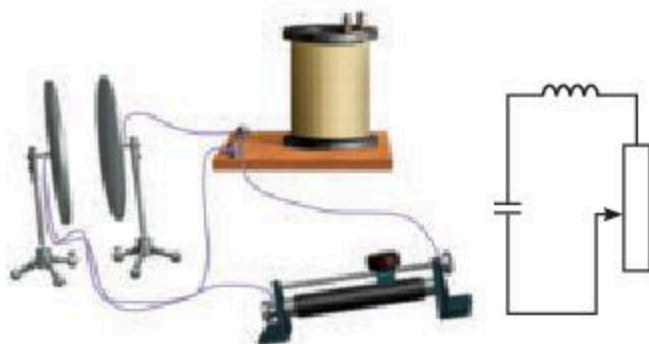


Рис. 2.1. Колебательный контур

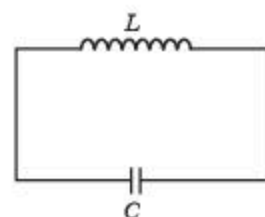


Рис. 2.2. Обозначение колебательного контура в схемах

катушки и соединительных проводов примем равными нулю, т. е. рассмотрим так называемый *идеальный колебательный контур*, состоящий только из катушки индуктивности L и конденсатора емкости C .

Замкнутая электрическая цепь, состоящая из конденсатора емкости C и катушки индуктивности L , называется колебательным контуром (рис. 2.2).

В начальный момент времени зарядим конденсатор, подключив к нему источник постоянного напряжения. При этом обкладкам конденсатора сообщаются заряды $\pm q_m$, и между ними возникает *электрическое поле*, энергия которого в данный момент максимальна и равна (рис. 2.3, а):

$$W_s = \frac{q_m^2}{2C}. \quad (2.1)$$

После замыкания заряженного конденсатора на катушку индуктивности, конденсатор начнет разряжаться (рис. 2.3, б), и по катушке пойдет нарастающий ток в направлении от положительной обкладки конденсатора к отрицательной.

С ростом силы тока в контуре возрастает и индукция магнитного поля катушки, что обуславливает возникновение *электродвижущей силы (ЭДС) самоиндукции*. По правилу Ленца ток самоиндукции направлен противоположно возрастающему току разрядки (рис. 2.3, б), в результате чего сила тока разрядки увеличивается медленнее (точка 1 на рис. 2.4)

С увеличением силы тока в контуре энергия магнитного поля $W_x = \frac{Li^2}{2}$ растет, а энергия электрического поля конденсатора $W_s = \frac{q^2}{2C}$ уменьшается (рис. 2.3, б). Полная энергия электромагнитного поля в любой момент времени равна их сумме:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}, \quad (2.2)$$

здесь i — мгновенное значение силы тока.

По мере разрядки конденсатора нарастание силы тока, а значит, и индукции магнитного поля катушки идет все медленнее. Когда конденсатор

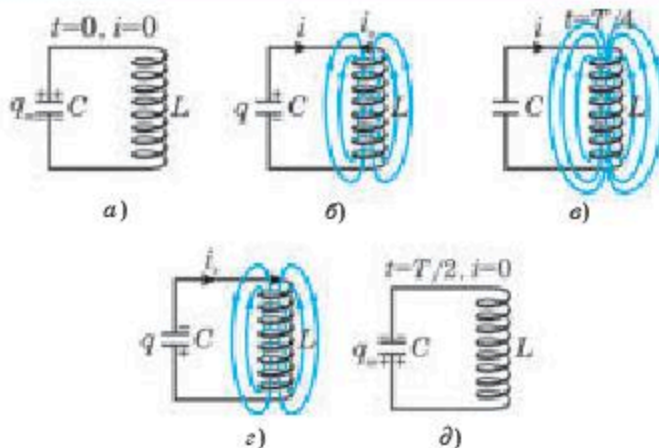


Рис. 2.3. Возникновение свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре

полностью разрядится, ЭДС самоиндукции достигнет нуля, а сила тока и индукция магнитного поля станут максимальными. Этому моменту времени соответствуют рисунок 2.3, *в* и показано на рисунке 2.4 (точка 1). Энергия магнитного поля в этот момент также максимальна и равна

$W_m = \frac{Li_m^2}{2}$, где i_m — максимальное значение силы тока, при этом энергия электрического поля равна нулю ($W_e = 0$).

Далее сила тока, а значит, и магнитное поле начинают уменьшаться, опять возникает ЭДС самоиндукции. При этом ток самоиндукции течет в направлении тока в контуре, так как по правилу Ленца ток самоиндукции должен поддерживать уменьшающийся ток (рис. 2.3, *г*; участок 1—2 на рис. 2.4). Конденсатор начинает перезаряжаться. Уменьшение силы тока идет все быстрее, ЭДС самоиндукции возрастает и достигает максимума в момент исчезновения тока (рис. 2.3, *д*; точка 2 на рис. 2.4).

Мы подробно описали процессы, происходящие за половину периода электромагнитных колебаний. Далее процесс пойдет в обратном направлении. По истечении одного периода система возвратится в исходное состояние, и в дальнейшем процесс будет периодически повторяться. При этом происходит периодическое превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля и наоборот. С самого начала мы приняли сопротивление $R = 0$; в таком идеальном контуре потерь энергии нет, и колебания являются незатухающими. Полная энергия сохраняется и в любой момент равна:

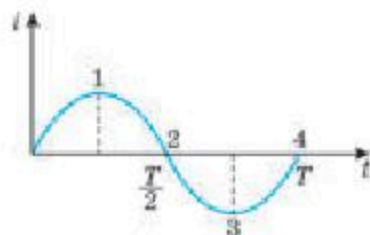


Рис. 2.4. График зависимости силы тока в контуре от времени

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{Li_m^2}{2} \text{ или } \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \text{const.} \quad (2.3)$$

Уравнение свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре. Рассмотренные нами свободные колебания в идеальном колебательном контуре являются незатухающими гармоническими колебаниями, так как мы приняли, что электрическое сопротивление контура $R = 0$.

Уравнения свободных колебаний в колебательном контуре можно записать по аналогии с уравнениями (1.1) и (1.2) механических гармонических колебаний:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2.1)$$

$$q = q_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2.2)$$

Исходя из уравнений 2.1 и 2.2 можно заключить: *величина заряда на обкладках конденсатора колебательного контура изменяется с течением времени по закону синуса или косинуса.*

Таким образом, в идеальном колебательном контуре происходят гармонические колебания электрического заряда.

Собственная циклическая частота определяется параметрами колебательного контура — *индуктивностью и емкостью* и определяется по формуле

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

Период электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) называется *формулой Томсона*. Как видно из нее, с увеличением индуктивности L и емкости C контура период колебаний увеличивается. Это объясняется следующим образом: чем больше индуктивность L , тем медленнее изменяется сила тока в контуре, чем больше емкость C , тем дольше перезаряжается конденсатор. Период электромагнитных колебаний в колебательном контуре очень малая величина (имеет значения порядка от тысячных до миллионных долей секунды). Соответственно частота колебаний достигает значения от нескольких тысяч до миллионов герц.

Запомните

Электромагнитные колебания в колебательном контуре являются высокочастотными.

Как мы уже знаем, аргумент косинуса (или синуса) в уравнениях (2.1) и (2.2) $\varphi = (\omega_0 t + \varphi_0)$ называется *фазой колебаний*. Она позволяет

однозначно определять значение и модуль колеблющейся величины (заряда, смещения и т. д.) в данный момент времени. Фаза является угловой мерой времени, выраженной в долях периода. Если в начальный момент времени $t_0 = 0$ начальная фаза колебаний $\varphi_0 = 0$, то:

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \quad (2.4)$$

Колебательный контур является важнейшей частью любого радиопередатчика и радиоприемника. Он обычно применяется в качестве резонансной системы радиотехнического устройства. В высокочастотных генераторах колебательный контур служит источником электромагнитных колебаний. Электромагнитные колебания оптического диапазона находят широкое применение в радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

Графики колебаний заряда и силы тока в идеальном колебательном контуре. Графический способ описания гармонических колебаний позволяет наглядно представить временную зависимость колеблющихся величин, а также, если известен масштаб, определить основные характеристики колебаний. Сначала построим график колебаний заряда в идеальном колебательном контуре, для этого воспользуемся уравнением (2.1), приняв начальную фазу колебаний ($\varphi_0 = 0$) равной нулю

$$q = q_m \cos \omega_0 t \quad (2.5)$$

График этого уравнения представлен на рисунке 2.5, а. На графике по оси ординат отложены значения заряда на обкладках конденсатора, по оси абсцисс — снизу время в долях периода, сверху — соответствующие значения фазы колебаний.

Чтобы найти уравнение колебаний силы тока, возьмем первую производную от уравнения заряда (2.5) по времени:

$i = q' = -q_m \omega_0 \sin \omega_0 t$, или, обозначив $q_m \omega_0 = i_m$, имеем: $i = -i_m \sin \omega_0 t$ или

$$i = i_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.6)$$

Сравнивая уравнения (2.5) и (2.6), можно увидеть, что колебания заряда и силы тока в идеальном колебательном контуре происходят со сдвигом фаз, равным $\pi/2$. С учетом этого, построим график зависимости силы тока от времени (рис. 2.5, б).

Из представленных на рисунке 2.5 графиков, при известном масштабе, можно определить период колебаний, а значит, и частоту по оси абсцисс, амплитуду и мгновенное значение колеблющейся величины по оси ординат. Наглядно видны и сдвиги фаз. В те моменты, когда заряд на обкладках конденсатора максимален, сила тока в цепи равна нулю.

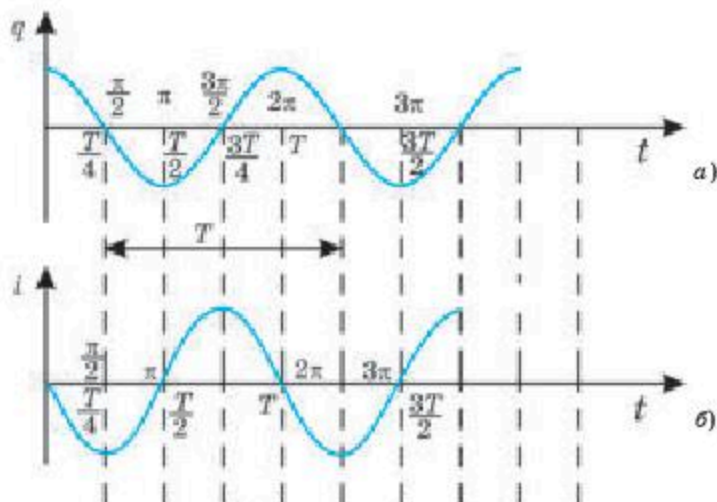


Рис. 2.5. Графики зависимости заряда и силы тока от времени в идеальном колебательном контуре



1. Дайте определение электромагнитным колебаниям.
2. Из каких элементов состоит идеальный колебательный контур?
3. Какие электромагнитные колебания называются свободными?
4. Чему равна полная энергия электромагнитных колебаний в колебательном контуре?
5. Как распределена энергия электромагнитных колебаний между электростатическим полем конденсатора и магнитным полем катушки в идеальном колебательном контуре в моменты времени $T/4$; $T/2$; $3T/4$; T после начала разрядки конденсатора?
6. По какому закону изменяется заряд конденсатора колебательного контура с течением времени?
7. Какую роль играет явление самоиндукции в возникновении в колебательном контуре электромагнитных колебаний?
8. Почему в контуре, состоящем из конденсатора и резистора, не могут возникнуть электромагнитные колебания?
9. В колебательном контуре изменили начальное значение заряда конденсатора. Какие величины, характеризующие электромагнитные колебания в контуре, изменятся, а какие останутся прежними?
10. Зависит ли период свободных электромагнитных колебаний от энергии, запасенной в контуре в начальный момент времени? Ответ обоснуйте.



По указанию учителя разделитесь на группы по 4-5 человек. Вместе составьте три задачи на тему свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре, обсудите условия составленных задач, их корректность и возможные пути решения. Поменяйтесь задачами с другой группой, решите их. Оцените эти задачи. Затем вынесите ваше решение на обсуждение (устно или письменно по указанию учителя).

Примеры решения задач

1. В идеальном колебательном контуре изменения заряда с течением времени происходят по закону $q = 0,05 \cos 10^4 \pi t$ (Кл). Определите амплитуду, частоту, период и начальную фазу свободных колебаний заряда. Чему равна индуктивность катушки, если емкость конденсатора равна $0,5$ мкФ?

Дано:

$$q = 0,05 \cos 10^4 \pi t (\text{Кл})$$

$$C = 0,5 \text{ мкФ}$$

$$q_m \text{ — ? } \nu \text{ — ? } T \text{ — ?}$$

$$\varphi_0 \text{ — ? } L \text{ — ?}$$

Решение. Запишем уравнение гармонических колебаний заряда в идеальном колебательном контуре:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Сравнивая это уравнение с уравнением, данным в условии задачи $q = 0,05 \cos 10^4 \pi t$ (Кл), находим:

1) амплитуду колебаний заряда: $q_m = 0,05$ Кл;

2) циклическую частоту: $\omega_0 = 10^4 \pi = 3,14 \cdot 10^4$ рад/с;

3) частоту: $\nu = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{3,14 \cdot 10^4}{6,28} = 0,5 \cdot 10^4$ Гц = 5 кГц;

4) период колебаний: $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{10^4 \pi} = 2 \cdot 10^{-4}$ с;

5) начальную фазу колебаний: $\varphi_0 = 0$

5) индуктивность катушки определим из формулы: $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$,

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{1}{9,86 \cdot 10^8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 0,002 \text{ Гн} = 2 \text{ мГн}.$$



Упражнение 2

1. Колебательный контур имеет индуктивность $L = 1,6$ мГн и емкость $C = 0,04$ мкФ. Определите период колебаний заряда.

Ответ: 50 мкс.

2. В колебательном контуре сила тока с течением времени изменяется по закону $i = 0,01 \cos 1000t$. Найти индуктивность катушки колебательного контура и максимальное напряжение на обкладках конденсатора, если его емкость равна 10 мкФ.

Ответ: $L = 0,1$ Гн; $U = 1$ В

3. В идеальном колебательном контуре происходят электромагнитные колебания. Величину заряда, сообщенного конденсатору в начальный момент времени, увеличили в два раза. Во сколько раз изменятся: а) амплитуда силы тока; б) суммарная энергия электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки? Ответ обоснуйте.

4. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 2,5 \text{ мкФ}$ и катушки индуктивностью $L = 1 \text{ Гн}$. Амплитуда колебаний заряда на обкладках конденсатора $0,5 \text{ мкКл}$. Напишите уравнение колебаний заряда.
Ответ: $q = 0,5 \cdot 10^{-6} \cos 630t (\text{Кл})$
5. Определите период собственных колебаний колебательного контура, состоящего из катушки индуктивностью $L = 0,1 \text{ Гн}$ и конденсатора емкостью $C = 2 \text{ мкФ}$.
Ответ: $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.
6. В колебательном контуре происходят свободные электромагнитные колебания. Найти частоту колебаний, если максимальный заряд на обкладках конденсатора $q_m = 10^{-6} \text{ Кл}$, а максимальное значение силы тока $i_m = 10 \text{ А}$.
Ответ: $1,6 \cdot 10^6 \text{ Гц}$
7. Полная энергия электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре $0,2 \text{ мДж}$, максимальное значение напряжения 100 В , амплитуда силы тока 1 А . Определите индуктивность и емкость контура.
Ответ: $0,4 \text{ мГн}; 0,04 \text{ мкФ}$.
- *8. Максимальное напряжение на обкладках конденсатора идеального колебательного контура $U_m = 30 \text{ В}$, а максимальное значение силы тока в контуре $I_m = 1,4 \text{ А}$. Определите напряжение и силу тока в контуре в тот момент, когда энергия магнитного поля катушки равна энергии электрического поля конденсатора.
Ответ: $\approx 1 \text{ А}; 21,3 \text{ В}$.
- *9. В идеальном колебательном контуре с частотой собственных колебаний $\nu_1 = 20 \text{ кГц}$ при замене конденсатора на другой частота стала равна $\nu_2 = 30 \text{ кГц}$. Какой будет частота собственных колебаний контура, если соединить эти два конденсатора параллельно?
Ответ: $16,6 \text{ кГц}$.

§3. Вынужденные электромагнитные колебания. Автоколебания



Ключевые понятия:

- ✓ затухающие колебания
- ✓ вынужденные колебания
- ✓ вынуждающая сила
- ✓ резонанс
- ✓ автоколебания
- ✓ высокочастотный генератор

На этом уроке вы:

- изучите условия возникновения вынужденных колебаний;
- познакомитесь с понятием автоколебаний;
- рассмотрите принцип работы высокочастотного генератора.



Затухающие колебания. До сих пор мы рассматривали свободные электромагнитные колебания, возникающие в *идеальном колебатель-*

ном контуре, электрическое сопротивление которого равно нулю. Такие идеальные колебания происходят по синусоидальному закону с постоянной амплитудой и могут происходить сколь угодно долго. На самом деле, все реальные колебательные контуры содержат электрическое сопротивление R , вследствие этого часть энергии электромагнитных колебаний в течение каждого периода расходуется на нагревание элементов контура и превращается в тепловую энергию. Убыль энергии колебаний означает и уменьшение амплитуды колебаний. Когда израсходуется вся энергия, запасенная в колебательном контуре, колебания прекратятся. Поэтому амплитуда *затухающих колебаний* уменьшается, пока не станет равной нулю. *Колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени вследствие потери энергии колебательной системой, называются затухающими колебаниями* (рис. 3.1). Затухающие колебания, строго говоря, не подчиняются гармоническому закону.

Вынужденные колебания. Чтобы колебания не затухали, необходимо постоянно восполнять потери энергии колебаний путем воздействия на колебательную систему какого-нибудь внешнего периодического источника энергии. В случае механических колебаний это может быть периодическая внешняя сила, которая называется вынуждающей силой. В случае электромагнитных колебаний такой внешней силой является периодически изменяющееся переменное напряжение (ЭДС источника тока). Вынужденные колебания — это незатухающие колебания.

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего ис-

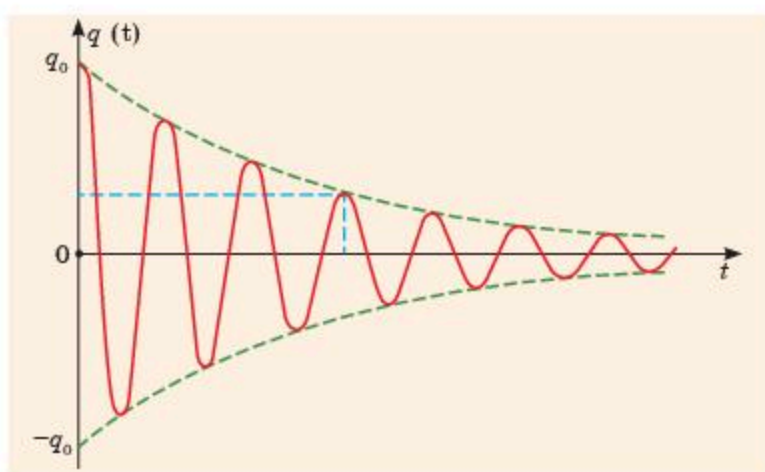


Рис. 3.1. Затухающие колебания заряда в реальном колебательном контуре.

точника. Примером вынужденных колебаний является переменный электрический ток, который возникает под действием переменного напряжения, вырабатываемого генераторами. Законы переменного тока мы подробно рассмотрим в следующей главе.

В начале действия внешнего периодического воздействия наблюдаются достаточно сложные колебания. Но спустя некоторое время после начала действия внешнего воздействия, колебания приобретают стационарный характер и не зависят от начальных условий. Таким образом, при вынужденных колебаниях система полностью “забывает” свое начальное состояние.

Запомните

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. В случае электромагнитных колебаний это — частота изменения ЭДС источника тока.

Амплитуда колебаний и энергия, передаваемая системе за период вынужденных колебаний, зависят от того, насколько различаются частота ω вынуждающей силы и частота ω_0 собственных колебаний, а также от величины электрического сопротивления колебательного контура.

Это вы знаете

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты собственных колебаний с частотой колебаний вынуждающей силы называется резонансом.

При резонансе создаются оптимальные условия для передачи энергии от внешнего источника в систему, так как в течение всего периода работа внешней силы источника над системой положительна.

Автоколебания. Есть еще один способ получения незатухающих колебаний, это — *автоколебания*, которые принципиально отличаются от вынужденных колебаний. *Автоколебаниями называются незатухающие колебания, существующие без периодического внешнего воздействия.* Источник энергии содержится в самой колебательной системе, и поступление энергии, компенсирующей потери, регулируется самой системой. Частота и амплитуда автоколебаний определяются конструкцией колебательной системы.

В состав любой автоколебательной системы входят: источник энергии, колебательная система с затуханием, клапан, открывающий и

закрывающий доступ энергии от источника к колебательной части в такт с ее колебаниями, управляемый автоматически самой колебательной частью (рис. 3.2).

В автоколебательной системе амплитуда и частота колебаний определяются свойствами самой системы, тогда как при вынужденных колебаниях они зависят от параметров внешнего вынуждающего воздействия.

Примером электрических автоколебаний является *генератор на транзисторе*. (рис. 3.3) Он содержит колебательный контур, источник энергии и транзистор.



Рис. 3.2. Основные элементы автоколебательной системы



Рис. 3.3. Генератор на транзисторе

Это вы знаете

Транзистор — это полупроводниковый триод, состоящий из трех полупроводников различной проводимости: эмиттера, базы и коллектора. Транзисторы могут быть типа *p-n-p* или типа *n-p-n*. Эмиттер и коллектор имеют одинаковые основные носители заряда (например, дырки), а база имеет основные носители заряда противоположного знака (например, электроны).

Транзистор выполняет роль клапана (ключа), который подключает источник энергии в такт колебаниям. Генератор на транзисторе вырабатывает колебания высокой частоты (*мегагерцы*), поэтому ключ должен

обладать огромным быстродействием, быть практически безынерционным. Транзистор как раз отвечает этому требованию.

Перейдем к работе генератора. Для того чтобы компенсировать потери энергии в колебательном контуре, к нему подключают источник постоянного напряжения. Но если он будет подключен к контуру постоянно, то половину периода он подзаряжает конденсатор (когда присоединенная к положительному полюсу источника пластина конденсатора заряжена положительно), а вторую половину периода, когда заряд на обкладках конденсатора меняет знак, конденсатор, наоборот, разряжается через источник. Другими словами, первую половину периода энергия поступает в контур, а вторую — возвращается в источник. При таком подключении источник не может восполнять потери энергии. Если источник будет подключаться к колебательному контуру периодически только в те моменты, когда присоединенная к положительному полюсу источника пластинка конденсатора заряжена положительно, то конденсатор все время будет подзаряжаться и колебания не будут затухать. Чтобы так управлять ключом (транзистором), используется так называемая *обратная связь*, которая осуществляется с помощью катушки индуктивности.

Автоколебания имеют очень широкий спектр частот и применяются в различных областях, например, в радиотехнике, радиосвязи, на телевидении, в ЭВМ и т. д.

Электромагнитные колебания могут оказывать как положительное, так и вредное воздействие на живые организмы. Оказывается, любой орган человека имеет свою резонансную частоту. При совпадении частоты внешнего пульсирующего воздействия с резонансной частотой возникают *биения*, результат такого воздействия зависит от амплитуды колебаний. Известно, например, что электромагнитное излучение способно влиять на психику человека.



1. Объясните, почему свободные колебания в реальном колебательном контуре затухают?
2. Какие колебания называются вынужденными?
3. От чего зависит частота и амплитуда вынужденных колебаний?
4. Чем отличаются автоколебания от вынужденных?
5. Из каких основных элементов состоит автоколебательная система?
- *6. Какую роль играет транзистор в работе генератора?
- *7. Что такое обратная связь?
- *8. Приведите примеры автоколебаний.



1. Вынужденные колебания под внешним воздействием могут совершать даже тела, которые не являются колебательными системами. Рассмотрите картинки (рис. 3.4) и расскажите, какие вынужденные колебания в них происходят. Назовите вынуждающую силу в каждом случае. Приведите еще несколько примеров вынужденных колебаний.



а)



б)



в)



г)

Рис. 3.4. Примеры вынужденных колебаний

2. По указанию учителя разделитесь на несколько групп. Соберите материал о влиянии электромагнитного излучения на живые организмы. Подготовьте презентацию и вынесите ее на обсуждение.

§ 4. Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями



Ключевые понятия:

- ✓ аналогия
- ✓ координата
- ✓ заряд
- ✓ скорость
- ✓ сила тока
- ✓ пружинный маятник
- ✓ колебательный контур
- ✓ конденсатор
- ✓ катушка

На этом уроке вы:

- будете сравнивать и проводить аналогии между основными характеристиками законами механических и электромагнитных колебаний.



Это вы знаете

Физическая природа механических и электромагнитных колебаний разная, но законы изменения колеблющихся физических величин с течением времени одинаковы, они могут быть описаны одинаковыми уравнениями. Колебательные движения различной природы характеризуются одними и теми же параметрами.

Проведем аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями. Мы рассмотрели колебания математического и пружинного маятников, когда происходят периодические изменения координаты груза x и его скорости v , а также возникновение электромагнитных колебаний в колебательном контуре, когда происходят периодические изменения величины заряда q на обкладках конденсатора и силы тока i в контуре.

В двух приведенных случаях физическая природа колеблющихся величин разная, но их изменения происходят по одинаковым законам. Уравнения колебаний разной природы пишутся одинаково. Нам известно, что для того чтобы в системе возникли колебания, ей необходимо сообщить энергию извне. Например, растягивая пружину пружинного маятника, мы сообщаем системе дополнительную потенциальную энергию. Если теперь предоставить маятник самому себе, то упругая сила будет возвращать его в положение равновесия ($x = 0$), т. е. в то положение, в котором смещение груза равно нулю, а значит, и потенциальная энергия маятника будет равна нулю:

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = 0.$$

В этом положении полная энергия пружинного маятника равна его кинетической энергии: $E = E_k = \frac{mv_m^2}{2}$.

В колебательном контуре избыток энергии легче сообщить, зарядив конденсатор. В тот момент, когда конденсатор разрядится ($q = 0$),

энергия электрического поля тоже будет равна нулю $W_э = \frac{q^2}{2C} = 0$, а энергия магнитного поля в катушке достигнет максимума $W_м = \frac{Li_m^2}{2}$ и будет равна полной энергии колебательного контура.

Отклонение грузика от положения равновесия пружинного маятника аналогично зарядке конденсатора колебательного контура. При этом пружинному маятнику сообщается потенциальная энергия $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$, а конденсатору $W_э = \frac{q_m^2}{2C}$ (рис. 4.1, а). Эти две формулы имеют одинаковый вид: роль жесткости пружины k в механических колебаниях играет коэффициент $\frac{1}{C}$ в электромагнитных колебаниях, а роль координаты x_m — заряд q_m .

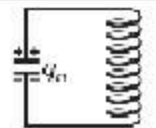

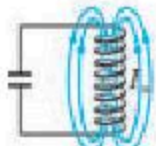
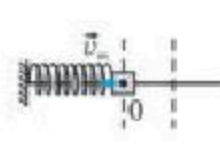
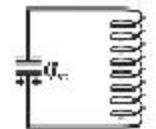
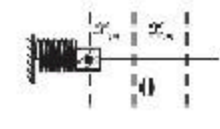
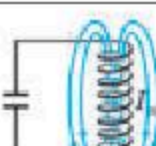
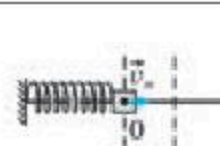
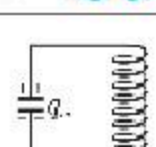

№	Электромагнитные колебания	Механические колебания
а)	 $t = 0$ $W_э = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_м = 0$	 $t = 0$ $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_k = 0$
б)	 $t = \frac{1}{4} T$ $W_э = 0$ $W_м = \frac{Li_m^2}{2}$	 $t = \frac{1}{4} T$ $E_p = 0$ $E_k = \frac{mv_m^2}{2}$
в)	 $t = \frac{1}{2} T$ $W_э = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_м = 0$	 $t = \frac{1}{2} T$ $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_k = 0$
г)	 $t = \frac{3}{4} T$ $W_э = 0$ $W_м = \frac{Li_m^2}{2}$	 $t = \frac{3}{4} T$ $E_p = 0$ $E_k = \frac{kx_m^2}{2}$
д)	 $t = T$ $W_э = \frac{q_m^2}{2C}$ $W_м = 0$	 $t = T$ $E_p = \frac{kx_m^2}{2}$ $E_k = 0$

Рис. 4.1. Аналогии между электромагнитными и механическими колебаниями

В крайнем правом положении величина возвращающей силы максимальна, следовательно, максимально и ускорение грузика. По мере приближения грузика к положению равновесия, ускорение и возвра-

щающая сила уменьшаются, а скорость грузика возрастает. Грузик, придя в положение равновесия, не останавливается, а продолжает свое движение, так как он обладает скоростью.

В колебательном контуре в момент начала разрядки конденсатора заряд и разность потенциалов на обкладках конденсатора максимальны, а сила тока в катушке равна нулю. По мере разрядки конденсатора возрастает сила тока в цепи, что приводит к возникновению тока самоиндукции, который будет препятствовать росту тока, вызванного разрядкой конденсатора (это следует из правила Ленца). Но ток в цепи все равно нарастает, так как все больший заряд стекает с обкладок конденсатора.

Моменту времени $t = \frac{1}{4}T$, когда груз проходит через положение равновесия $x = 0$, $v = v_m$, соответствует полная разрядка конденсатора $q = 0$ и максимальное значение силы тока в катушке $i = i_m$ (рис. 4.1, б). При этом потенциальная энергия маятника $W_p = 0$, а кинетическая энергия принимает максимальное значение $E_k = \frac{mv_m^2}{2}$.

В колебательном контуре этому моменту соответствуют равенство нулю энергии электрического поля $W_s = 0$ и максимальное значение энергии магнитного поля $W_x = \frac{Li_m^2}{2}$. Сравнение двух последних формул позволяет провести аналогию между массой m в механических колебаниях и индуктивностью L в электромагнитных колебаниях, а скорость грузика v аналогична силе тока i .

Далее грузик маятника, перемещаясь влево, будет сжимать пружину. В колебательном контуре этому моменту соответствует следующее: ток в катушке начнет убывать, что, согласно правилу Ленца, порождает ток самоиндукции, который будет течь в том же направлении, т. е. именно из-за явления самоиндукции будет происходить дальнейшее движение заряженных частиц в прежнем направлении, что приводит к переразрядке конденсатора. К моменту времени $t = \frac{1}{2}T$ грузик достигнет крайнего левого положения, скорость его станет равной нулю, а конденсатор полностью перезарядится, как показано на рисунке 4.1, в. Сила тока в контуре в этот момент равна нулю.

Далее грузик начинает перемещаться вправо под действием возвращающей силы, роль которой выполняет сила упругости пружины; в контуре конденсатор будет разряжаться за счет разности потенциалов между его обкладками. В момент времени $t = \frac{3}{4}T$ грузик снова будет проходить через положение равновесия с максимальной скоростью, а конденсатор полностью разрядится, и сила тока в контуре достигнет максимального значения (рис. 4.1, г). И, наконец, через один полный период, когда $t = T$, обе системы придут в исходное положение (рис. 4.1, д).

Итак, мы убедились, что колебания в двух рассмотренных системах (пружинный маятник и колебательный контур) происходят по одинаковым законам, хотя причина их возникновения различна по физической природе. В данном случае речь идет не о том, какая именно величина изменяется, а как она изменяется со временем, какие колебания она совершает, другими словами, по каким закономерностям происходят эти колебания.

Приведенное нами сравнение электромагнитных и механических колебаний не только помогает глубже проникнуть в суть вопроса, но и имеет определенную практическую ценность. Поскольку процессы в механических колебательных системах легче представить, часто, используя аналогию между механическими и электрическими величинами, заменяют данную электрическую колебательную систему соответствующей ей механической колебательной системой, что упрощает изучение процессов, происходящих в ней. Теперь оформим в виде таблицы аналогичные величины, характеризующие механические и электрические колебания (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Характеристики колебаний

Механические колебания	Электромагнитные колебания
Координата x	Заряд q
Амплитуда x_m	Максимальный заряд q_m
Скорость $v = x'$	Сила тока $i = q'$
Ускорение $a = v' = x''$	Скорость изменения силы тока $i' = q''$
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Обратная величина емкости $\frac{1}{C}$
Сила F	Напряжение U
Потенциальная энергия деформированной пружины $E_p = \frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля конденсатора $W_a = \frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия груза $E_k = \frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля катушки $W_m = \frac{Li^2}{2}$



1. Изменению какой величины в колебательном контуре соответствует увеличение коэффициента жесткости пружинного маятника?
2. Изменению какой величины в пружинном маятнике соответствует уменьшение индуктивности в колебательном контуре?
- *3. Напишите уравнение механических колебаний пружинного маятника аналогично уравнению электромагнитных колебаний в колебательном контуре.
- *4. Объясните, почему электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю. Какой процесс этому соответствует в пружинном маятнике?



Опираясь на материалы данного параграфа, проведите аналогию между колебаниями математического маятника и электромагнитными колебаниями в колебательном контуре, начертите и заполните таблицу, аналогичную таблице 4.1

Самое важное в главе 2

Периодические изменения величины заряда, напряжения и силы тока в контуре, сопровождающиеся взаимными превращениями энергии электрического и магнитного полей, называются *электромагнитными колебаниями*.

Уравнение гармонических колебаний заряда в колебательном контуре имеет вид:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$T = 2\pi\sqrt{LC}$ — период колебаний в контуре.

Между электромагнитными и механическими колебаниями существует аналогия.

Свободные колебания в реальной колебательной системе затухают. Чтобы получить незатухающие колебания, необходимо восполнять потери энергии колебаний.

*Есть два способа получения незатухающих колебаний. Первый: потери энергии восполняются периодически от внешнего источника. Колебания, возникающие при этом, называются *вынужденными*. Второй: источник энергии содержится в самой колебательной системе, и поступление энергии регулируется самой системой. Такие незатухающие колебания называются *автоколебаниями*.*

Глава 3. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§5. Генератор переменного тока



Ключевые понятия:

- ✓ генератор переменного тока
- ✓ явление электромагнитной индукции
- ✓ магнитный поток
- ✓ индуктор
- ✓ якорь
- ✓ ротор
- ✓ статор

На этом уроке вы:

- познакомитесь с принципом работы и устройством генератора переменного тока.



Генератор переменного тока. Генератором тока называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили *электрохимические индукционные генераторы переменного тока* (рис. 5.1)



Рис. 5.1. Генераторы на ГЭС

Преимуществом таких генераторов является простота их устройства и возможность получения больших токов при достаточно высоком напряжении. В них механическая энергия превращается в электрическую.

Принцип работы генератора переменного тока.**Это вы знаете**

Возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур, называется явлением электромагнитной индукции.

Магнитным потоком Φ через площадь S контура называют величину

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha,$$

где B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между вектором \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура.

При этом, ЭДС индукции, возникающая в замкнутом проводящем контуре, равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

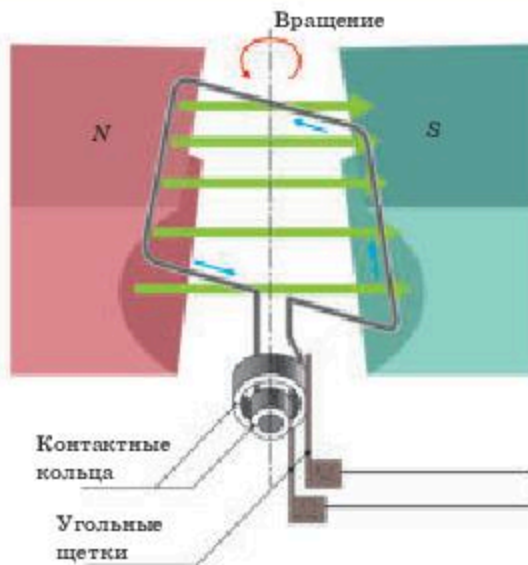


Рис. 5.2. Принципиальная схема генератора переменного тока

Пусть в однородном постоянном магнитном поле с индукцией \vec{B} вращается с постоянной угловой скоростью ω проволочная рамка площадью S (рис. 5.2).

Так как рамка вращается с угловой скоростью ω , угол α между вектором \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура равен: $\alpha = \omega \cdot t$, тогда $\Phi = BS \cos \omega t$; т. е. поток магнитной индукции меняется по гармоническому закону. В рамке индуцируется ЭДС, равная $\mathcal{E} = -\frac{\Delta(BS \cos \omega t)}{\Delta t}$. Если взять очень малый промежуток времени, то при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta(BS \cos \omega t)}{\Delta t} \right) = -(BS \cos \omega t)' = BS \omega \sin \omega t$$

Обозначим $\mathcal{E}_m = BS \omega$, тогда:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t. \tag{5.1}$$

Таким образом, в рамке, равномерно вращающейся в магнитном поле, наводится синусоидальная ЭДС индукции, следовательно, по рамке течет синусоидальный переменный ток. Чтобы можно было использовать этот ток, рамку разрезают, выводят ее концы на два изолированных кольца. К кольцам прижимают щетки, к которым присоединяют контакты внешней цепи (рис. 5.2). В таком случае на внешнюю нагрузку подается переменное напряжение, которое меняется по закону

$$u = U_m \sin \omega t \quad \text{или} \quad u = U_m \cos \omega t. \tag{5.2}$$

Какую из двух формул выбрать, зависит от выбора начала отсчета времени, о чем мы говорили в предыдущей главе. При этом изменения

силы тока происходят с той же частотой, что и изменение напряжения, однако в общем случае фазы колебаний напряжения и силы тока могут быть различными

Устройство генератора переменного тока. Основными частями всякого индукционного генератора являются:

1. Индуктор — устройство, создающее магнитное поле. Это может быть либо постоянный магнит, либо электромагнит.

2. Якорь — обмотка, в которой индуцируется ЭДС.

3. Кольца с щетками — устройство, которым снимают с вращающихся частей индукционный ток или подают ток питания электромагнитам.

ЭДС, индуцируемая в последовательно соединенных витках, будет складываться из суммы ЭДС в каждом из них, поэтому обмотка якоря состоит из множества витков.

Мы знаем, что амплитуда ЭДС, наводимой в рамке $\varepsilon_m = BS\omega = \Phi\omega$ пропорциональна магнитному потоку через рамку. Для увеличения магнитного потока в индукционных генераторах применяют специальную магнитную систему. Она состоит из двух сердечников, изготовленных из электротехнической стали. В пазах одного из двух сердечников размещаются обмотки, создающие магнитное поле (постоянный магнит или электромагнит), в пазах второго сердечника — обмотки, в которых индуцируется ЭДС (якорь). Один из сердечников, который вращается вместе со своей обмоткой, называется *ротором*, второй, неподвижный, сердечник называется *статором*. На рисунке 5.3, б вращается проводочная рамка (якорь), а электромагнит остается неподвижным (является статором). В промышленных генераторах вращается электромагнит, т. е. он является ротором, а якорь, где индуцируется ЭДС, остается неподвижным (рис. 5.3, а). Такая конструкция более целесообразна, так как сила тока, питающего электромагнит, гораздо меньше силы тока, индуцируемой в обмотках якоря. А ток большой мощности удобнее снимать с неподвижных обмоток.

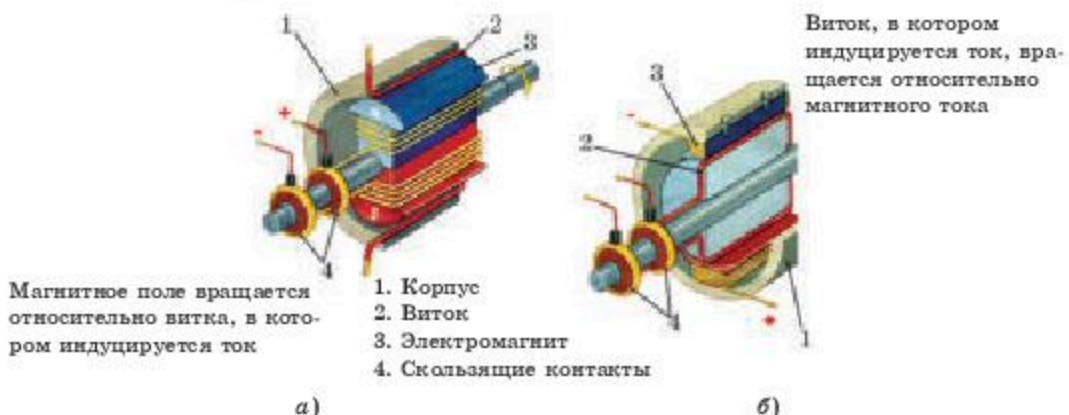


Рис. 5.3. Модель генератора переменного тока

Слабый ток к индуктору подается с помощью коллектора. Он вырабатывается отдельным генератором постоянного тока. Обмотку статора, в которой индуцируется вырабатываемый генератором ток, соединяют неподвижными шинами с линией, по которой передают электроэнергию.

Рассмотренный генератор называется *однофазным*. Однофазные генераторы в эксплуатации неэкономичны, поэтому для выработки электроэнергии обычно используют трехфазные генераторы.

На современных гидроэлектростанциях падающая вода вращает вал электрогенератора с частотой 1—2 оборота в секунду. Если бы якорь генератора имел только одну обмотку, он вырабатывал бы переменный ток частотой (1—2 Гц). Но частота промышленного переменного тока синусоидальной формы равна 50 Гц. Поэтому, чтобы увеличить частоту тока до необходимого значения, якорь (ротор) генератора снабжают несколькими обмотками. Такой генератор дает переменный ток частотой

$$\nu = n \cdot f, \quad (5.3)$$

здесь n — число пар полюсов; f — частота вращения ротора.

Для паровых турбин, ротор которых вращается очень быстро, используют якорь с одной обмоткой. В этом случае частота вращения ротора совпадает с частотой переменного тока, т. е. ротор должен делать 50 об/с.

Для увеличения амплитудного значения ЭДС индукции нужно либо увеличивать индукцию магнитного поля, пронизывающего обмотки якоря, либо увеличивать число витков его обмоток. Для увеличения индукции магнитного поля \vec{B} обмотку индуктора размещают в стальном сердечнике, а зазор между сердечниками якоря и индуктора делают как можно меньшим.

Современные мощные генераторы вырабатывают напряжение (15—20) кВ и имеют КПД (97—98)%.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!



Ипполит Пикси
(1808—1835)

Первым, кто объяснил возможность получения переменного тока на основе электромагнитной индукции, был Майкл Фарадей. Первый генератор переменного тока, основанный на принципе Фарадея, в 1832 году сконструировал французский ученый изобретатель Ипполит Пикси. Этот генератор представлял собой вращающийся магнит подковообразной формы, приводимый в движение вращением рычага. Между полюсами магнита были установлены две неподвижные катушки индуктивности с железным сердечником.

В дальнейшем к этому устройству был добавлен коммутатор для получения постоянного пульсирующего тока, чем оно и было приведено к широко узнаваемой сегодня конструкции.

На сегодняшний день разработано множество генераторов переменного тока различных типов и конструкций. Они широко используются для выработки электроэнергии, как в электростанциях, так и в качестве автономных источников электроэнергии в частных домах и дачах, когда отсутствует электроснабжение (рис. 5.4, а), для питания электрических систем различного вида транспорта: в автомобилях (рис. 5.4, б), в тепловозах с электрической передачей, в морских кораблях (рис. 5.4, в) и т. д.

Автономные генераторы используют для ремонтных, строительных и производственных предприятий в любой отрасли народного хозяйства и промышленности. Дублирование основного электроснабжения для клиник и больниц с реанимационными и хирургическими отделениями жизненно важно, ведь от этого зависят человеческие жизни.

Генераторы переменного тока нашли широкое применение в быту и на производстве благодаря компактности, безотказности и мобильности. Широкий спектр применения делает их универсальными устройствами, способными производить ток не только для нужд производства, но и в быту.



а)



б)



в)

Рис. 5.4. Генераторы переменного тока



1. Почему в рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, возбуждается ЭДС и от каких величин она зависит?
2. Выведите закон изменения ЭДС, индуцируемой во вращающейся в магнитном поле рамке.
3. Можно ли получить переменный ток в неподвижной рамке? Если да, то каким образом?
4. Из каких основных частей состоит генератор переменного тока?
5. Объясните роль ротора и статора в работе генератора.
6. Объясните, как можно вывести индукционный ток во внешнюю цепь.



Изучите текст данного параграфа и, используя полученную информацию, устно выберите правильный ответ для каждого утверждения, приведенного в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Утверждение	Правильно	Неправильно	Нет информации
Работа генератора переменного тока основана на возбуждении в цепи автоколебаний			
В основе работы генератора переменного тока лежит явление электромагнитной индукции			
Генератор переменного тока преобразовывает постоянный ток в переменный			
Генераторы переменного тока делятся на синхронный и асинхронный			
В индукторе генератора создается магнитное поле			
Подвижная часть генератора называется ротором			
В генераторе любой конструкции вращается якорь			
Если якорь генератора содержит только одну обмотку, он называется однофазным			
Чтобы увеличить частоту вырабатываемого переменного тока, якорь генератора снабжают несколькими обмотками			
Три однофазных генератора, соединенных в одной электрической машине, в которых индуцированные ЭДС сдвинуты по фазе на 120° , называется трехфазным генератором			

Пример решения задачи

Проволочная рамка площадью $S = 100 \text{ см}^2$ с $N = 200$ витками вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$. Период вращения рамки $T = 0,1 \text{ с}$. Напишите уравнение зависимости от времени ЭДС, которая индуцируется в рамке, и определите ее амплитудное значение. Ось вращения перпендикулярна магнитному полю.

Дано:

$$B = 0,5 \text{ Тл}$$

$$T = 0,1 \text{ с}$$

$$N = 200$$

$$S = 100 \text{ см}^2$$

$$\mathcal{E}(t) = ? \quad \mathcal{E}_m = ?$$

Решение. В каждом витке рамки индуцируется ЭДС:

$$\mathcal{E}_0 = -\Phi' = \mathcal{E}_{m_0} \sin \omega t, \text{ где } \mathcal{E}_{m_0} = BS\omega.$$

Тогда в N витках: $\varepsilon = \mathcal{E}_0 N = N\mathcal{E}_{m_0} \sin \omega t$

Амплитудное значение ЭДС:

$$\mathcal{E}_m = N\mathcal{E}_{m_0} = NBS\omega = NBS \frac{2\pi}{T}$$

$$\mathcal{E}_m = 200 \cdot 0,5 \text{ Тл} \cdot 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \frac{6,28}{0,1 \text{ с}} = 62,8 \text{ В}$$

Уравнение колебаний ЭДС:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t = \mathcal{E}_m \sin(2\pi/T) \cdot t, \text{ подставим сюда значения } \mathcal{E}_m \text{ и } \omega:$$

$$\mathcal{E} = 62,8 \sin(6,28/0,1) \cdot t = 62,8 \sin 62,8 t (\text{В}).$$



Упражнение 3

1. Проволочная рамка площадью $S = 300 \text{ см}^2$ равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$ вокруг оси, перпендикулярной линиям индукции, с частотой $\nu = 50 \text{ об/с}$. Определите период и максимальное значение ЭДС, которая индуцируется в рамке.

Ответ: 0,02 с; 4,71 В

2. В рамке, вращающейся в однородном магнитном поле, индуцируется ЭДС, которая меняется по закону: $\mathcal{E} = 50 \sin(10^3 \pi t)$ (В). Определите амплитуду, период, частоту, фазу и начальную фазу колебаний ЭДС.

Ответ: 50 В; $2 \cdot 10^{-3}$ с; 500 об/с; $3,14 \cdot 10^3 t$; $\varphi_0 = 0$

- *3. Сколько витков имеет рамка площадью $S = 500 \text{ см}^2$, если при вращении ее с частотой $\nu = 20 \text{ Гц}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ индуцируется ЭДС, амплитуда которой равна 63 В?

Ответ: 100

- *4. Проволочный виток радиусом $r = 4 \text{ см}$ равномерно вращается с частотой $\nu = 50 \text{ Гц}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,04 \text{ Тл}$. Ось вращения, проходящая через центр витка, лежит в плоскости витка и образует угол $\alpha = 60^\circ$ с линиями индукции магнитного поля. Определите амплитуду ЭДС, которая индуцируется в витке.

Ответ: 63,1 мВ

- *5. Проволочное кольцо радиусом $r = 10 \text{ см}$ находится в магнитном поле, индукция которого со временем изменяется по закону $B = 0,04 \cos 5\pi t$. Плоскость кольца образует с линиями индукции магнитного поля угол $\alpha = 45^\circ$. Напишите закон изменения ЭДС, индуцируемой в кольце, и определите ее максимальное значение.

Ответ: $\mathcal{E} = 0,014 \sin 5\pi t$ (В); 14 мВ

§ 6. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток



Ключевые понятия:

- ✓ вынужденные электромагнитные колебания
- ✓ переменный ток
- ✓ частота переменного тока
- ✓ максимальное значение тока и напряжения
- ✓ эффективное значение силы тока
- ✓ эффективное значение напряжения в цепи переменного тока

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными характеристиками переменного тока.



Вынужденные электромагнитные колебания.

Это вы знаете

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника.

Для установления в электрической цепи вынужденных колебаний достаточно, разорвав замкнутый контур, подать на образовавшиеся контакты переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$. В практическом применении *переменный ток* имеет перед постоянным током неоспоримые преимущества. Во всех бытовых электрических приборах, во многих приборах, применяемых в промышленности, в агротехнике, в строительстве используется переменный ток. Переменное напряжение и силу тока можно преобразовывать в очень широких пределах почти без потерь энергии, что позволяет передавать электроэнергию на большие расстояния.

Переменный ток. Установившиеся в цепи вынужденные электромагнитные колебания можно рассматривать как протекание по проводникам переменного тока. При этом напряжение и сила тока в цепи периодически изменяются как по знаку, так и по модулю. *Электрический ток, который с течением времени периодически изменяется как по величине, так и по направлению, называется переменным.* При этом изменения напряжения и силы тока происходят по гармоническому закону.

Гармонические изменения напряжения на концах цепи вызывают такие же изменения напряженности электрического поля внутри проводников. А электрический ток, как мы знаем, возникает именно благодаря этому полю, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Если изменяется напряженность электрического поля внутри проводника, то меняется соответственно и сила тока. Изменения напряженности поля распространяются не мгновенно, а со скоростью света. Но эта скорость настолько высока, что по сравнению с периодом колебаний напряжения можно считать, что изменения поля распространяются внутри проводников почти мгновенно. Поэтому при изменении напряжения на концах цепи электрическое поле меняется практически сразу во всей цепи, а значит, и сила тока во всех сечениях контура в данный момент времени имеет одинаковые значения.

Таким образом, *в цепи переменного тока сила тока в каждый момент времени во всех сечениях контура практически одинакова.*

Такой ток называют *квазистационарным*. Для квазистационарного тока справедлив закон Ома: $i = \frac{u}{R}$

Переменный ток так же, как и постоянный, оказывает тепловое, магнитное и химическое действие. На этих действиях основана работа измерительных приборов переменного тока и напряжения. Проводник, по которому течет переменный ток, нагревается. Работу и мощность переменного тока можно рассчитывать по тем же формулам, что и для постоянного тока. Но, как уже было сказано, сила переменного тока с течением времени периодически меняется от нуля до максимального значения. Поэтому, в цепи переменного тока когда мы говорим о силе тока или напряжении, имеется ввиду их мгновенные значения, или так называемые эффективные значения.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь, состоящую только из резистора и источника переменного напряжения

$$u = U_m \cos \omega t. \quad (6.1)$$

В этом выражении u — *мгновенное значение*, U_m — *максимальное, или амплитудное значение напряжения*.

По закону Ома сила тока в цепи: $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t$

Обозначим $I_m = \frac{U_m}{R}$ — *максимальное (амплитудное) значение силы тока*.

Тогда:

$$i = I_m \cos \omega t \quad (6.2)$$

Сравнивая выражения (6.1) и (6.2), можно сделать вывод, что в цепи, содержащей кроме источника тока только резистор, колебания

напряжения и силы тока происходят с одинаковой частотой и совпадают по фазе, одновременно достигая максимумов и минимумов. В общем случае, когда цепь содержит кроме резистора катушку и (или) конденсатор, колебания силы тока и напряжения имеют одинаковую частоту, но разные фазы. Поэтому в цепи переменного тока возникают новые закономерности, знакомые нам формулы для постоянного тока могут принять несколько иные формы для переменного тока. Эти случаи мы подробно рассмотрим в следующем параграфе.

Кроме максимального и мгновенного значений силы тока (напряжения) переменный ток характеризуется периодом и частотой.

Частота колебаний ν силы переменного тока равна числу полных колебаний силы тока в единицу времени. Единица измерения частоты в системе СИ — Герц (Гц)

Циклическая частота ω колебаний силы тока — это величина, равная числу полных колебаний силы тока за 2π секунд. В системе СИ единица измерения циклической частоты — радиан в секунду $[\omega] = \text{рад/с}$. Так как радиан является безразмерной величиной, размерность циклической частоты ω можно представить в виде $[\omega] = \text{с}^{-1}$.

Период колебаний T силы тока — это время одного полного колебания силы тока. В системе СИ единица измерения T — секунда, то есть размерность $[T] = \text{с}$. Нам известно, что переменный ток вырабатывается генератором переменного тока. Отметим, что переменный ток в цепи проходит в одном направлении в течение полуоборота ротора генератора, а затем меняет направление на противоположное, которое остается неизменным в течение следующего полуоборота.

Частота переменного тока в осветительной сети наших домов, на заводах и фабриках равна 50 Гц, это значение является стандартным в нашей стране и во многих других странах мира. В США частота промышленного тока 60 Гц.

Если включить в розетку в нашем доме обычную лампу накаливания, то ее освещенность будет меняться 100 раз в секунду вследствие периодических изменений напряжения. Но таких частых миганий наши глаза различить не могут, нам кажется, что лампа горит непрерывно. Наши глаза воспринимают усредненную освещенность, создаваемую электрической лампой за достаточно большой промежуток времени. Амперметрами и вольтметрами мы можем измерять силу тока и напряжение в цепи переменного тока. Но ведь в данном случае значения и силы тока, и напряжения все время изменяются. Какое значение тогда показывают измерительные приборы?

Чтобы это выяснить, рассчитаем *среднюю мощность за один период колебаний* в нашей лампочке. Так как для мгновенных значений силы тока и напряжения справедливы законы постоянного тока, мгновенную

мощность переменного тока определим по известной формуле $p = i^2 R$. Вместо силы тока подставим формулу (6.2):

$$p = I_m^2 R \cos^2 \omega t$$

и воспользуемся тригонометрическим соотношением $\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$, тогда:

$$p = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t$$

Как известно, наибольшее значение косинуса равно $+1$, а наименьшее -1 . Следовательно, среднее значение $\cos 2\omega t$ за один период равно нулю. Таким образом, средняя мощность определяется только первым слагаемым:

$$p = \frac{I_m^2 R}{2} \quad (6.3)$$

Обозначим через $I_{\text{эф}}$ силу постоянного тока, при которой в данной нагрузке выделяется такая же мощность, что и при протекании переменного тока. Тогда $p = I_{\text{эф}}^2 R$. Сравнивая это выражение с (6.3) имеем:

$$\frac{I_m^2 R}{2} = I_{\text{эф}}^2 R,$$

отсюда:

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (6.4)$$

Действующим, или эффективным значением силы переменного тока $I_{\text{эф}}$ называют силу такого постоянного тока, который за одинаковое время выделяет в проводнике такое же количество теплоты, как и определяемый переменный ток. Действующее значение напряжения определяется по аналогичной формуле:

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (6.5)$$

Для эффективных значений силы тока и напряжения справедлив закон Ома.

Электроизмерительные приборы показывают эффективные значения силы тока и напряжения.



1. Что такое переменный ток?
2. Почему мгновенные значения силы тока во всех сечениях замкнутой цепи в каждый данный момент одинаковы?
3. Дайте определения основных характеристик переменного тока.
4. Как определяются действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения?
5. Какова частота промышленного тока?
6. Наши бытовые приборы работают от сети напряжением 220В. Какое значение напряжения имеется в виду?
7. Сравните переменный ток с постоянным. В чем их сходство и различие?

Пример решения задачи

Задача. Напряжение на концах участка цепи переменного тока меняется по закону $u = 110\cos 100\pi t$. Определите действующее значение напряжения U , частоту ν колебаний.

Дано:

$$u = 110\cos 100\pi t$$

$$U = ? \quad \nu = ? \quad \varphi_0 = ?$$

Решение. Сравнивая уравнение $110\cos 100\pi t$ с уравнением $U = U_m \cos \omega t$, находим:

1) амплитудное значение напряжения

$$U_m = 110 \text{ В.}$$

2) действующее значение напряжения

$$U_s = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{110}{\sqrt{2}} = 78 \text{ В}$$

3) частота $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50 \text{ Гц}$



Упражнение 4

1. Амплитудное значение напряжения в цепи переменного тока $U_m = 10 \text{ В}$. Определите напряжение в момент времени $t = \frac{T}{6}$.

Ответ: 5 В.

2. В цепи переменного тока с резистором сопротивлением $R = 400 \text{ Ом}$ напряжение меняется по закону $u = 220\cos 100\pi t$. Напишите уравнение колебаний тока в этой цепи. Найдите силу тока в момент времени $t = \frac{T}{4}$.

Ответ: $i = 0,55\cos 100\pi t$; 0.

3. В цепи переменного тока с сопротивлением $R = 50 \text{ Ом}$ амплитудное значение напряжения 100 В, частота колебаний $\nu = 100 \text{ Гц}$. Напишите уравнение колебаний тока в этой цепи.

Ответ: $i = 2 \cos 200\pi t \text{ (А)}$.

*4. Действующее значение силы тока $I = 0,1 \text{ А}$. Определите мгновенное значение силы тока в момент времени $t = \frac{3T}{2}$.

Ответ: $-0,141 \text{ А}$.

*5. Нагревательный прибор мощностью $P = 1 \text{ кВт}$ питается от сети $U = 220 \text{ В}$. Каковы действующее и амплитудное значения силы переменного тока, протекающего по прибору?

Ответ: 4,54 А; 6,4 А.

§7. Резонанс напряжений в электрической цепи



Ключевые понятия:

- ✓ собственная частота контура
- ✓ частота внешнего периодического напряжения
- ✓ резонанс напряжений
- ✓ резонансное усиление напряжения

На этом уроке вы:

- познакомитесь с явлением резонанса напряжений, с условиями его возникновения и применениями;
- научитесь рассчитывать резонансную частоту.



Это вы знаете

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты собственных колебаний системы с частотой колебаний внешнего периодического вынуждающего воздействия называется резонансом.

Явление резонанса присуще как механическим, так и электромагнитным колебаниям. Переменный ток относится к вынужденным электромагнитным колебаниям, поэтому в цепи переменного тока, содержащего активную и реактивную нагрузки при выполнении определенных условий можно наблюдать явление резонанса. *Резонанс в цепи переменного тока с последовательно включенными источником переменного напряжения, емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением называется последовательным резонансом или резонансом напряжений.* Характерная черта резонанса напряжений — значительные напряжения на емкости и на индуктивности, намного превышающие приложенное к зажимам цепи переменное напряжение $u = U_m \cos \omega t$. То есть резонанс напряжений приводит к возрастанию напряжения на реактивных элементах, а резонансный ток будет ограничен ЭДС источника, его внутренним сопротивлением и активным сопротивлением цепи R . Таким образом, сопротивление последовательного контура на резонансной частоте минимально.

Резонанс в электрической цепи возникает, когда частота внешнего периодического напряжения будет равна собственной частоте контура $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$ (рис. 7.1). Чем меньше

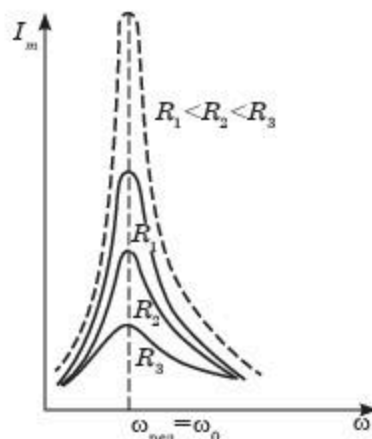


Рис. 7.1. Резонансные кривые в последовательной цепи переменного тока

активное сопротивление, тем больше амплитуда тока. На рисунке 7.1 активные сопротивления $R_1 < R_2 < R_3$. Если активное сопротивление цепи бесконечно мало $R \rightarrow 0$, то амплитуда тока неограниченно возрастает $I_m \rightarrow \infty$.

Как было отмечено выше, рассмотренный нами случай, когда активное, индуктивное и емкостное сопротивления включены последовательно, называется *резонансом напряжений*, или *последовательным резонансом*. Дело в том, что в этом случае при резонансе одновременно с ростом силы тока резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Как говорилось выше, при резонансной частоте в любой момент времени $-u_C = u_L$.

В условиях резонанса имеем: $U_{L_{рез}} = U_{C_{рез}}$.

Подставив в это уравнение значения резонансной частоты, получим:

$$\omega = \omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

$$U_{L_{рез}} = I_m X_{L_{рез}}; X_{L_{рез}} = L\omega_{рез} = L \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}; U_{L_{рез}} = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\text{Итак, } U_{L_{рез}} = U_{C_{рез}} = I_m X_{C_{рез}} = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Для обычных колебательных контуров $\frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} > 1$, поэтому напряжение как на конденсаторе, так и на катушке превышает напряжение, приложенное к цепи, причем тем больше, чем меньше R . Вообще, о резонансе имеет смысл говорить лишь при достаточно малых R , как видно из рисунка 7.1, при больших R резонанс практически не наблюдается.

Применение явления резонанса. Явление резонанса напряжений используется для усиления колебания напряжения какой-либо определенной частоты. Резонансное усиление напряжения происходит в очень узком интервале вблизи резонансной частоты. Это дает возможность выделить из многих сигналов одно колебание определенной частоты, например, на радиоприемнике (рис. 7.2), и настроиться на нужную длину волны. Входная цепь любого радиоприемника представляет собой регулируемый колебательный контур. Его резонансная частота, изменяемая с помощью регулировки емкости конденсатора, совпадает с частотой сигнала радиостанции, которую необходимо принять.



Рис. 7.2. Радиоприемник

Явление резонанса напряжений используют в так называемых электрических фильтрах, например, если необходимо устранить из передаваемого сигнала составляющую определенной частоты, параллельно приемнику ставят цепочку из соединенных последовательно конденсатора и катушки индуктивности. Тогда ток резонансной частоты этой LC -цепочки замыкается через нее, и не попадает к приемнику (нагрузке). А составляющие сигнала, частота которых не соответствует резонансной, будут проходить через приемник (рис. 7.3).

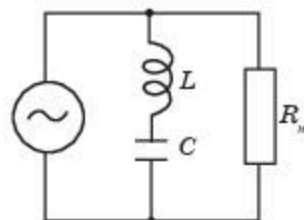


Рис. 7.3. Электрический фильтр

Вообще резонанс напряжений в электротехнике является нежелательным явлением, поскольку он вызывает перенапряжения и выход из строя оборудования. Резонанс напряжений необходимо учитывать при расчете изоляции электрических линий, содержащих конденсаторы и катушки, так, чтобы не было пробоя.



1. В чем заключается явление резонанса?
2. Чему равна резонансная частота?
3. Где используется резонанс напряжений? Назовите характерные признаки резонанса напряжений.



Упражнение 5

1. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 200$ мГн и конденсатора емкостью $C = 5 \cdot 10^{-5}$ Ф. Определите резонансную частоту.

Ответ: ≈ 50 Гц.

2. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью $L = 10^{-6}$ Гн и плоского воздушного конденсатора, площадь каждой пластины которого $S = 100$ см², резонирует на частоте $\nu_{\text{рез}} = 2 \cdot 10^7$ Гц. Определите расстояние между пластинами конденсатора.

Ответ: 0,14 см.

3. Резонанс в колебательном контуре, содержащем конденсатор емкостью $C_1 = 1$ мкФ, наступает при частоте $\nu_1 = 400$ Гц. Если параллельно этому конденсатору подключить другой конденсатор, резонанс наступит при частоте $\nu_2 = 100$ Гц. Определите емкость второго конденсатора.

Ответ: 15 мкФ.

§ 8. Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор



Ключевые понятия:

- ✓ электрические станции
- ✓ тепловые электростанции
- ✓ гидроэлектростанции
- ✓ линии электропередач
- ✓ потери энергии на линии
- ✓ трансформаторы

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основами производства и передачи электроэнергии и экономическими преимуществами переменного напряжения при передаче электрической энергии;
- изучите принцип работы и устройство трансформатора.



Производство и передача электрической энергии. Современную жизнь невозможно представить без электричества. Без преувеличения можно сказать, что изобретение электричества и использование электрической энергии было громадным скачком вперед в развитии человеческой цивилизации. Преимущества электрической энергии перед всеми другими видами энергии неоспоримы. Ее можно передавать по проводам на огромные расстояния со сравнительно малыми потерями. С помощью сравнительно простых устройств электрическую энергию можно преобразовывать в любые другие формы энергии.

Это вы знаете

Генератором тока называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую. Самыми распространенными являются электромеханические индукционные генераторы переменного тока, работа которых основана на явлении электромагнитной индукции.

Электрическая энергия вырабатывается индукционными генераторами переменного тока на электрических станциях различного типа, которые строятся вблизи запасов угля и нефти (тепловые электростанции) или рек (гидроэлектростанции). На тепловых электростанциях тепловая энергия топлива (например, угля) преобразуется в электрическую. Струя нагретого пара под высоким давлением вращает ротор паровой турбины, вместе с ним вращается ротор генератора, установленный на одной оси с паровой турбиной. На гидроэлектростанциях в электрическую энергию преобразуется механическая энергия воды. Русло реки перегораживают плотиной и поднимают уровень воды. Поток воды, падающий с высоты на лопажки гидравлической турбины, вращает ее вместе с ротором генератора.

В настоящее время значительная доля вырабатываемой электроэнергии в мире приходится на атомные электростанции. На АЭС внутриатомная энергия, высвобождаемая в результате цепной реакции деления тяжелых ядер, преобразуется в электрическую. (Работу ядерных реакторов, где происходит цепная реакция, мы рассматривали в 9 классе)

Так как электростанции строятся вблизи запасов топлива или воды, возникает необходимость передачи электроэнергии на определенные расстояния до потребителей электрической энергии. Эти расстояния могут быть довольно большими. При этом возрастают потери энергии в линиях электропередачи, так как по закону Джоуля—Ленца количество теплоты, выделяемое в проводах $Q = I^2Rt$, где $R = \rho \frac{l}{S}$ — сопротивление линии передачи — определяется заданным расстоянием l .

Как уменьшить потери энергии?

Есть два способа: 1) Можно уменьшить сопротивление проводов электрической линии. Так как расстояние l задано, для этого надо увеличивать сечение проводов S или использовать материалы с малыми значениями удельного сопротивления ρ , например серебро. Ясно, что такой способ не даст желаемой экономии, так как это непрактично.

2) Можно уменьшать силу тока, но так, чтобы передаваемая мощность осталась прежней. Так как мощность тока определяется произведением силы тока на напряжение, для уменьшения силы тока надо повышать напряжение. Таким образом, проблема передачи электроэнергии связана с трансформацией тока.

При заданной мощности генератора потери энергии на линии обратно пропорциональны напряжению, которое подается на линию.

Рассчитаем потери энергии при данной мощности генератора P в случаях, когда напряжение равно U_1 и U_2 :

$$Q_1 = I_1^2Rt = \frac{P^2}{U_1^2}Rt; \quad Q_2 = I_2^2Rt = \frac{P^2}{U_2^2}Rt;$$

Их отношение:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U_2^2}{U_1^2}.$$

Если напряжение, подаваемое на линию, недостаточно высокое, потери за единицу времени в проводах могут превысить мощность генератора и энергия до потребителя вообще не дойдет.

Потеря мощности в проводах, идущих от электростанции к потребителю при заданной мощности генератора $P = IU \cos \varphi$ равна:

$$\Delta P = I^2R = \frac{P^2 \cdot R}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{2\rho l P^2}{U^2 S \cos^2 \varphi} \quad (8.1)$$



Рис. 8.1. Повышающий трансформатор

Здесь S — площадь поперечного сечения, l — длина одного провода, ρ — удельное сопротивление материала подводящих проводов.

Из всего сказанного ясно, что на линию электропередачи необходимо подавать высокое напряжение. Генераторы переменного тока вырабатывают напряжение, не превышающее 20 кВ. Для дальнейшего повышения напряжения используются так называемые *повышающие трансформаторы* (рис. 8.1). Обычно применяют несколько каскадов повышения напряжения, затем ток подается на линию передачи. На другом конце линии используют *понижающие трансформаторы* и в несколько приемов понижают напряжение. Известно, что наиболее широко в нашей стране используется напряжение 220 В.

Трансформаторы. Трансформатор является не только одной из главных составляющих в системе передачи электроэнергии на расстояние, но и используется во многих различных приборах и аппаратах. В современной технической аппаратуре и технологиях трудно назвать электронное устройство, где бы не использовался трансформатор

Изменение напряжения переменного тока с одновременным изменением силы тока практически без изменения его мощности называется трансформацией переменного тока.

Прибор, осуществляющий трансформацию переменного тока, называется *трансформатором* (рис. 8.1).

Его действие основано на явлении электромагнитной индукции. Датой изобретения трансформатора считается 30 ноября 1876 года, когда русский изобретатель П. Н. Яблочков получил патент на трансформатор с разомкнутым сердечником. Это был стержень с намотанными на него обмотками. В 1884 году в Англии братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсонами был создан первый трансформатор с замкнутым сердечником.

Трансформатор представляет собой замкнутый стальной сердечник, собранный из изолированных пластин в целях уменьшения токов Фуко (рис. 8.2). Трансформаторная сталь легко перемагничивается с минимальными потерями. На сердечник надеваются две катушки. Одна

катушка включается в цепь переменного тока и называется первичной.

Ко второй катушке подключают потребителя, т. е. электрические приборы, потребляющие электроэнергию. Она называется *вторичной* (рис. 8.2). Катушки имеют малое активное сопротивление.

Генератор поддерживает в первичной катушке переменное напряжение U_1 . Переменный ток, идущий по первичной катушке, создает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Он возбуждает в каждом витке ЭДС самоиндукции первичной и такую же ЭДС индукции в каждом витке вторичной катушки. Если число витков первичной катушки n_1 , а вторичной — n_2 , то $\mathcal{E}_1 = en_1$, $\mathcal{E}_2 = en_2$, где e — ЭДС индукции в одном витке любой из катушек. Отсюда:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (8.2)$$

Так как активное сопротивление мало, для первичной катушки можно написать: $U_1 \approx |\mathcal{E}_1| = n_1 e$.

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно. Поэтому их отношение в формуле (8.2) можно заменить отношением действующих значений \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 этих ЭДС:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (8.3)$$

Величина, равная отношению числа витков первичной и вторичной обмоток $k = \frac{n_1}{n_2}$ называется *коэффициентом трансформации*.

При повышении напряжения в несколько раз сила тока уменьшается во столько же раз. Коэффициент полезного действия современных трансформаторов $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$ доходит до 99%, т. е. потери энергии не превышают 1—2%.

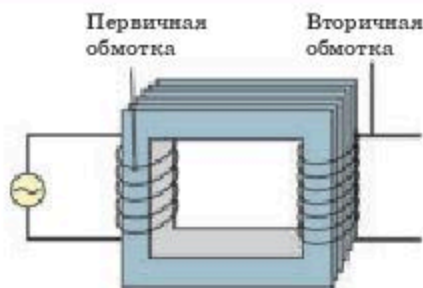


Рис. 8.2. Устройство трансформатора

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

В Казахстане трансформаторы выпускают на заводах холдинговой компании "Alageum Electric", которая включает в себя более 30-ти крупных предприятий и заводов, в числе которых — трансформаторные заводы в городах Кентау, Шымкент, Уральск, Алматы и Актау. Старейшим из них является Кентауский завод — крупнейший производитель трансформаторного оборудования в СНГ, в котором первый трансформатор ТМ-180/10 был выпущен 10 июля 1960 года. Он расположен в городе Кентау Туркестанской области.



Результаты полувекового опыта работы Кентауского завода были внедрены в "Уральском трансформаторном заводе", продукция которой на 90% ориентирована на экспорт, в числе которых сухие и масляные трансформаторы на 6,10,20 кВ, мощностью до 2500 кВА; комплектные трансформаторные подстанции различного типа исполнения; комплектные распределительные устройства серии КСО, КРУ, КРУН на 10,20 кВ; блочно-модульные здания различного назначения; низковольтные устройства. Производством Алматинского электромеханического завода являются высоковольтное и низковольтное оборудование, комплектные трансформаторные подстанции и многое другое.

В Шымкенте 26 апреля 2019 года прошла презентация нового завода по производству трансформаторного оборудования Asia Trafo. Мощность завода — 120 трансформаторов в год. Благодаря его вводу в эксплуатацию холдинг Alageum Electric закрывает всю линейку трансформаторов, нужную казахстанскому рынку, — от 6 до 500 киловольт. Предполагается, что теперь потребность казахстанского рынка будет обеспечена на 90%. При этом доля местного содержания достигает 65—70%.

Надо отметить, что потери энергии при передаче постоянного тока были бы гораздо меньше, так как при его использовании не было бы потерь на перемагничивание. Но постоянный ток не трансформируется. Вспомним, что работа трансформаторов основана на явлении электромагнитной индукции. Можно трансформировать переменный ток, затем его выпрямить при высоком напряжении и подать на линию передачи, затем опять преобразовать в переменный ток и опять трансформировать до нужного низкого напряжения. Но возникают трудности преобразования тока, поэтому в настоящее время используют переменный ток.

Традиционными источниками энергии является органическое топливо — уголь, газ, нефть. Но их запасы в природе ограничены. И рано или поздно наступит день, когда они иссякнут. Кроме того, глобальной проблемой современности становится загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу в процессе сгорания органического топлива. Поэтому в настоящее время очень актуальной становится проблема поиска и разработки альтернативных, т. е. нетрадиционных, возобновляемых источников энергии. Рассмотрим некоторые из них.

Солнечная энергия. В так называемых гелиоустановках как альтернативный источник энергии используется солнечное излучение.

Излучение Солнца можно использовать для нужд теплоснабжения, а также для получения электричества с помощью фотоэлементов. К преимуществам солнечной энергии можно отнести возобновляемость, бесшумность, отсутствие вредных выбросов в атмосферу при переработке солнечного излучения в другие виды энергии.

Недостатками солнечной энергетики является дороговизна солнечных батарей, зависимость интенсивности солнечного излучения от климатических условий, от суточного и сезонного ритма. Кроме того, для строительства солнечных электростанций необходимы очень большие

площади, к тому же эти площади в процессе работы солнечных батарей нагреваются, что может привести к климатическим изменениям местности.

Ветряная энергия. Другим перспективным источником энергии является ветер. В ветрогенераторах сила ветра используется для того, чтобы привести в движение ветряное колесо. Это вращение в свою очередь передается ротору электрического генератора. Преимуществом ветряного генератора является, прежде всего, то, что в ветряных местах, ветер можно считать неисчерпаемым источником энергии. Кроме того, ветрогенераторы не загрязняют атмосферу вредными выбросами. К недостаткам устройств по производству ветряной энергии можно отнести непостоянство силы ветра и малую мощность единичного ветрогенератора. Также ветрогенераторы производят много шума, поэтому их стараются строить вдали от мест проживания людей.

К альтернативным источникам энергии можно также отнести тепловую энергию воды, где используется разность температуры слоев воды в океане, энергию рек, геотермальную энергию.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Проблеме развития альтернативных источников энергии была посвящена Международная специализированная выставка ЭКСПО-2017, которая прошла в г. Нур-Султане с 10 июня по 10 сентября 2017 года.

Тема выставки – «Энергия будущего». В ЭКСПО-2017 приняли участие 115 государств и 22 международных организаций. Выставку посетили порядка 4 млн. человек, из которых 0,5 млн. приехали из других стран.



1. Расскажите, где и как производится электрическая энергия?
2. Расскажите о способах уменьшения потерь энергии на линии передачи электроэнергии.
3. Почему используются высоковольтные линии передачи электроэнергии?
- 4. Начертите схему передачи электроэнергии.
- 5. В чем преимущества и недостатки гидроэлектростанций перед АЭС и ТЭЦ?
6. В каких целях используется трансформатор?
- * 7. Объясните принцип действия трансформатора.
8. Что такое коэффициент трансформации?
- * 9. Почему сердечник трансформатора изготавливают из изолированных пластин?



Соберите информацию об ЭКСПО-2017 и подготовьте презентацию. Посетили ли вы лично эту выставку, если да, расскажите о своих впечатлениях.

§9. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и в мире



Ключевые понятия:

- ✓ потребление энергии
- ✓ энергетические ресурсы
- ✓ установленная мощность электростанций
- ✓ электроснабжение
- ✓ электрические сети

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными источниками электроэнергии в Казахстане и в мире.



С развитием общества потребление энергии растет все более быстрыми темпами. Из всех видов потребляемой энергии основную роль играет электрическая энергия. Это обусловлено возможностью преобразования ее во все другие виды энергии без существенных потерь и передачи ее на большие расстояния.

Казахстан обладает крупными запасами энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, уран) и является энергетической державой. Около 70% электроэнергии в Казахстане вырабатывается из угля, 14,6% — из гидроресурсов, 10,6% — из газа и 4,9% — из нефти.

Рассмотрим основные типы электрических станций Казахстана:

1) ГРЭС — исторически получила свое название от слов государственная районная электростанция, в настоящее время потеряла первоначальный смысл “районная”, на самом деле это мощная тепловая конденсационная электростанция (КЭС), работающая в объединенной энергосистеме страны. Принцип работы ГРЭС основан на использовании сжатого и нагретого до высокой температуры (примерно до 540°С) пара. Нагретый пар под высоким давлением по трубопроводам подается в паровую турбину, где он расширяется до очень низкого давления, при этом вращает ротор турбины. В свою очередь турбина приводит в движение ротор электрогенератора.

2) ТЭЦ — теплоэлектроцентраль. Это тепловая электростанция, в которой после производства электрической энергии часть тепловой энергии пара используется для обеспечения горячего водоснабжения и отопления жилых помещений и промышленных объектов

3) ГЭС — электростанция, в которой источником энергии является водный массив, поднятый на определенную высоту. Для этого в руслах подходящих рек строят плотины и водохранилища. Напор воды, падающей с высоты на лопасти гидротурбины, приводит в действие генераторы. Таким образом, в ГЭС потенциальная энергия воды преобразуется в электрическую.

В настоящее время производство электрической энергии в Казахстане осуществляют 128 электрических станций различных типов. По состоянию на 01.01.2018 г. общая установленная мощность электростанций Казахстана составляла 21 672,9 МВт, располагаемая мощность — 18 791,4 МВт. По типу электростанций выработка электроэнергии распределяется следующим образом: ГРЭС (КЭС) — 48,9%; ТЭЦ — 36,6%; ГЭС 12,3%. Остальной небольшой процент приходится на долю нетрадиционных источников энергии.

Основными потребителями электроэнергии в Казахстане являются: промышленность — 68,7%, бытовое потребление населения — 9,3%, сектор услуг — 8%, транспорт — 5,6%, сельское хозяйство — 1,2%.

Электрические станции разделяются на электростанции национального значения, электростанции промышленного значения и электростанции регионального значения.

К электрическим станциям национального значения относятся крупные тепловые электрические станции, обеспечивающие выработку и продажу электроэнергии потребителям на оптовом рынке электрической энергии Республики Казахстан, такие как: Экибастузская ГРЭС-1 (рис. 9.1); Экибастузская ГРЭС-2; ГРЭС «Корпорация Казахмыс»; Жамбылская ГРЭС и т. д., а также гидравлические электростанции большой мощности: Бухтарминская ГЭС, Шульбинская ГЭС (рис. 9.2), Усть-Каменогорская ГЭС (рис. 9.3)

К электростанциям промышленного значения относятся ТЭЦ с комбинированным производством электрической и тепловой энергии, которые служат для электро-теплоснабжения крупных промышленных предприятий и близлежащих населенных пунктов. К ним относятся: ТЭЦ-3 ТОО «Караганда



Рис. 9.1. Экибастузская ГРЭС-1



Рис. 9.2. Шульбинская ГЭС



Рис. 9.3. Усть-Каменогорская ГЭС

Энергоцентр”; ТЭЦ ПВС, ТЭЦ-2 АО “Арселор Миттал Темиртау”; ТЭЦ АО “ССГПО” ERG, “Евразийская группа”; Балхашская ТЭЦ, Жезказганская ТЭЦ ТОО “Kazakhmys energy”; ТЭЦ-1 АО “Алюминий Казахстана” ERG, “Евразийская группа” и другие.

Электростанции регионального значения — это ТЭЦ, интегрированные с территориями, которые осуществляют реализацию электрической энергии и теплоснабжение близлежащих городов.

Электрические сети Республики Казахстан представляют собой совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их линий электропередачи, напряжением 0,4—1150 кВ, предназначенных для передачи и (или) распределения электрической энергии.

Линии электропередачи и распределительные сети Казахстана состоят из трех частей: две на севере и одна на юге. На севере она соединена с Единой энергетической системой России, на юге — с Объединенной энергетической системой Средней Азии. Эти системы соединяются между собой одной линией. В настоящее время ведётся строительство второй линии, соединяющей Северную и Южную энергосистемы и рассматривается возможность строительства линии, соединяющей Западную энергосистему с Северной.

Системообразующей сетью в Республике Казахстан является национальная электрическая сеть (НЭС), которая обеспечивает электрические связи между регионами республики и энергосистемами сопредельных государств (Российской Федерации, Республики Кыргызстан и Республики Узбекистан), а также выдачу электрической энергии электрическими станциями и ее передачу оптовым потребителям. НЭС находится на балансе Казахстанской компании по управлению электрическими сетями АО “КЕГОС”.

Сектор электроснабжения рынка электрической энергии Республики Казахстан состоит из энергоснабжающих организаций (ЭСО), которые осуществляют покупку электрической энергии у энергопроизводящих организаций или на централизованных торгах и последующую ее продажу конечным розничным потребителям.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Самая первая в мире электростанция была построена в 1882 г. в Нью-Йорке. На ней были установлены несколько генераторов Эдисона общей мощностью свыше 500 кВт. Двигатели приводились в движение паром из паровых котлов, сжигающих уголь. Напряжение регулировалось автоматически, роторы двигателя и генератора были соединены напрямую. Уголь в котел подавался механически, зола и шлак также автоматически удалялись. Станция снабжала электроэнергией целый район Нью-Йорка площадью около 2,5 квадратных километров.

Первые электростанции вырабатывали ток крайне низкого по сегодняшним меркам напряжения — около 110 В. Как мы знаем, чем ниже напряжение, тем выше сила тока, и тем больше потери энергии в электрических проводах, по которым этот ток протекает. Поэтому в то время о передаче электроэнергии на дальние расстояния не было и речи.

Это обстоятельство заставляло строить первые электростанции в центре городов — то есть в месте, наименее приспособленном для нового строительства. Дорогая земля, проблемы с подвозом топлива и отвозом отходов, проблемы с водоснабжением, недостаток места заставляли строить электростанции многоэтажными (например в США), или располагать их в баржах (например, в Петербурге)

В Казахстане, как и во всем мире, в последние годы активно внедряются в эксплуатацию возобновляемые источники электрической энергии, строятся ветряные и солнечные электростанции.

В августе 2015 года была введена в эксплуатацию первая в Казахстане ветровая электростанция (ВЭС) промышленного типа мощностью 0,05 МВт. Она расположена в Акмолинской области близ города Ерейментау (рис. 9.4).

Проект был осуществлен ТОО “Первая ветровая электрическая станция”, дочерней компанией АО “Самрук-Энерго”.

В настоящее время мощность Ерейментауской ВЭС составляет 45 МВт, она состоит из 22 ветроустановок, мощность каждой из которых равна 2,05 МВт, и новой собственной подстанции 220/35кВ. ВЭС производит 172,2 млн. кВтч электроэнергии в год без использования органического топлива и выбросов углекислого газа. Вся вырабатываемая электроэнергия поступает в Национальную электрическую сеть Казахстана. Надо отметить, что за счет энергии, выработанной Ерейментауской ВЭС, электроснабжением были обеспечены объекты Международной специализированной выставки “ЭКСПО-2017”.

Существенный вклад в ветроэнергетику вносит Кордайская ВЭС мощностью 21 МВт, находящаяся в Кордайском районе Жамбылской области. На ней установлен 21 одинаковый ветрогенератор фирмы Nordex с высотой башни 60 м и диаметром ротора 54 м. Здесь же была построена высоковольтная подстанция 110/10 кВ “ВЭС Кордай” с двумя трансформаторами мощностью по 16 МВ · А и линия электропередачи напряжением 110 кВ, длиной 2,4 км для связи с энергосистемой.



Рис. 9.4. Ерейментауская ВЭС



Рис. 9.5. Капшагайская СЭС

До конца 2019 года планируется ввести в эксплуатацию еще три объекта на 57 МВт в Мангистауской и Акмолинской областях. Ожидается, что к концу 2019 года будут функционировать 18 ВЭС общей мощностью 285 МВт.

Активно развивается в нашей стране также использование энер-

гии солнца. В Казахстане потенциал солнечной энергии довольно велик, так длительность солнечного света в году в среднем составляет 2500 часов. На юге страны в среднем 300 дней в году являются солнечными.

Одна из первых солнечных электростанций нашей страны — СЭС “Отар”, первая очередь которой общей мощностью 7 МВт введена в эксплуатацию в конце 2012 года. 20 декабря 2013 года был дан старт работе Капшагайской СЭС, ее проектная мощность составляет 150 МВт (рис. 9.5).

Активное строительство солнечных электростанций ведется на юге страны: в Сарыагашском (мощностью 20 МВт), Мактааральском (4,95 МВт) и Сузакском (50 МВт) районах Туркестанской области, а также в городах Арысь (14 МВт) и Кентау (50 МВт). К 2025 году в регионе должно быть 13 ВИЭ-проектов общей мощностью 148,8 МВт.

В настоящее время доля возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе составляет немногим более 1%, планируется достигнуть показателя 3% к 2020 году, 10% к 2030 году и 50% к 2050 году.

Производство и потребление электроэнергии в мире. Спрос на электроэнергию в мире возрастает из года в год. Потребление энергии в мировом масштабе изучают и ведут учет такие учреждения, как Международное энергетическое агентство (IEA), Energy Information Administration (EIA).

По некоторым прогнозам к 2035 году новыми потребителями электроэнергии станут 1,6 млрд человек за счет прироста населения, еще 2,7 млрд человек, не имеющих в настоящее время доступ к электроэнергии. В результате к тому времени потребление электроэнергии возрастет в мире на 40—50%.

По расчетам некоторых международных организаций, на долю промышленности приходится 37% от всей произведенной электроэнергии, тогда как транспорт потребляет около 20%. На освещение, отопление жилых помещений и бытовые электроприборы используется 11%, на коммерческие нужды 5% от общего количества произведенной энергии.

Оставшиеся 27% мирового потребления энергии теряются при производстве и передаче электроэнергии.

Основным источником энергии для электростанций остается органическое топливо, что порождает глобальную проблему загрязнения окружающей среды. По данным МАЭ (Международная Академия Экологии) в 2013 году мировые выбросы углекислого газа от сжигания ископаемого топлива составили 32 гигатонны. Если учитывать прогноз на прирост потребления электроэнергии к 2035 году, то необходимы кардинальные меры по предотвращению экологической катастрофы.

Для этого в настоящее время международное сообщество прилагает большие усилия. Например, быстрыми темпами растет потребление природного газа вместо угля, ожидается что к 2040 году около 60% электроэнергии будет производиться из возобновляемых источников.



- 1. Какие основные типы электростанций действуют в настоящее время на земле Казахстана? Расскажите о принципах их работы.
2. Какие электростанции имеют статус национального значения? Приведите примеры.
3. Назовите электростанции промышленного значения.
4. Что означает НЭС?
- 5. Расскажите о тенденциях мирового потребления электроэнергии.
- *6. Как связаны рост производства и потребления электроэнергии с проблемой загрязнения окружающей среды?



Напишите рассказ "Потребление электроэнергии в моей семье".

Для этого изучите технические паспорта всех осветительных и бытовых приборов в вашей квартире. Выясните приблизительно, сколько времени в сутки вы пользуетесь каждым прибором. Рассчитайте, какое количество электроэнергии в месяц использует ваша семья. Проверьте по квитанции оплаты расход электроэнергии за такой же период времени и сравните с вашими расчетами. Насколько разнятся эти значения? Почему? Сделайте выводы.

Самое важное в главе 3

Генератором тока называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

Основными частями всякого индукционного генератора являются: индуктор, якорь, кольца со щетками.

Электрический ток, который с течением времени периодически изменяется как по величине, так и по направлению, называется *переменным*.

Резонанс в электрической цепи возникает, когда частота внешнего периодического напряжения будет равна собственной частоте контура $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$

Трансформатор — это устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения без изменения частоты и практически без потерь мощности.

Величина, равная отношению числа витков первичной и вторичной обмоток $k = \frac{n_1}{n_2}$ называется *коэффициентом трансформации*.

Раздел II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

§ 10. Электромагнитное поле



Ключевые понятия:

- ✓ теория Максвелла
- ✓ вихревое электрическое и магнитное поля
- ✓ ток смещения
- ✓ электромагнитное поле

На этом уроке вы:

- узнаете о теории Максвелла;
- объясните, как образуется переменное магнитное поле и почему.



Это вы знаете

Универсальные свойства многих закономерностей волновых процессов выражаются в механических волнах в упругой среде, волна на поверхности воды и т. д. Эта особенность также характерна для электромагнитной волны, которая представляет собой процесс распространения колебаний электромагнитного поля. Однако, если другие виды волн распространяются в какой-то материальной среде, электромагнитные волны могут распространяться как в вакууме, так и в веществе. К **электромагнитным волнам** относятся *радиоволны, инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.*

В механической картине мира, созданной И. Ньютоном, считалось, что все тела действуют друг на друга либо непосредственно, либо через пустоту и мгновенно. В этом состоит суть теории дальнодействия. Но она не смогла объяснить характер протекания электромагнитных явлений. Английский физик М. Фарадей, введя в физику понятие поле, предложил миру теорию близкодействия — любые взаимодействия осуществляются посредством силовых полей и с конечной скоростью.

В 1860—1865 гг. английский физик Д. К. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, которая объединила электрическое и магнитное взаимодействия в единое электромагнитное. Основу теории электромагнитного поля составляет система уравнений Максвелла. Из уравнений Максвелла следовало, что должны существовать электромагнитные волны, что и было подтверждено экспериментами Г. Герца.



Джеймс Максвелл
(1831—1879)

Возникновение переменного электрического поля при изменении магнитного поля. Исследуя открытое Фарадеем в 1831 г. явление электромагнитной индукции, Максвелл пришел к выводу: *любое изменение магнитного поля вызывает появление в окружающей среде вихревого электрического поля.*

Оказалось, что в опытах Фарадея индукционные ЭДС в замкнутом проводнике создаются этим вихревым электрическим полем. Особенность этого явления заключается в том, что вихревое электрическое поле появляется не только в проводнике (он в данном случае — прибор, обнаруживающий это поле), но и в окружающем проводник пространстве. При изменении индукции магнитного поля $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ в любых точках пространства возникает вихревое электрическое поле. Силовые линии электрического поля охватывают линии магнитной индукции и располагаются в плоскости, перпендикулярной им.

Если магнитная индукция возрастает $\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0$, то направление вектора напряженности вихревого электрического поля \vec{E} определяется *правилом левой руки* (рис. 10.1, а). При уменьшении магнитной индукции $\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0$ направление вектора напряженности \vec{E} определяется *правилом правой руки* (рис. 10.1, б). Таким образом, электрические заряды и переменное магнитное поле порождают электрическое поле.

Из идей Максвелла следовал и другой важный вывод: *в природе отсутствуют магнитные заряды.* Здесь, кажется, не сохраняются свойства обратимости и симметрии в природе. Почему переменное

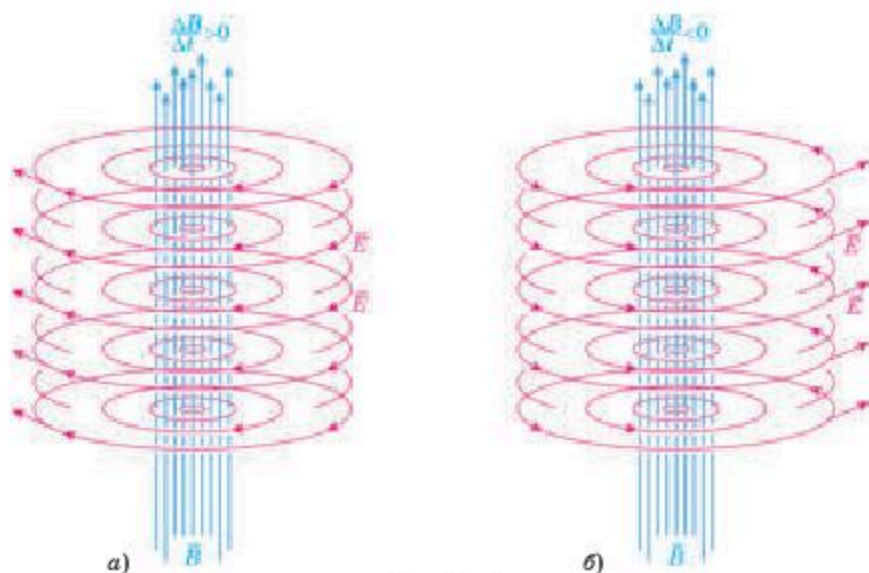


Рис. 10.1

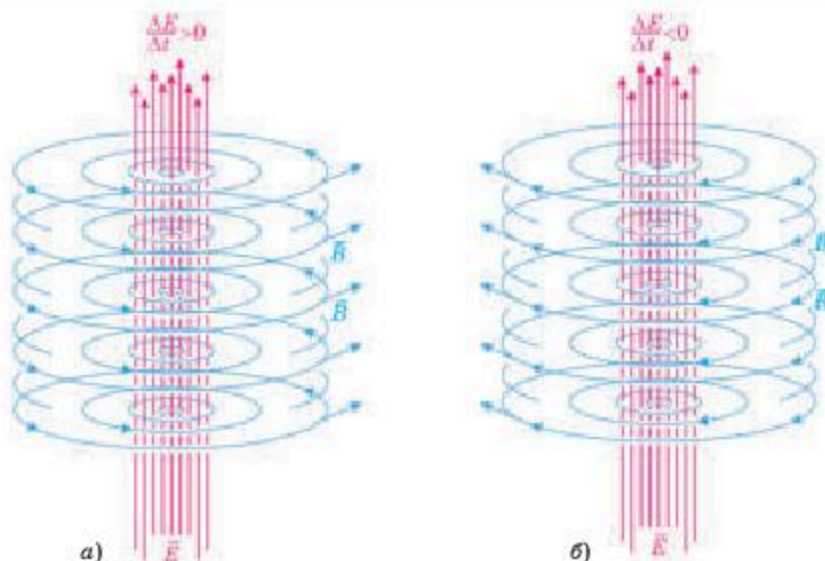


Рис. 10.2

электрическое поле в свою очередь не осуществляет обратный процесс, порождающий магнитное поле?

Возникновение переменного магнитного поля при изменении электрического поля. Существование такого процесса в природе было предсказано Максвеллом. К этому выводу он пришел, изучая взаимодействие проводников, по которым течет постоянный ток. Это взаимодействие подчиняется закону Ампера. Максвелл предположил, что магнитное поле порождается изменяющимся во времени электрическим полем. Переменное электрическое поле в вакууме или в диэлектрике Максвелл назвал *током смещения*. Таким образом, Максвелл впервые выдвинул гипотезу о том, что переменное электрическое поле всегда вызывает появление переменного магнитного поля.

Линии индукции магнитного поля охватывают линии напряженности электрического поля и перпендикулярны им. Вектор индукции магнитного поля, возникающего при росте напряженности электрического поля $\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$, образует с вектором \vec{E} правый винт (рис. 10.2, а). И наоборот, при уменьшении напряженности электрического поля $\frac{\Delta E}{\Delta t} < 0$, вектор магнитной индукции \vec{B} с вектором \vec{E} образует левый винт (рис. 10.2, б).

Единство и относительность электрического и магнитного полей. После установления Максвеллом тесной связи между электрическим и магнитным полями было доказано существование особого вида материи — *электромагнитного поля*. Установили невозможность существования отдельно, независимо друг от друга, электрического и магнитного полей. Электрическое поле создается электрическими зарядами или переменным магнитным полем. Магнитное поле создается

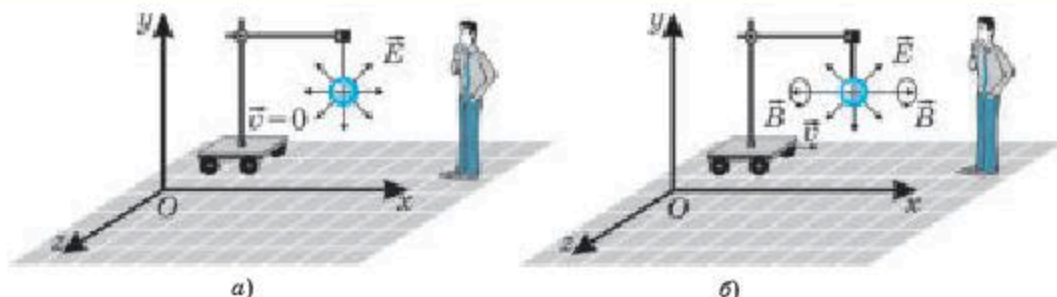


Рис. 10.3

электрическим током или вихревым электрическим полем. В частном случае постоянного поля обнаруживаются свойства электрического поля ($\vec{E} \neq 0$, $\vec{B} = 0$) или магнитного поля ($\vec{B} \neq 0$, $\vec{E} = 0$). Нельзя утверждать, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не указав систему отсчета, по отношению к которой эти поля рассматриваются. Рассмотрим заряженный шар, подвешенный на шелковой нити (рис. 10.3). Наблюдатель находится в системе отсчета, связанной с землей. У покоящегося относительно земли заряженного шара проявляется только электрическое поле (рис. 10.3, а). Движущийся заряженный шар в пространстве создает еще и магнитное поле (рис. 10.3, б). Если наблюдатель станет на движущуюся тележку, то для него вокруг заряженного шара будет наблюдаться только электрическое поле.

То есть существование в пространстве того или иного поля зависит от выбора системы отсчета. И не одно из полей не имеет преимуществ друг перед другом.

Электромагнитное поле едино. Анализируя свои уравнения, описывающие электромагнитное поле, Максвелл сделал вывод: *электромагнитное поле может распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн.* Благодаря теории Максвелла были объяснены многочисленные явления, происходящие в звездах и на планетах, даже во Вселенной, а также в микромире и внутри атомов.



1. Какие идеи Фарадея нашли свое продолжение в теории Максвелла?
2. Каковы источники вихревого электрического поля?
3. Как можно объяснить, что магнитное поле создается не только движущимися зарядами, но и изменяющимся во времени электрическим полем?
4. Какие идеи привели к введению понятия электромагнитного поля?
5. Почему взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля в одной системе отсчета могут быть взаимно перпендикулярны и в другой?
6. Объясните, почему при переходе из системы отсчета, где существует электрическое поле, в другую систему отсчета образуется магнитное поле, и наоборот.

§ 11. Электромагнитные волны



Ключевые понятия:

- ✓ скорость распространения электромагнитной волны
- ✓ поперечные волны
- ✓ свет — электромагнитная волна
- ✓ длина волны

На этом уроке вы:

- объясните условия распространения электромагнитных волн.



Распространение колебаний переменного электромагнитного поля в пространстве называется **электромагнитными волнами**. По предположению Максвелла, электромагнитная волна может распространяться вдоль проводника с током, в диэлектрике и даже в вакууме, где нет упругой среды. Одно из важнейших следствий теории Максвелла: *электромагнитная волна распространяется с конечной скоростью*. По его расчетам скорость распространения электромагнитной волны равна:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}},$$

а в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (11.1)$$

где $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ — электрическая и $\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ — магнитная постоянные. Это важнейшее свойство электромагнитного поля. Скорость распространения электромагнитной волны в среде определяется формулой Максвелла:

$$v = \frac{c}{n} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (11.2)$$

где n — показатель преломления среды; ε — диэлектрическая проницаемость; μ — магнитная проницаемость среды.

Найденная с помощью расчетов скорость электромагнитной волны в вакууме оказалась равной скорости света, определенной прямыми измерениями, что имело огромное значение: **свет** — это частный случай **электромагнитных волн**. (С некоторыми свойствами света, подтверждающими эти выводы, ознакомимся в следующей главе).

Теперь рассмотрим механизм распространения электромагнитной волны в пространстве. При изучении предыдущей темы мы подробно рассмотрели взаимные превращения переменных электрического и маг-

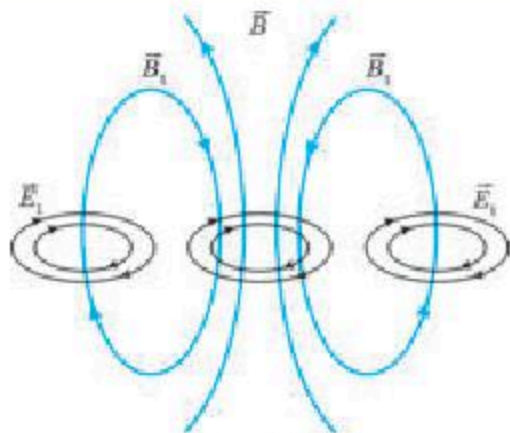


Рис. 11.1

нитного поля. Чтобы осуществить эти взаимные преобразования в какой-либо части пространства, необходимо создать возмущение одного из полей. На рисунке 11.1 показан процесс распространения возмущения вихревых электрического и магнитного полей. Это можно осуществить с помощью колеблющегося около равновесного положения заряда или движущегося по окружности заряда. Вокруг заряда возникает колеблющееся с доста-

точно большой частотой электрическое поле, модуль и направление вектора напряженности \vec{E} которого изменяются периодически. В этот же момент возникает вектор индукции магнитного поля \vec{B} , модуль и направление которого также изменяются периодически.

Эти колебания полей доходят до ближайших точек окружающего пространства, куда взаимно перпендикулярные векторы напряженности электрического и индукции магнитного полей дойдут с некоторым отставанием.

Таким образом, электромагнитное поле распространяется в пространстве со скоростью равной $3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ в виде электромагнитной волны (рис. 11.2).

Фазы колебаний бывают одинаковы в любой точке векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитной волны.

Расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одной и той же фазе, называется длиной электромагнитной волны:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \quad (11.3)$$

Основной характеристикой электромагнитной волны является ее частота колебаний ν (или период T). При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую меняется скорость распространения волны и ее длина, а частота остается постоянной.

Направления колебания векторов напряженности электрического поля и индукции магнитного поля перпендикулярны направлению распространения волны. Значит, электромагнитная волна является поперечной волной. Скорость распространения электромагнитной волны перпендикулярна плоскостям векторов напряженности и индукции. Значит, векторы и в электромагнитной волне взаимно перпендикулярны и также перпендикулярны направлению распространения волны. Если правый буравчик повернуть от вектора \vec{E} к вектору \vec{B} , то направление

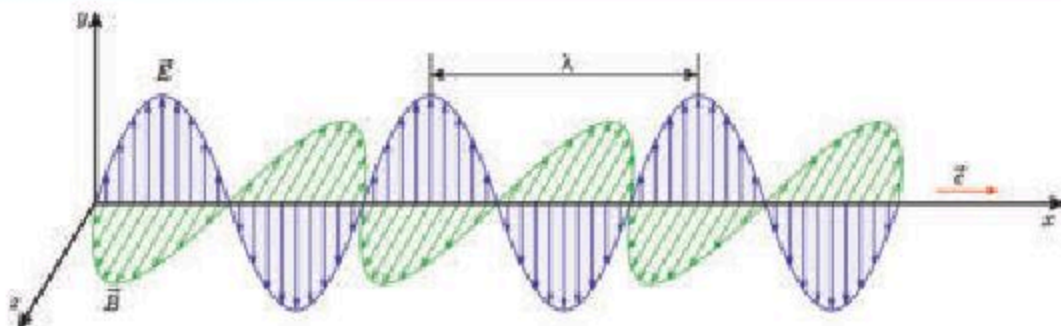


Рис. 11.2

поступательного движения буравчика совпадает с направлением вектора скорости волны \vec{c} (рис. 11.2). Известно, что электромагнитные волны испускаются и распространяются колеблющимися зарядами. Как это происходит?

При изменении силы тока в проводнике изменяется и его магнитное поле. Изменение силы тока вызвано изменением скорости движения электрических зарядов в проводнике, т. е. ускорением движения зарядов. Этот факт подтверждается экспериментом. Значит, **электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении электрических зарядов**. Чем больше ускорение зарядов, тем больше интенсивность испускаемых волн. При ускоренном движении заряженной частицы появляется характерное для электромагнитного поля инерционное свойство. Электромагнитное поле отрывается от ускоренно движущейся частицы и свободно распространяется в форме электромагнитной волны.



1. Какую волну называют электромагнитной?
2. Как определили скорость распространения электромагнитной волны в вакууме и среде?
3. Возникает ли электромагнитная волна, если скорость изменений напряженности электрического поля стабильна в определенной области пространства?
4. Как электрические и магнитные векторы гармонической электромагнитной волны изменяются на расстоянии от ее источника?
5. Как можно определить направление распространения электромагнитной волны?
6. Почему возникают электромагнитные волны при ускоренном движении электрического заряда?

§ 12. Излучение электромагнитных волн.

Опыты Герца



Ключевые понятия:

- ✓ Генрих Герц
- ✓ вибратор Герца
- ✓ опыты Герца
- ✓ импульс тока

На этом уроке вы:

- узнаете, какие физические процессы могут служить источником электромагнитных колебаний.



Генрих Герц
(1857—1894)

Правильность теории может подтвердить лишь эксперимент, и в этом споре последнее слово всегда остается за ним. В существовании электромагнитных волн в природе у Максвелла не было сомнений. Как большинство физиков того времени, известный немецкий физик Генрих Герц относился к теории Максвелла скептически. Но он и был первым физиком, подтвердившим правоту Максвелла экспериментально — в 1887—1888 гг. доказал существование электромагнитных волн.

Открытый вибратор. Как получить экспериментально электромагнитные волны?

Как мы знаем, колебания электромагнитного поля в колебательном контуре не могут распространяться в пространстве. Причина этого в том, что *переменное электрическое поле почти полностью сосредоточено между обкладками конденсатора, а магнитное поле — в катушке* (рис. 12.1, а). Такой контур называется **закрытым**. Если обкладки конденсатора удалять друг от друга, то электрическое поле начнет охватывать все больше объема в пространстве. При уменьшении емкости конденсатора по формуле Томсона собственная частота колебаний $\left(\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}\right)$ растет.

Если одновременно еще уменьшить число витков катушки, то индуктивность L будет уменьшаться (рис. 12.1, б). Уменьшая площадь обкладок конденсаторов и одновременно распрямляя катушку, в конце концов получим отрезок прямого провода (рис. 12.1, в). Эта установка называется **открытым колебательным контуром**, или **вибратором Герца**. Емкость и индуктивность открытого вибратора незначительны. Поэтому собственная частота колебаний электромагнитного поля вокруг вибратора очень высока.

Если сила переменного тока в замкнутой цепи вдоль всего проводника одинакова, то в открытом вибраторе ситуация совсем другая. В один и тот же момент времени в различных частях вибратора сила тока раз-

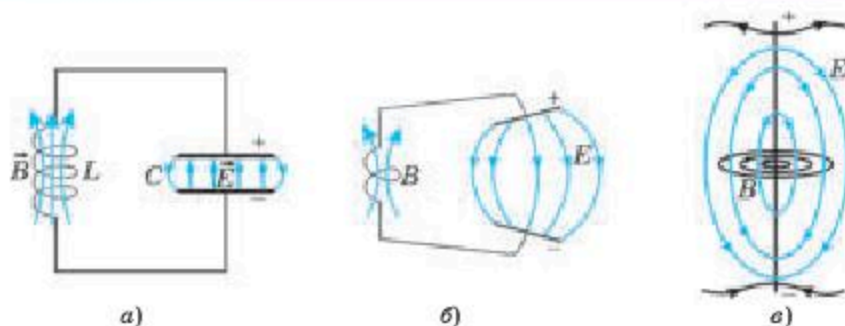


Рис. 12.1

лична; когда сила тока в его середине достигает своего максимума, на его концах она равна нулю. Когда в открытом вибраторе сила тока достигает своего максимального значения, магнитное поле, возникающее вокруг него, также достигает своего максимума. А напряженность электрического поля равна нулю (рис. 12.2, а). Через четверть периода ($t \approx \frac{1}{4}T$) сила тока равна нулю, на концах вибратора накапливаются электрические заряды (рис. 12.2, б). Напряженность электрического поля достигает максимального значения. Так появляются колебания силы тока и зарядов, т. е. электромагнитное поле охватывает все пространство вокруг вибратора.

Таким образом, *в окружающем открытый вибратор пространстве под влиянием переменного магнитного поля появляется вихревое электрическое поле, которое в свою очередь порождает магнитное поле. В результате вокруг вибратора возникают колебания полей, т. е. излучается электромагнитная волна.*

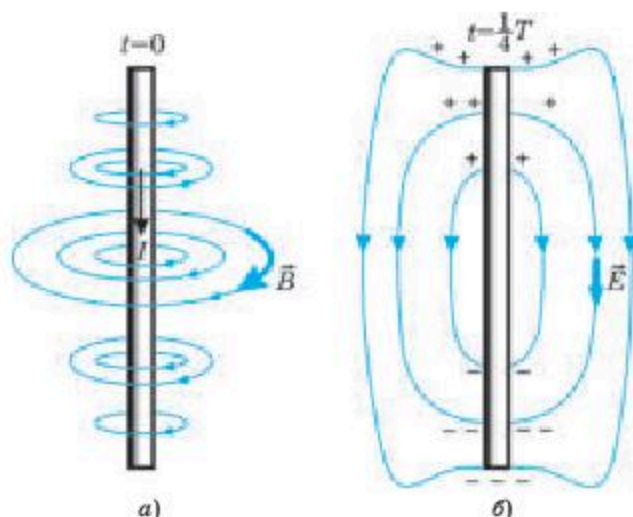


Рис. 12.2

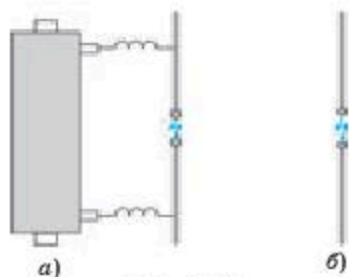


Рис. 12.3

Опыты Герца. Для получения электромагнитной волны Герц использовал вибратор, состоящий из двух одинаковых отрезков проводника, разделенных воздушной прослойкой (рис. 12.3, а). Благодаря разделению двум ветвям вибратора с помощью источника напряжения можно подать значительное количество заряда. Когда разность потенциалов достигает определенного значения, проскакивает

электрическая искра. По ионизированному воздуху электрические заряды протекут от одной половины вибратора к другой половине, и возникнет импульс тока.

Таким образом, в открытом контуре возникнут электромагнитные колебания. Быстро изменяющийся ток, не замыкаясь на источнике тока, должен вырабатываться лишь в контуре. Его регулируют включением дросселя между вибратором и источником тока. Быстрое убывание электромагнитных колебаний в открытом контуре связано, главным образом, с переносом энергии излучения волны и выделением тепловой энергии в контуре.

Для приема и регистрации электромагнитной волны Герц использовал второй вибратор — приемник (рис. 12.3, б). Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны, излучаемой открытым вибратором, в приемнике возбуждаются колебания тока. Если размеры вибраторов одинаковы, то собственные частоты их электромагнитных волн также одинаковы, но из-за резонанса амплитуда вынужденных колебаний в приемнике намного больше. Эти вынужденные колебания Герц наблюдал по искрам в очень маленьком воздушном промежутке приемной антенны. Ученый в своих опытах не ограничивался только получением и изучением электромагнитной волны. Он изучал свойства электромагнитных волн, присущие другим волнам. Герц на опыте определил скорость распространения электромагнитной волны — она оказалась равной скорости света. Таким образом, в своих экспериментальных исследованиях Герц доказал теоретические выводы Максвелла и сделал первый шаг к созданию электромагнитной теории света.



1. Объясните, почему закрытый колебательный контур не может излучать электромагнитные волны?
2. По какой причине в открытом вибраторе при электромагнитных колебаниях излучается волна?
3. Объясните опыты Герца по возбуждению и регистрации электромагнитных волн. Опишите их.
4. Какую роль играет искровой промежуток в излучающем и принимающем вибраторах?
5. Чем вызван расход энергии во время электромагнитных колебаний в контуре?
6. Закрытый колебательный контур заменен открытым колебательным контуром. Почему при этом электрические колебания быстро гаснут?
7. Какие физические процессы могут служить источником электромагнитных волн?



Упражнение 6

1. Сила тока в открытом колебательном контуре изменяется по закону $i = 0,2 \cos 5 \cdot 10^5 \pi t$. Найдите длину излучаемой электромагнитной волны λ в воздухе. Все величины измерены в единицах СИ.

Ответ: $\lambda = 1256$ м.

2. Найдите число колебаний, происходящих в электромагнитной волне с длиной волны 400 м за время, равное периоду звуковых колебаний с частотой 1 кГц.

Ответ: 750.

3. Сила тока в открытом колебательном контуре в виде стержня изменяется по закону $I = 400 \cos 2 \cdot 10^5 \pi t$ (мА). Найдите длину этого стержня.

Ответ: $l = 1,5$ м.

4. Как обеспечить настройку в резонанс индуктивностью 25 мкГн на длину волны 100 м?

Ответ: Необходим конденсатор на 113 пФ.

5. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 1 мГн и двух последовательно соединенных конденсаторов емкостями 500 и 200 пФ. На какую длину волны настроен этот колебательный контур?

Ответ: 711 м.

6. При изменении силы тока в катушке индуктивности на 1 А за 0,6 с в ней индуцируется ЭДС 0,2 мВ. Какую длину волны излучает генератор, колебательный контур которого состоит из этой катушки и конденсатора емкостью 14,1 нФ?

Ответ: 7,2 м.

§ 13. Энергия электромагнитных волн



Ключевые понятия:

- ✓ **плотность потока излучения электромагнитных волн**

На этом уроке вы:

- объясните условия возникновения электромагнитных волн и опишите их свойства.



Главная особенность всех видов волн в том, что они переносят не вещество, а энергию. Это свойственно и электромагнитным волнам.

Плотность потока электромагнитных волн. Ускоренно движущаяся заряженная частица излучает вокруг себя электромагнитные волны. Одной из главных энергетических характеристик электромагнитной волны является *плотность потока излучения электромагнитных волн*.

Плотностью потока электромагнитного излучения называют физическую величину, определяемую энергией электромагнитного поля, прошедшей за единицу времени через единичную поверхность, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t} \text{ или } I = \frac{P_{\text{ср}}}{S}. \quad (13.1)$$

Видно, что плотность потока излучения представляет собой мощность излучения, проходящую через единичную площадь поверхности за один период колебаний. Эту величину также называют *интенсивностью волны*.

Единица измерения плотности потока волны в СИ: $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Выделим в пространстве, где распространяется плоская электромагнитная волна, область с площадью поверхности S . Она расположена, как показано на рисунке 13.1, перпендикулярно скорости распространения волны.

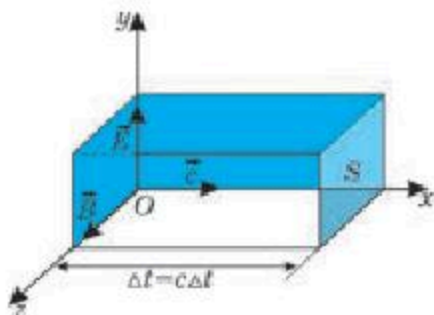


Рис. 13.1

Вся энергия, находящаяся в малом объеме $\Delta V = S \cdot c \cdot \Delta t$, за время Δt пройдет через эту поверхность. Энергия электромагнитного поля в этом объеме:

$$W = w \cdot \Delta V = w \cdot S \cdot c \Delta t, \quad (13.2)$$

где w — плотность энергии электромагнитной волны.

Подставив эту формулу в выражение (13.1), находим:

$$I = w c. \quad (13.3)$$

Плотность потока излучения электромагнитных волн равна произведению плотности энергии электромагнитной волны на скорость ее распространения.

Энергия электромагнитной волны, излучаемой вибратором Герца, точечными или другими источниками волн, изменяется с расстоянием. Если интенсивность волны для точечного источника волны одинакова по всем направлениям, то в вибраторе Герца максимальна в направлении, перпендикулярном оси. От гармонически колеблющегося заряда распространяется сферическая электромагнитная волна. Напряженность электрического поля и индукция магнитного поля этой сферической волны убывают обратно пропорционально первой степени расстояния: $\frac{1}{r}$. Это очень медленное убывание. Вспомним, что напряженность электростатического поля убывает как $E \sim \frac{1}{r^2}$. Поэтому электромагнитная волна может распространяться на большие расстояния от источника. А плотность потока излучения быстро убывает с расстоянием:

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t} = \frac{W}{4\pi \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}, \quad (13.4)$$

где $S = 4\pi R^2$ — площадь поверхности сферы.

Следовательно, интенсивность волны, образованной точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Теперь рассмотрим зависимость энергии электромагнитного поля от частоты колебания. Если заряд колеблется по гармоническому закону $x = x_m \cos \omega t$, то его ускорение изменяется по времени по гармоническому закону $a = x'' = |\omega^2 x_m \cos \omega t|$. *Электромагнитную волну испускают ускоренно движущиеся заряженные частицы. Значит, напряженность электрического поля и индукция магнитного поля волны прямо пропорциональны ускорению излучающих частиц. Плотность энергии электрического поля*

$$w_{\text{э}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} \quad (13.5)$$

и плотность энергии магнитного поля

$$w_{\text{м}} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} \quad (13.6)$$

равны. Но так как энергия электрического поля в электромагнитной волне превращается в энергию магнитного поля и наоборот, то плотность энергии электромагнитного поля равна:

$$w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = 2w_{\text{э}}; \quad w_{\text{э}} = w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}.$$

Если учесть, что напряженность электрического поля и индукция магнитного поля пропорциональны амплитуде колебаний и квадра-

ту частоты ($E \sim a \sim \omega^2$ и $B \sim a \sim \omega^2$), то плотности энергии полей $w_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \sim \omega^4$ и $w_x = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} \sim \omega^4$ будут пропорциональны четвертой степени частоты. Плотность потока излучения, или интенсивность волны, пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I = w c \sim \omega^4.$$

Чем выше частота колебаний электромагнитного поля, тем выше и интенсивность волны.

Примеры решения задач

1. Максимальное значение напряженности электрического поля радиоволны не должно превышать $E_m = 0,5$ В/м. Какова интенсивность I электромагнитной волны при этих условиях?

Дано:

$$E_m = 0,5 \text{ В/м}$$

$$\epsilon = 1$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$I = ?$$

Решение. Интенсивность электромагнитной волны определяем через объемную плотность энергии волны:

$$I = w_{\text{эм}} \cdot c.$$

Плотность энергии электромагнитной волны:

$$w_{\text{эм}} = 2w_{\text{эл}},$$

здесь $w_{\text{эл}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$, поэтому $w_{\text{эм}} = \epsilon_0 \epsilon E_m^2$. Тогда $I = \epsilon_0 \epsilon E_m^2 \cdot c$. Проверим единицу измерения: $[I] = \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}^2}{\text{В} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

$$I = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 25 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 664 \cdot 10^{-6} = 664 \frac{\text{мкВт}}{\text{м}^2}.$$

$$664 \frac{\text{мкВт}}{\text{м}^2}.$$

2. Максимальная плотность потока электромагнитной волны, испускаемой с телебашни с расстояния 300 м, $I_1 = 40$ мВт/м². Найдите плотность испускания волны I_2 с расстояния $r_2 = 120$ км, при котором хорошо улавливается радиоволна.

Дано:

$$r_1 = 300 \text{ м}$$

$$I_1 = 40 \text{ мВт/м}^2$$

$$r_2 = 120 \text{ км}$$

$$I_2 = ?$$

Решение. Интенсивность электромагнитной волны, находящейся от распространяющей антенны на расстоянии r_1 :

$$I_1 = w_1 \cdot c,$$

где w_1 — объемная плотность энергии электромагнитной волны, которая определяется напряженностью электрического поля:

$$w_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon E_{m1}^2}{2}.$$

E_{m_1} обратно пропорционально расстоянию до антенны напряженности:

$$E_{\max_1} \sim \frac{1}{r},$$

поэтому плотность энергии волны w_1 обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$w_1 \sim \frac{1}{r_1^2}.$$

Тогда плотность потока энергии I_1 будет обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$I_1 \sim \frac{1}{r_1^2}.$$

Соответственно для расстояния r_2 :

$$I_2 \sim \frac{1}{r_2^2}.$$

Значит, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$, отсюда $I_2 = I_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$.

$$I_2 = 0,4 \left(\frac{300}{1,2 \cdot 10^5}\right)^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 2,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$2,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3. В катушке индуктивности при изменении в ней силы тока на 2 А за время 1,2 с возникает ЭДС индукции 0,4 мВ. На какую длину волны будет настроен колебательный контур с этой катушкой, если плоский воздушный конденсатор контура имеет следующие параметры: площадь пластины 50 см², расстояние между его пластинами 3 мм?

Дано:	СИ	Решение. Скорость волны, ее длина и период колебаний связаны соотношением:
$\Delta I = 2 \text{ А}$		$v = \frac{\lambda}{T}$. Период колебаний в колебательном контуре находят по формуле Томсона:
$\Delta t = 1,2 \text{ с}$		$T = 2\pi\sqrt{LC}$. Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС самоиндукции, возникающая в замкнутом контуре, по модулю равна:
$\mathcal{E} = 0,4 \text{ мВ}$	$0,4 \cdot 10^{-3} \text{ В}$	
$S = 50 \text{ см}^2$	$50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$d = 3 \text{ мм}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
$\varepsilon = 1$		
$\lambda = ?$		

$$\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Отсюда получим, что индуктивность катушки в контуре равна $L = \frac{\xi \Delta t}{\Delta t}$. Емкость плоского конденсатора вычисляют по формуле: $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$. Тогда $\lambda = vT = 2\pi v \sqrt{\frac{\xi \Delta t}{\Delta t} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}}$. Подставив численные значения, получим, что $\lambda = 112$ м.

$$(\lambda = 112 \text{ м})$$



1. Какой характеристикой волны является плотность потока электромагнитной волны?
2. Как меняется энергия волны с расстоянием? Какое значение это имеет в радиотехнике?
3. Как зависит энергия волны от частоты электромагнитных колебаний?
4. Почему в мобильных телефонах используют частоты 900, 1800 МГц?



Упражнение 7

1. Объемная плотность энергии электромагнитной волны $2 \cdot 10^{-16}$ Дж/см³. Найдите плотность потока излучения.

$$\text{Ответ: } 0,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2. Допустимая объемная плотность энергии электромагнитной волны $2,2 \cdot 10^{-10}$ Дж/м³. Найдите максимальную напряженность электрического поля волны в воздухе и ее интенсивность.

$$\text{Ответ: } 5 \text{ В/м; } 6,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3. Мощность импульса радара 100 кВт. Найдите максимальную напряженность электрического поля волны в точке, где площадь поперечного сечения конуса излучения 2,3 км².

$$\text{Ответ: } 4 \text{ В/м.}$$

4. Плотность энергии электромагнитной волны в определенной пространственной точке в заданный момент времени $w = 5,2$ мкДж/м³. Оцените значения модулей в тот же момент времени и в той же точке, полагая, что $\epsilon_0 \approx 8,9 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

$$\text{Ответ: } 2,6 \text{ мкТл; } 0,76 \frac{\text{кВ}}{\text{м}})$$

5. Какова плотность энергии электромагнитной волны в фиксированной точке пространства в тот момент времени, когда модуль ее электрического вектора $E_m = 0,3$ кВ/м? Принять $\epsilon_0 \approx 8,9 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

$$\text{Ответ: } w = \epsilon_0 E^2 = 0,8 \text{ мкДж/м}^3.$$

6. На какое расстояние распространится электромагнитная волна за время, равное 30 периодам колебаний ее электрического и магнитного векторов, если частота их колебаний составляет 15 МГц?

$$(600 \text{ м})$$

§ 14. Свойства электромагнитных волн



Ключевые понятия:

- ✓ отражение и преломление электромагнитных волн
- ✓ поляризованная волна
- ✓ интерференция волн
- ✓ дифракция волн

На этом уроке вы:

- научитесь описывать свойства электромагнитных волн.



Свойства электромагнитных волн исследуют, используя специальный генератор, излучающий электромагнитную волну длиной 3 см. Возбуждаемая высокочастотным генератором электромагнитная волна с помощью антенны в виде рупора распространяется в направлении его оси. Приемная антенна имеет такой же вид, что и передающая. Кристаллический диод преобразовывает высокочастотный переменный ток, возбуждаемый в приемной антенне, в однополярный *пульсирующий ток*. После усиления ток передается в громкоговоритель или регистрируется в гальванометре. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 14.1.



Рис. 14.1

Отражение электромагнитных волн. Если поставить между передающим и приемным рупорами металлический лист, то звук не слышен. Электромагнитная волна не проходит через металлический лист — отражается. Если рупор генератора направить, как показано на рисунке 14.2, то приемная антенна принимает электромагнитную

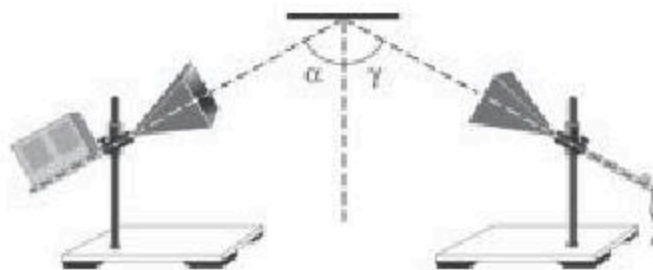


Рис. 14.2

волну, отраженную под углом, равным углу падения волны. Это заметно по слышимости звука. Легко понять отражение электромагнитной волны от поверхности металла. При падении электромагнитных волн на поверхности металла возбуждаются вынужденные колебания свободных электронов. Частота вынужденных колебаний равна частоте электромагнитной волны. Энергия падающей на поверхность металла электромагнитной волны расходуется на возбуждение вынужденных колебаний свободных электронов в металле. Волна не может пройти через металл, поверхность металла становится вторичным источником волн, т. е. волна отражается от нее. Отражение от диэлектриков слабое, так как в диэлектрике возбуждаются вынужденные колебания связанных электронов. Но амплитуда их вынужденных колебаний намного меньше амплитуды вынужденных колебаний свободных электронов в металле, поэтому отражение волн от диэлектрика слабее.

Отражательная способность электромагнитных волн используется в системе радиосвязи, в радиолокации.

Преломление электромагнитных волн. Преломление электромагнитных волн можно наблюдать с помощью треугольной призмы, наполненной парафином. Направим рупор передающей антенны, как показано на рисунке 14.3. Приемная антенна не регистрирует волну. Теперь сделанную из диэлектрика-парафина призму расположим так, как показано на рисунке, и антенна регистрирует волну. Значит, электромагнитная волна при переходе через границу двух сред воздух — парафин и парафин — воздух преломилась. Выполнение закона преломления при переходе из одной среды в другую подтвердили и экспериментальные исследования.

Поглощение электромагнитной волны. Поместив между рупорами различные диэлектрики, например, фанеру, плексиглас и т. п., можно обнаружить поглощение волн. Степень поглощения неодинаковая у различных диэлектриков.

Поляризация электромагнитных волн. Взаимная перпендикулярность векторов \vec{E} и \vec{B} электромагнитной волны и перпендику-

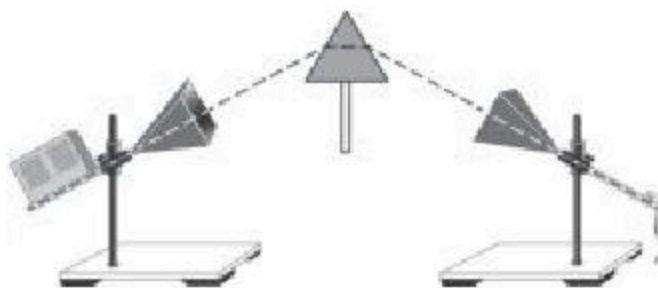


Рис. 14.3



Рис. 14.4

лярность их направлению распространения волны показывают, что электромагнитные волны являются поперечными. Колебания вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны, излучаемой передающей антенной, происходят в определенной плоскости. А колебания вектора индукции магнитного поля \vec{B} происходят в перпендикулярной ей плоскости. *Волна, колебания поля которой происходят в одной плоскости, называется поляризованной волной* (поляризация от лат. *polus*, греч. *polos* — “полюс”, “конец оси”).

Между рупором передающей и рупором приемной антенны установим сетки из металлических стержней (рис. 14.4). Располагая обе сетки вертикально или горизонтально, регистрируем прохождение волны через гальванометр. Это соответствует перпендикулярности вектора напряженности электрического поля к прутьям сетки. Если вторую сетку повернуть на 90° , то волна не проходит через сетку. Это значит, что электромагнитная волна — это поперечная волна.

Когда вектор напряженности электрического поля направлен параллельно металлическим прутьям, в них возбуждаются вынужденные колебания свободных электронов и волна отражается. Когда вектор напряженности направлен перпендикулярно прутьям, вынужденные колебания свободных электронов поперечны, их амплитуды незначительны и электромагнитная волна проходит без отражения. Надо отметить, что если электромагнитные волны продольны, они проходят через прутья без потерь при любом положении сеток. При установке комнатной телевизионной антенны надо учесть поляризованность электромагнитной волны. Амплитуда возбуждаемого индукционного тока в антенне максимальна, когда вектор напряженности параллелен антенне.

Интерференция электромагнитных волн. Излученные из двух или более антенн электромагнитные волны в пространстве накладываются друг на друга. *Явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух волн с одинаковыми частотами называется интерференцией волн.*

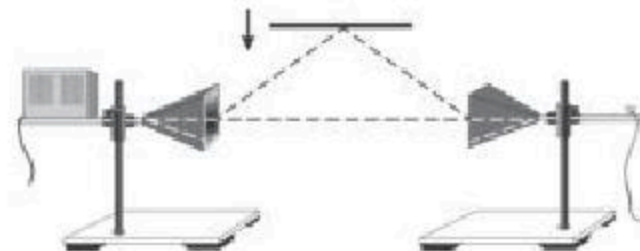


Рис. 14.5

При достижении одной и той же точки пространства двух электромагнитных волн, колеблющихся в одинаковой фазе, в результате интерференции амплитуда результирующего колебания будет максимальной при выполнении условия:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

где $\Delta l = l_2 - l_1$ — разность хода волн; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Если разность хода волн

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

то наблюдается минимум интерференции. Амплитуда результирующего колебания в этой точке будет минимальной. Для наблюдения интерференции электромагнитных волн рупоры передающей и принимающей антенн направим противоположно друг другу, как показано на рисунке 14.5, и начнем двигать горизонтально расположенный металлический лист сверху вниз. Мы услышим то усиливающийся, то ослабляющийся звук. Часть волны, исходящая из рупора, попадает в принимающую антенну. Остальная часть попадает туда, отразившись от металлического листа. Передвигая металлический лист вверх или вниз, изменяем разность хода прямой и отраженной волн. В зависимости от того, какое из условий интерференции максимума или минимума выполняется, звук усиливается или ослабляется.

Дифракция электромагнитных волн. Отклонение волн от прямолинейного распространения, или огибание волнами препятствий, называется *дифракцией*. Дифракция волн проявляется особенно



Рис. 14.6

отчетливо в случаях, когда размеры препятствий соизмеримы с длиной волны. Дифракцию электромагнитных волн наблюдают на установке, показанной на рисунке 14.6. Между генератором сверхвысоких частот и приемником находится металлический экран с узкой щелью. Изменяя местоположение приемника, можно заметить чередования максимумов и минимумов амплитуды колебания. Это возможно лишь в результате дифракции волн, огибающих края щели. Это означает, что электромагнитные волны огибают препятствие. (Явление дифракции будет рассмотрено в разделе “Оптика” более подробно.)



1. Объясните, почему электромагнитные волны хорошо отражаются от поверхности металлов, а от поверхности диэлектриков отражаются слабо?
2. Как можно объяснить изменение направления электромагнитной волны при переходе из одной среды в другую?
3. Какая волна называется поляризованной?
4. Как можно установить поперечность электромагнитной волны экспериментально (на практике)?
5. Что называется интерференцией волн? Когда выполняются условия ее максимума и минимума?
6. При выполнении какого условия хорошо наблюдается явление дифракции в электромагнитной волне?
7. Какое явление наблюдается, если на электромагнитной волне поместить алюминиевый диск?
8. Наблюдается ли явление дифракции, когда выполняется условие $d > \lambda$, где d — размеры препятствия, λ — длина волны?

§ 15. Принцип радиосвязи



Ключевые понятия:

- ✓ когерер
- ✓ радиотелеграф
- ✓ радио

На этом уроке вы:

- изучите модуляцию и детектирование высокочастотных электромагнитных колебаний.



Простейшая схема радиосвязи показана на рисунке 15.1. По этой схеме осуществляют основной физический принцип радиосвязи. В передающей радиостанции возбуждаемый в антенне генератором высоких частот высокочастотный переменный ток создает в окружающем пространстве быстро изменяющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитных волн (рис. 15.1, а). Дошедшие до приемной антенны электромагнитные волны возбуждают переменный ток такой же частоты, на которой работает передающая

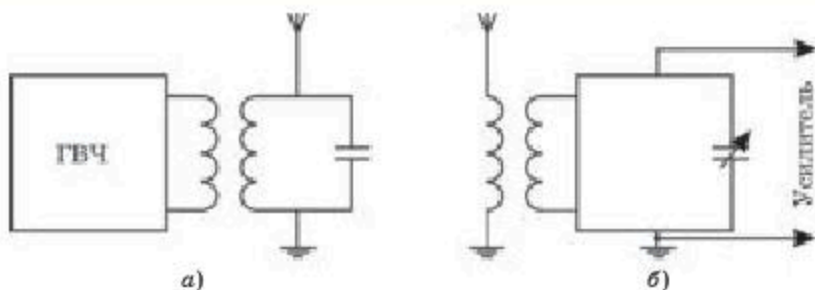


Рис. 15.1

А.С. Попов
(1859—1906)

станция. Подключенный к приемной антенне колебательный контур в результате резонанса выделяет вынужденные колебания необходимой нам частоты и усиливает их (рис. 15.1, б).

Изобретение радио. Радиотелеграфная связь. Опыты Герца впервые доказали возможность распространения электромагнитных волн. В его опытах распространение электромагнитных волн осуществлялось на короткие расстояния в пределах лабораторного стола. На возможность распространения волн на дальние расстояния сам Герц смотрел с некоторым недоверием. Впервые возможность беспроводной связи с помощью электро-

магнитных волн продемонстрировал русский ученый А.С.Попов на заседании Русского физико-химического общества 7 мая 1895 г. Попов использовал для регистрации электромагнитных волн надежный и чувствительный прибор — *когерер* — вместо малочувствительного искрового приемного вибратора Герца. Он был изобретен французским физиком Э. Бранли.

Когерер представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. Он заполнен металлическими опилками. В обычных условиях сопротивление прибора очень высокое, так как опилки плохо контактируют между собой. Приемник Попова состоит из когерера *К*, электромагнитного реле *ЭМ*, электрического звонка *З* и источника тока (рис. 15.2). Вначале Попов использовал свой приемник для регистрации электромагнитных волн, возникающих во время электрических разрядов в молниях. Он назвал его *регистратор молнии*. Дошедшие до антенны высокочастотные электромагнитные волны вызывают вынужденные колебания свободных электронов, переменный ток. Между опилками проскакивают искорки, которые спекают опилки. Сопротивление когерера падает резко в 100—200 раз. В обычном состоянии сопротивление его очень большое, поэтому реле не может подключить цепь звонка к источнику тока. Теперь, когда

электромагнитные волны дойдут до антенны, цепь звонка замыкается через прибор. Молоточек ударяет когерер и сообщает о приеме электромагнитной волны. После приема электромагнитной волны цепь звонка выключается, так как молоточек ударяет одновременно со звонком и когерер. При встряхивании когерера его первоначальное состояние восстанавливается, сопротивление вновь увеличивается, и прибор снова готов к приему очередной волны.

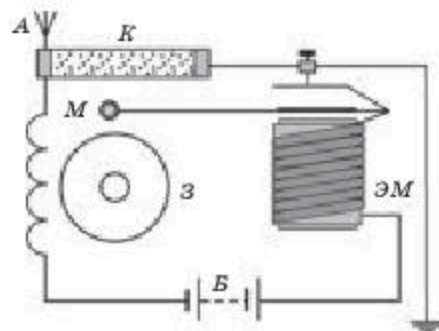


Рис. 15.2

Чтобы увеличить чувствительность приемника, Попов один конец когерера заземлил, а второй соединил с проводником, поднятым высоко вверх. Тем самым он создал первую приемную антенну.

В 1896 г. Попов создал передатчик электромагнитных волн. Совершенство передатчик и приемник электромагнитных волн, он начал передавать и принимать радиogramмы, используя азбуку Морзе. 24 марта этого же года он впервые в мире передал радиogramму из двух слов: “Генрих Герц” — на расстояние 250 м, принял их, тем самым показав на практике, что слова можно принимать и по телеграфу. Этот вид связи назвали *радиотелеграфной связью*. Телеграфные сообщения передаются короткими и длинными импульсами электромагнитных волн, т. е. передаются с помощью точки и тире азбуки Морзе.

В развитие и практическое применение радиотехники огромный вклад внес итальянский изобретатель Г.Маркони. В 1897 г. он получил патент на использование электромагнитных волн для беспроволочной связи. В 1901 г. Г.Маркони впервые осуществил радиосвязь между Европой и Америкой через Атлантический океан. В развитии радио как средства связи он сыграл исключительную роль. А.С.Попов, к сожалению, не запатентовал свое открытие, поэтому мировое сообщество, по сути, не признало как его открытие.

Радиотелефонная связь. Важнейшим событием в развитии радиосвязи является изобретение в 1906 г. американским инженером Д. Форесом *триода* — трехэлектродной электронной лампы. На основе триода в 1913 г. им был создан ламповый генератор незатухающих электрических колебаний. Теперь стало возможным с помощью электромагнитных волн передавать и музыку, и речь на дальние расстояния. Этот вид связи назвали *радиотелефонной связью*. Осуществить радиотелефонную связь кажется совершенно легко. Создаваемые звуковыми волнами колебания давления воздуха в микрофоне преобразуются в

точно такие же электрические колебания. Усилив их, можно вызвать в антенне вынужденные колебания звуковой частоты переменного тока. Таким путем радиотелефонную связь осуществить невозможно. Вспомним, что интенсивность излучаемых антенной электромагнитных волн пропорциональна четвертой степени частоты $I \sim \omega^4$.

Трудность в передаче звука такова: для радиосвязи необходимы высокочастотные электрические колебания, а звуковые колебания являются низкочастотными. Электромагнитные волны такой низкой частоты не излучаются, значит, не могут распространяться в пространстве. Поэтому надо искать способ передачи низкочастотных электромагнитных колебаний с помощью высокочастотных электромагнитных колебаний.

Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют или, как говорят, модулируют с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Под *модуляцией* подразумевается процесс медленного изменения одного из параметров высокочастотных электромагнитных колебаний — амплитуды, частоты или фазы — в соответствующий параметр электромагнитных колебаний низкой (звуковой) частоты. В радиотехнике используются амплитудная, частотная и фазовая модуляция. Колебания высокой частоты называют *несущими частотами*, так как они играют роль носителей колебаний звуковой частоты.

В современной радиотехнике, системах космической связи и на телевидении всегда используют частотную модуляцию. В радиоприемнике из сложных высокочастотных колебаний заново выделяют, отделяют низкочастотные колебания. Восстановление низкочастотных сигналов называется *демодуляцией*, или *детектированием*. Детектированные сигналы после усиления преобразуются в акустические колебания. На рисунке 15.3 показана принципиальная схема радиосвязи, содержащая основные модули.

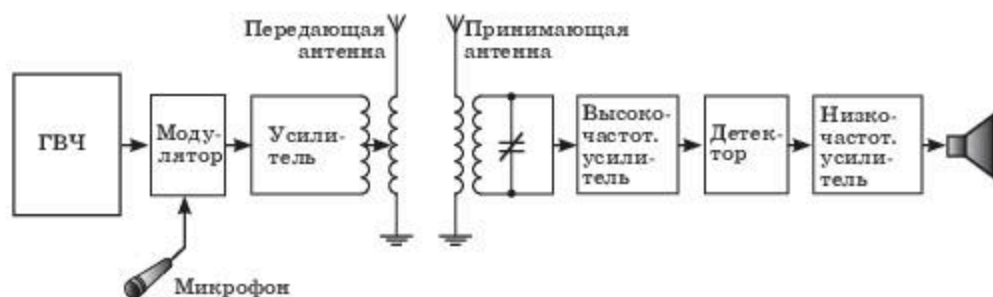


Рис. 15.3



1. Какие принципы радиосвязи называются основными?
2. Из каких частей состоит первый приемник — регистратор молний А. С. Попова?
3. На каком физическом принципе основана работа когерера?
4. Какую роль играет электрический звонок в приемнике Попова?
5. Почему один конец когерера Попов заземлил, а другой присоединил к антенне?
6. Как осуществляется радиотелеграфная связь?
7. Почему невозможно осуществлять радиосвязь на низкочастотных радиоволнах?
8. Какой вид связи называют радиотелефонным?
9. В чем значимость открытия Г. Маркони?
10. Что называется модуляцией?

§ 16. Модуляция и детектирование



Ключевые понятия:

- ✓ амплитудная модуляция
- ✓ частотная модуляция
- ✓ детектирование

На этом уроке вы:

- научитесь различать амплитудную (АМ) и частотную модуляции (FM);
- объясните принцип работы детекторного приемника.

Высокочастотные колебания можно модулировать, изменяя амплитуду, частоту или фазу. На практике применяются все три способа модуляции. Мы остановимся на более распространенных способах — амплитудной и частотной модуляциях.

Амплитудная модуляция. При амплитудной модуляции амплитуду высокочастотных колебаний изменяют в соответствии со звуковой частотой. Модуляцию амплитуды высокочастотных колебаний, получаемых транзисторным генератором, можно осуществить, используя схему, показанную на рисунке 16.1.

Модулятор состоит из микрофона M , источника тока B_1 и последовательно соединенной первой обмотки L_1 трансформатора T_p . Вторая обмотка трансформатора L_2 соединена параллельно с конденсатором C в цепи базы транзистора в контуре. Конденсатор C оказывает малое сопротивление высокочастотному переменному току, протекающему через обмотку (виток) обратной связи катушки. Индуктивное

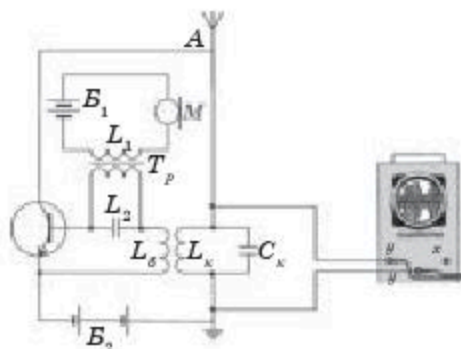


Рис. 16.1

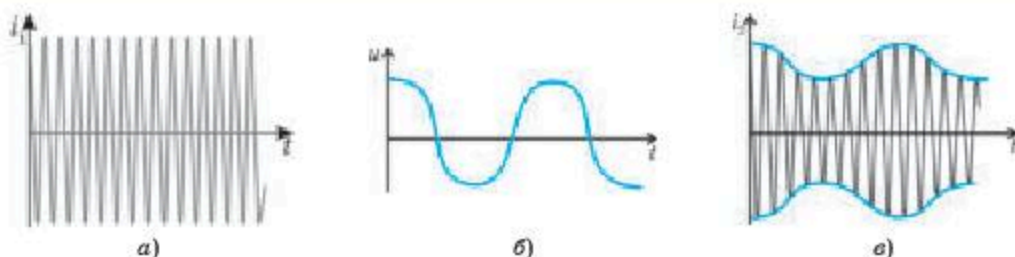


Рис. 16.2

сопротивление второй обмотки трансформатора L_2 высокое. Поэтому производимый генератором высокочастотный ток легко проходит через конденсатор C , но не может пройти через микрофонную цепь модулятора.

При отсутствии звуковых колебаний генератор производит высокочастотные, гармонические колебания постоянной амплитуды:

$$i_1 = i_0 \sin \omega t,$$

где ω — несущая частота; i_0 — постоянная амплитуда колебаний. (Смотрите график этих колебаний, показанный на рис. 16.2, а.)

При включении микрофона звуковые волны вызовут в его цепи электрический ток низкой частоты (рис. 16.2, б). Конденсатор C для этих токов оказывает большое сопротивление. По этой причине напряжение на концах обмотки трансформатора L_2 полностью приложится на участок цепи база — эмиттер. Благодаря этому амплитуда переменного тока высокой частоты в цепи контура генератора непрерывно меняется в такт звуковым частотам, т. е. осуществляется модуляция колебаний высокой частоты. Это можно наблюдать на экране осциллографа, включенного в контур (рис. 16.2, в).

Частотная модуляция (FM-frequency modulation). Вышеуказанная амплитудная модуляция имеет существенный недостаток. Если расстояние между передатчиком и приемником большое, то высокочастотная модулированная электромагнитная волна ослабнет, и ослабленная волна начнет изменяться по времени. Когда радиоволна проходит через атмосферу, выделение изменений амплитуды от необходимой модуляции станет невозможным из-за воздействия чрезмерных сопротивлений (шум, звуки). Для устранения этих сопротивлений используется частотная модуляция (рис. 16.3).

При частотной модуляции изменяется частота, а не амплитуда высокочастотных колебаний. Частота передатчика радиоволны, передаваемой для усиления защиты от помех, пропорциональна амплитуде звукового колебания. Чем сильнее звуковая волна, тем выше несущая частота и наоборот. Частотная модуляция используется для передачи звуковых волн на радиостанциях и телевидение.

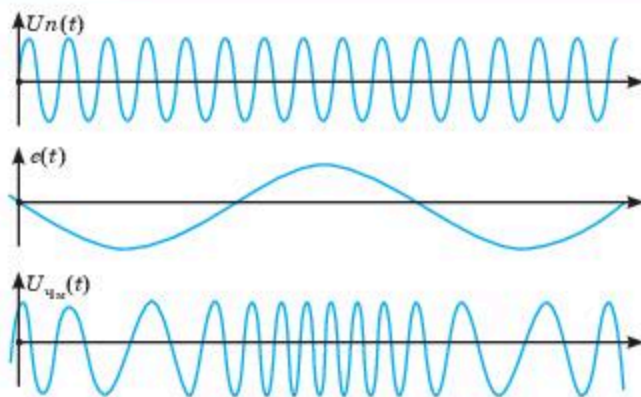


Рис. 16.3

Детектирование. В антенне радиоприемника электромагнитные волны от всех передатчиков — разрядов молний, искровых разрядов при работе с приборами и электрическими двигателями и т. д. — возбуждают слабые индукционные токи высокой частоты. Поэтому, чтобы слушать выбранное радиосообщение, выделяют волну необходимой частоты, включив в цепь колебательный контур. Это осуществляется изменением емкости конденсатора в колебательном контуре: изменяя емкость конденсатора, добьемся равенства собственной частоты колебательного контура частоте вынужденных колебаний, возбужденных в антенне, другими словами, добьемся резонанса. Из поступившей в антенну модулированной электромагнитной волны необходимо выделить из сложного сигнала колебания звуковой частоты. Демодуляция, или детектирование, осуществляется прибором односторонней проводимости — *детектором*. В качестве детектора можно использовать полупроводниковый диод или транзистор.

Рассмотрим принцип работы простейшего радиоприемника или детекторного радиоприемника. Модулированные высокой частоты колебания из антенны (1) через резонансный контур (2) поступают в детектор (3) (рис. 16.4). В цепи детектора возбуждается электрический ток в форме кратковременных импульсов различной амплитуды, графики которого показаны на рисунке 16.5(а, б). Чтобы преобразовывать подобный ряд импульсов в переменный ток звуковой частоты, используют конденсатор (4) и резистор (5). Через каждые полпериода импульс высокочастотного тока заряжает конденсатор, а между импульсами конденсатор разряжается через резистор. Если подобрать емкость конденсатора и сопротивление резистора, то через резистор проходит

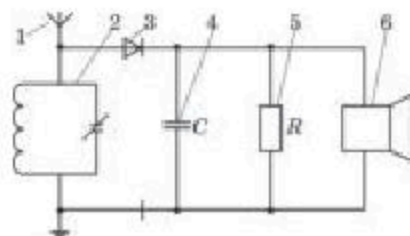


Рис. 16.4

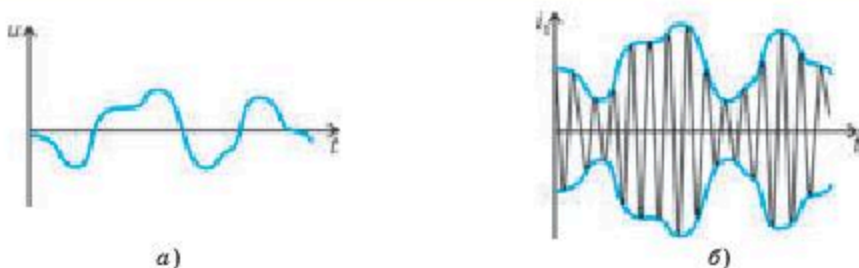


Рис. 16.5

переменный ток с частотой, равной звуковой частоте передающей станции. В громкоговорителе или на мембране телефона эти звуки воспроизводятся.



1. Что такое амплитудная модуляция?
2. Объясните принцип работы установки, возбуждающей модулированные колебания высокой частоты.
3. Как работает модулятор?
4. Для чего нужна антенна в радиоприемнике?
5. Как можно принять волну нужной радиостанции?
6. С какой целью применяют детектор?
7. Нарисуйте схему простейшего детекторного радиоприемника.
8. Объясните назначения конденсатора C и резистора R на рисунке 16.4.

§ 17. Распространение радиоволн. Радиолокация



Ключевые понятия:

- ✓ радиоволны
- ✓ радиолокация

На этом уроке вы:

- объясните принцип радиосвязи;
- выясните в чем причина появления ионосферы.



Используемые в радиовещании, телевещании, радиосвязи, радиолокации и радионавигации электромагнитные волны называют *радиоволнами*. Радиоволны разделяются на несколько диапазонов, как показано в таблице 17.1.

Таблица 17.1

Диапазоны волн

Диапазон длины волн	Типы антенн	Влияние ионосферы и атмосферы	Физические явления, используемые для связи
Километровые волны (>1000 м)	Мачтовые	Поглощаются ионосферой	Дифракция волн, огибание выпуклой поверхности Земли

Гектометровые волны (100—1000 м)	Мачтовые	Отражаются ионосферой	Отражение от ионосферы
Декаметровые волны (10—100 м)	Мачтовые	Отражаются от ионосферы и поверхности Земли	Многочисленные отражения от атмосферы и земной поверхности
Метровые волны (1—10 м)	Возможно создание направленных антенн	Не отражаются от ионосферы	Передача на расстоянии прямой видимости
Дециметровые и сантиметровые волны (10 см — 1 мм)	Параболические зеркальные антенны	Не отражаются ионосферой, прохождение зависит от прозрачности атмосферы (туман)	Сверхдальний прием с помощью спутников и метеорных следов
Миллиметровые и субмиллиметровые волны (1 мм и ниже)	Параболические антенны с высоким качеством поверхности	Зависит от пропускания атмосферных газов	Применяются в радиоастрономии

Различные антенны, применяемые для различных диапазонов длин волн, имеют свои особенности. Длинные, средние и короткие волны, применяемые в радиовещании, излучают вертикально направленные проводники — *вибраторы*. Чтобы увеличить расстояния приема, антенны стараются располагать повыше. Для радиолокации, космической радиосвязи и телевидения используют ультракороткие волны.

Антенна, собранная из вибратора длиной, равной половине длины волн, или из нескольких таких вибраторов, излучает направленное метровое электромагнитное излучение. Для излучения радиоволн в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн применяют параболические отражатели.

На распространение радиоволн сильное влияние оказывает рельеф земной и водной поверхностей, особенно верхний слой атмосферы — ионосфера. Ионосфера образует на высоте 90—300 км от поверхности Земли газовый слой, состоящий из электронов и ионов. Ионизация верхних слоев атмосферы происходит в основном из-за действия солнечных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Днем концентрация ионов в 20 и более раз выше, чем ночью. Поэтому свойства ионосферы изменяются в течение суток и в зависимости от сезонов. Ионосфера может отражать и поглощать электромагнитные волны. Длинные радиоволны в результате дифракции распространяются далеко за горизонт. Они хорошо отражаются от ионосферы, поэтому длинные волны могут распространяться на большие расстояния, огибая всю поверхность Земли.

Распространение коротких волн на большие расстояния происходит благодаря отражению несколько раз от земной поверхности и ионос-

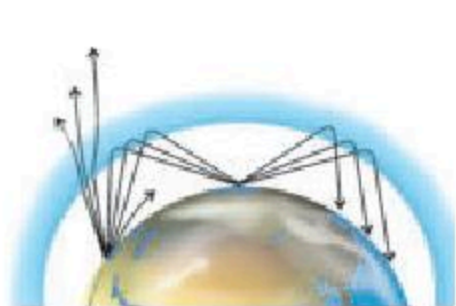


Рис. 17.1

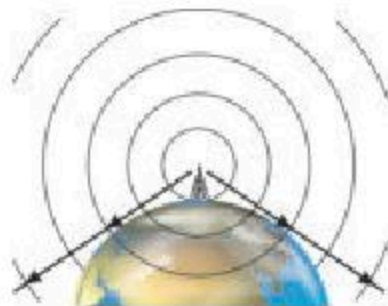


Рис. 17.2

феры. На коротких волнах можно установить радиосвязь с любыми радиостанциями, находящимися на Земле (рис. 17.1).

Ультракороткие радиоволны, не отражаясь от ионосферы, без сопротивления проходят через нее. Их дифракционные свойства слабые, поэтому ультракороткие волны почти не огибают поверхность Земли. В связи с этим на ультракоротких волнах связь осуществляется в районе прямой видимости передающей антенны (рис. 17.2).

Радиолокация. Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называется *радиолокацией*. В основе радиолокации лежит способность проводящих тел отражать радиоволны. Это более заметно, когда линейные размеры объектов, отражающих радиоволны, больше длины волн. Поэтому на радиолокационных станциях используют ультракороткие волны.

Для нахождения объекта в радиолокации используют сходящепараллельный пучок электромагнитных волн. В радиолокаторах, работающих на дециметровых и еще более коротких волнах, направленную волну излучают антенны, расположенные в фокусе параболических металлических зеркал. Чтобы направленно излучать метровые волны, используют систему антенн, расположенных в определенном порядке. Если на одном направлении из-за интерференции волны, усиливаясь, направляются сфокусирующе, то на других направлениях они гасят друг друга полностью или частично.



Рис. 17.3

Радиолокатор (или радар-излучатель и радар-приемник) состоит из сложных радиотехнических систем. Работает он в *импульсном режиме*. Для определения местонахождения самолета антенну радиолокатора направляют туда, а генератор излучает кратковременные периодические импульсы электромагнитных волн (рис. 17.3). Длительность каждого импульса порядка $t = 10^{-6}$ с, а промежутков между ними $t = 10^{-3}$ с, т. е. в 1000 раз больше.

Отраженную от объекта электромагнитную волну принимает антенна, переключенная от излучателя к приемнику в промежутках между ними. Измеряя время t , затраченное электромагнитной волной до объекта и обратно, определяют расстояние:

$$l = c \cdot \frac{t}{2},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость радиоволны в воздухе.

На экране радара наблюдают отклонения электромагнитного тока, соответствующие импульсам излученных и отраженных электромагнитных волн, и непосредственно измеряют расстояние. Промежутки на экране, соответствующие импульсам отклонений, прямо пропорциональны времени прохождения волны t и расстоянию l до объекта. Антенна радиолокатора может поворачиваться в любом направлении. По углу поворота антенны, например, определяют направление полета самолета, его координаты. По изменениям координаты по времени рассчитывают скорость цели и ее траекторию.

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. Радиолокаторы используют для обнаружения самолетов, кораблей, в метеорологии, для локации планет и др. Радары могут следить за целями в сотнях километров от себя. С помощью радиолокаторов следят за взлетами и посадками самолетов на аэродромах, движением на воздушных трассах, дают пилотам необходимые указания, обеспечивая безопасность полетов.

Поверхность Земли, городские здания, транспортные коммуникации, вода по-разному отражают радиоволны. Летчик в самолете с помощью радиолокационных приборов узнает не только расстояние до поверхности Земли, скорость движения, но еще и видит радиолокационную карту земной поверхности. Такие сведения он получает и в дневное время.

Радиолокация применяется в космических исследованиях и астрономии. Принимая с помощью радиотелескопов (рис. 17.4) электромагнитные волны невидимого диапазона от сверхдалеких космических тел, ученые стали изучать структуру Вселенной. На основе радиолокационных методов смогли точно определить расстояния от Земли до Луны, Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера.

Все космические корабли снабжены несколькими радиолокаторами. Они могут показать непосредственно видовую карту планет, а также дать информацию о небесных телах.



Рис. 17.4



1. Назовите границы всех диапазонов радиоволн.
2. Почему длинные радиоволны могут распространяться на большие расстояния?
3. Как осуществляется радиосвязь на сверхдалекие расстояния короткими волнами?
4. В чем причина появления ионосферы?
5. Почему качество радиосвязи коротких волн меняется в зависимости от времени года и суток?
6. Почему передающие антенны для телевидения должны располагаться высоко?
7. Что называется радиолокацией?
8. Объясните принцип работы радиолокатора.
9. Как определяют координаты тела в пространстве, расстояние до него, его скорость?



Подготовьте презентации на темы:

1. Развитие радиолокации.
2. Применение радиолокации.
3. Радиотелескопы.

Пример решения задачи

Радиолокатор работает на длине волны 15 см и испускает импульсы частотой 4 кГц. Длительность каждого импульса $t = 2$ мкс. Найдите самое большое расстояние для определения объекта. Сколько колебаний в одном импульсе? Какова частота электромагнитных колебаний радиоволны?

Дано:

$$\lambda = 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м}$$

$$\nu_{\text{имп.}} = 4 \text{ кГц} = 4 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

$$\tau = 2 \text{ мкс} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$l_m \text{ — ?}$$

$$N_{\text{колеб.}} \text{ — ?}$$

$$\nu_{\text{колеб.}} \text{ — ?}$$

Решение. Для определения расстояния до объекта используем формулу

$$l_m = ct,$$

где t — время распространения радиоволны. Далее, $t_{\text{об.}}$ — время, за которое радиоволна доходит от радара до объекта и, отразившись, возвращается обратно:

$$t_{\text{об.}} = 2t. \text{ Отсюда}$$

$$t = \frac{t_{\text{об.}}}{2} \text{ и } l_m = c \cdot \frac{t_{\text{об.}}}{2}.$$

Радиолокатор работает в импульсном режиме, т. е. за время τ испускает радиоволны и за время $t_{\text{об.}}$, распространяясь в пространстве, доходит до объекта, отражается, возвращается обратно и только после этого испускает следующий импульс.

$$\text{Поэтому } t_{\text{об.}} = \frac{t}{N_{\text{имп.}}} = \frac{t}{\frac{t}{T_{\text{имп.}}}} = \frac{t}{\nu_{\text{имп.}}}. \text{ Тогда } l_m = \frac{t}{2\nu_{\text{имп.}}}.$$

Мы определили одну из величин. Теперь находим число колебаний $N_{\text{колеб.}}$ в импульсе. Оно равно отношению длительности импульса τ к периоду электромагнитного колебания $T_{\text{колеб.}}$:

$$N_{\text{колеб.}} = \frac{\tau}{T_{\text{колеб.}}}$$

Определим период колебания:

$$T_{\text{колеб.}} = \frac{\lambda}{c}. \text{ Тогда } N_{\text{колеб.}} = \frac{\tau \cdot c}{\lambda}.$$

Теперь находим частоту электромагнитного колебания:

$$\nu_{\text{колеб.}} = \frac{1}{T_{\text{колеб.}}} = \frac{c}{\lambda}.$$

$$l_m = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 4 \cdot 10^3} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ м.}$$

$$N_{\text{колеб.}} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,15} = 4 \cdot 10^3, \quad \nu_{\text{колеб.}} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,15} = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц.}$$



Упражнение 8

1. Почему нельзя осуществить радиосвязь с помощью электромагнитных волн с подводной лодкой, когда она находится под водой?
2. Возможна ли радиосвязь между двумя подводными лодками, находящимися на глубине в океане?
3. Высота телебашни на горе Коктобе в Алматы — 372 м, высота самой горы — 250 м, приемной антенны — 10 м, радиус Земли — 6400 км. На каком расстоянии можно принимать изображение?

Ответ: 100,5 км.

4. Каково расстояние до объекта, если время прохождения импульса радиолокатора до него и обратно 0,0001 с?

Ответ: 15 км.

5. Рабочая длина волны радиолокатора 5 см, длительность излучаемого импульса 1,5 мкс. Сколько колебаний содержится в каждом импульсе? Какова наименьшая дальность обнаружения цели таким радиолокатором?

Ответ: 3000; 225 м.

6. Антенна радиолокатора корабля расположена на высоте 25 м над уровнем моря. На каком максимальном расстоянии радиолокатор может обнаружить спасательный плот? С какой частотой при этом излучаются импульсы?

Ответ: 18 км; $8,3 \cdot 10^3$ Гц.

§ 18. Цифровые технологии



Ключевые понятия:

- ✓ аналоговый сигнал
- ✓ цифровой сигнал
- ✓ информационный канал
- ✓ аналогово-цифровое преобразование
- ✓ бит, байт

На этом уроке вы:

- объясните преимущества передачи сигнала в цифровом формате в сравнении с аналоговым сигналом.



С каждым годом мы все больше внедряемся в мир цифровых технологий, и этот процесс со временем все больше ускоряется. Телеграфная и телефонная связи, созданные во второй половине XIX в., радио и телевидение, появившиеся в первой половине XX в. работают на основе аналоговых сигналов. В процессе работы телефона и телеграфа сигналы передаются от одного объекта к другому электрическим током в виде импульсов в проводящих сетях. В настоящее время каналы связи распространяют информацию различными типами сигналов, среди них основными являются цифровые и аналоговые сигналы.

Сигнал (по латыни *signum* — “знак”) — физический процесс, переносящий данную информацию. Электрический сигнал — электрический ток или напряжение, параметры которого изменяются по закономерности информации.

Аналоговый сигнал непрерывен и изменения его параметров со временем зависят от частоты, фазы и амплитуды информационного сигнала. Форма его является синусоидой.

Остановимся на некоторых особенностях распространения информации через аналоговый сигнал.

1. Форма аналогового сигнала сложная.
2. Трудно исправить искаженный аналоговый сигнал, в некоторых случаях это невозможно.
3. Восстановление аналоговых сигналов, которые чувствительны к внешним воздействиям, трудно, их можно только усилить.
4. Сжатие и группировка канала связи определяется частотой.
5. Обслуживание потребителей ограничено.
6. Элементные базы сложные и т. д.

Человек воспринимает информацию, поступающую из окружающей среды, через органы чувств. Свет, тепло и звук — это энергетические сигналы, а вкус и запах — это действие химических соединений, естественно, их природа тоже энергетическая. Мы непрерывно чувствуем энергетическое воздействие, и вся эта информация является аналоговой.

Человек разговаривает в интервале частот от 80 Гц до 12000 Гц, а слышит в интервале от 16 Гц до 20000 Гц. Звук — это непрерывный *аналоговый сигнал*. Если звук записать в виде ноты, он превращается в цифровой сигнал. Основное отличие цифрового сигнала от аналогового заключается в том, что аналоговая информация непрерывна, тогда как цифровая информация дискретна. Цифровой сигнал состоит только из двух значений “0” и “1”. Значение электрического напряжения в любой момент времени соответствует одному из двух уровней. Двухуровневый сигнал называют *двухцифровым сигналом*. В двоичной логической схеме один из уровней, а именно верхний, соответствует “1” единице (истина), а второй, нижний — логическому “0” — нолю (ложь). Для хранения большой информации используется также третий уровень NULL “нет итога”.

В цифровых технологиях измерение количества информации имеет свои особенности. Единица измерения информации называется бит (от англ. *binary digit* — “двоичная цифра”).

Бит — единица измерения количества информации в двоичном коде, он равен информации об одном из двух равновероятных положений.

Байт — единица измерения информации, равная 8 битам. 1 байт = 8 бит. В байтах кодируют символы, используемые в компьютерах. Приведем более крупные единицы:

- 1 Кбайт = 1024 байт;
- 1 Мбайт = 1024 Кбайт;
- 1 Гбайт = 1024 Мбайт.

Особенности цифрового сигнала (рис. 19.1):

1. Чаще 2—3 уровневый.
2. Можно найти ошибку и ее исправить.
3. Цифровые сигналы, ослабленные при передаче, возможно восстановить, затем усилить.
4. Уплотнение и группировка канала связи во времени.
5. Разнообразие видов услуг.
6. Расчет скорости.
7. Высокая возможность использования микросхем.

Аналоговый звуковой сигнал в микрофоне преобразуется в сигнал электрических колебаний. Преобразование этой информации в цифровой сигнал называют *аналогово-цифровым преобразованием* или *оцифровкой*. Такое преобразование осуществляется в АЦП — аналогово-цифровом преобразователе, т. е. сигнал дискредитируется, квантуется и кодируется. Оцифрованная информация поступает через канал связи в приемник и в цифровом аналоговом преобразователе (ЦАП) вновь превращается в аналоговый сигнал и передается потребителю. В цифровом радиовещании качество звука особенно четкое и чистое. Еще одно преимущество радиовещания цифровыми технологи-

ями — очень высокое качество сигнала, поступающего в движущиеся радиоприемники и возможность автоматического отбора наиболее сильных сигналов. Наряду с цифровым радиовещанием осуществляется вещание в виде “радиомультимедиа”. Здесь слушателям передается дополнительная информация в дисплей радиоприемника ЦРВ, тесно связанная с телефонами и компьютерами. Передача и прием мультимедийных файлов мобильному телефону осуществляется через ЦРВ. Цифровая технология решила проблему доставки информации в неискаженном чистом виде. В современных компьютерах больших мощностей адаптируемость, алгоритмы звукозаписи и методы архивации настолько совершенны, что звук и мелодии передаются и воспроизводятся практически без искажений и шумов в первоизданном виде. Неоспоримыми преимуществами цифровой технологии являются:

- как известно, аналоговый звук не может сколь угодно долго храниться в магнитной ленте и его качество ухудшается в случае перезаписи, тогда как цифровой сигнал никогда не теряет своего качества и самопроизвольно не изменяется;

- компьютерная обработка дает большие творческие возможности;

- легко достигается многоканальная обработка, добавление дополнительных звуков, изменение уровня звука;

- очень низок уровень шума;

- лазерные технологии, технологии CD и DVD являются самыми передовыми методами передачи и сохранения музыки;

- появилась возможность создания огромного архива музыки и ее передачи: методом MP3 (MPEG-I Layer III) распространяются миллионы песен и других музыкальных произведений;

- высокие возможности распространения на большие расстояния, цифровая мелодия может в первоначальном виде без всяких искажений проигрываться в любом месте земного шара, очень удобна передача через Интернет.

В Казахстане создана и успешно выполняется программа развития цифровой телерадиосвязи. 3 июля 2012 г. был принят стандарт DVB T2. В городах Нур-Султан, Алматы, Караганды, Жезказган, Жана Озен с применением CYD irdeto Cloaked CA состоялось первое эфирное цифровое телевидение. В городе Алматы и областных центрах работает двухмультиплексный цифровой канал, он равнозначен 30 каналам SDTV. В других населенных пунктах работает 1 мультиплексный канал, который состоит из 15 информационных каналов. До сих пор параллельно используется аналоговая сеть телерадиовещания национального оператора АО “Казахтелерадио”.

Цифровая технология развивается высокими темпами. Она оказывает огромное влияние на развитие цивилизации.



1. Назовите преимущества и недостатки аналогового сигнала.
2. Обсудите особенности цифрового сигнала.
3. Каким образом используется цифровая технология "Smart—city"?

§ 19. Оптико-волоконные коммуникационные сети

Оптическое волокно (световод) состоит из двухслойного концентрического сердечника и оптического слоя (рис. 19.1).

Сердечник предназначен для передачи света. Показатель отражения оптического слоя вокруг него отличается от показателя преломления сердечника и обеспечивает полное внутреннее преломление в сердечнике. Явление полного внутреннего отражения мы будем изучать в следующих параграфах.

Показатель преломления оптического слоя примерно на 1% меньше, чем сердечника. Вокруг оптического слоя располагается дополнительная защитная оболочка. Она выполняется из полимера в один или несколько слоев и защищает волокно от вредных воздействий.

На рисунке 19.2 показано распространение света вдоль волокна.

Световой луч падает на границу "ядро — оптическая оболочка" под углом, большим чем предельный угол полного внутреннего отражения и испытывает на границе полное внутреннее отражение. Так как угол падения равен углу отражения, световой луч и дальше на границе будет испытывать полное внутреннее отражение. Таким образом световой луч внутри волокна распространяется по ломаной траектории.

Световые лучи, падающие на границу под углами, меньшими чем предельный угол полного внутреннего отражения, преломившись, переходят в оптическую оболочку и там поглощаются. *Волоконно-оптическая связь* — это вид связи, в котором распространение информации осуществляется с использованием диэлектрического распространителя волны в оптическом диапазоне электромагнитных волн. С появлением лазера в 1960 г. появилась возможность использования электромагнитных волн оптического диапазона в системе связи.

Укажем на некоторые особенности оптического волокна:

— основу дешевого кварцевого волокна составляет двуокись кремния;

— диаметр оптического волокна около 100 мкм, т. е. он очень легкий и компактный, поэтому перспективный в авиационной приборостро-

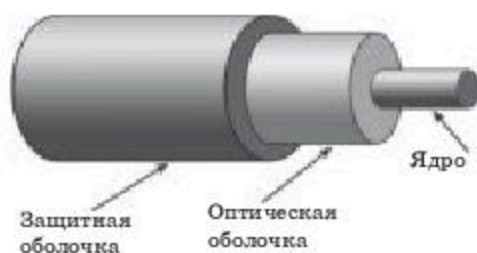


Рис. 19.1. Структура световода

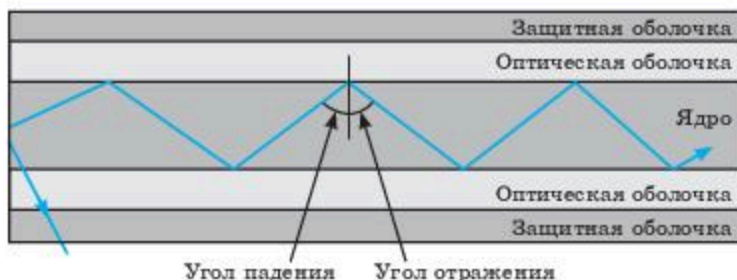


Рис. 19.2. Полное внутреннее отражение в оптическом волокне

ении и кабельной технике;

— стеклянные волокна не металлические, легкие, поэтому используя прочный пластик, его можно применять в любой среде: в воздухе, под водой и т. д.

— системы связи на основе волоконной оптики не чувствительны к негативным электромагнитным действиям, никто не может нелегально использовать информацию, передающуюся по световоду. По волоконно-оптической системе связи посторонние не могут прослушивать информацию.

В Казахстане широко развивается технология FTTH (Fiber To The Home). Это **оптоволоконный кабель**, который проводится в домах и квартирах. В связи с ростом спроса населения на высокоскоростные коммуникационные линии и для расширения спектра услуг в 2011 г. началось строительство линии универсальной оптоволоконной связи. Во многих крупных городах Казахстана сдаются в эксплуатацию линии оптоволоконной связи.

Внедрены базовые составляющие предоставления услуг организациям и населению, и создана инфраструктура “электронного правительства”. В качестве примера таких проектов можно назвать электронное лицензирование, оплату налогов и штрафов, электронный нотариат, электронную таможню и т. д.

Развитие всех вышеуказанных услуг, телерадиовещания, распространение информации через Интернет указывают на перспективу развития оптоволоконной связи.



1. Как вы используете интернет-сети в повседневной жизни: дома, в школе?
2. Что вы думаете о цифровой революции?

§ 20. Развитие средств связи в Казахстане



Ключевые понятия:

- ✓ Форт-Шевченко
- ✓ спутниковая связь
- ✓ волоконно-оптическая система

На этом уроке вы:

- систематизируете средства связи и предложите возможные пути их совершенствования.



Первая радиостанция в Казахстане была построена в 1913 г. (г. Форт-Шевченко). Мощность искрового передатчика составляла всего 1кВт. С его помощью установили постоянную связь в радиусе 300 км. Эта радиостанция работала в режиме радиотелеграфа.

Во второй половине XX в. система связи в Казахстане развивалась быстрыми темпами. Совершенствовались не только традиционно известные типы связи (телеграф и телефон), но и фототелеграф, радиовещание, телевидение, автоматические телефонные станции, международные и космические системы связи. Раньше междугородная телефонная связь осуществлялась по проводам, закрепленным между столбами. Такая система часто выходила из строя под воздействием окружающей среды, что не способствовало постоянству связи. Поэтому стали широко внедряться кабельные и радиорелейные системы. Первая в Казахстане радиорелейная связь между Алматы и Бишкеком (бывшим Фрунзе) стала функционировать с 1958 г. В радиорелейных системах использовались дециметровые и сантиметровые волны, поэтому они могли передаваться в пределах видимости антенны. Промежуточные небольшие радиостанции осуществляли передачу усиленных сигналов соседним станциям. Телесообщения сетями ретрансляторов на расстоянии 100—130 км друг от друга охватывали всю республику.

Телесообщения стали передаваться сначала из Алматы (1958 г.), позже из телецентров Усть-Каменогорска и Караганды. Особенно важную роль в улучшении качества передач и увеличении района охвата сыграла телебашня на горе Коктобе, построенная в 1984 г. Она расположена на возвышенности (250 м), а ее собственный “рост” — 372 м.

Успехи в области космической радиосвязи позволили создать новую систему связи, названную “Орбита”. Станция космической связи “Орбита” с 1967 г. работает и в Алматы. В этой системе используются ретрансляционные спутники связи. Сейчас всесторонне развивается система международной спутниковой связи, для которой используются спутники на гелиостационарной орбите (36 000 км). В Казахстане также введена в строй волоконно-оптическая система связи магистраль “ТрансАзия — Европа”.

18 июня 2006 г. с космодрома Байконур запущен первый казахстанский спутник связи “Kazsat”.

В настоящее время осуществляется программа полетов спутников связи данной серии.

Государственная программа “Информационный Казахстан-2020”, принятая в 2013 г., направлена на развитие современных средств связи, и призвана обеспечить создание условий для перехода к информационному обществу. Предполагается довести: долю пользователей сети Интернет в 2020 г. до 75%; охват эфирным цифровым телерадиовещанием населения Казахстана до 95%; долю государственных услуг, предоставляемых в электронном формате, до 50%. Развитие цивилизации XXI в. — очередного этапа научно-технической революции — характеризуется введением коммуникационных технологий во все сферы жизнедеятельности общества. Эти технологии являются фундаментом и материальной базой для перехода к информационному обществу с высокоразвитой социально-экономической сферой и культурой. В настоящее время самой интенсивно развивающейся сетью связи является мобильная радиосвязь (сотовая связь). Первым в мире пользователем сотового телефона был бывший руководитель отдела сети мобильной связи компании Motorola Мартин Купер. Кто мог подумать, что через 41 год после первого звонка мобильный телефон в корне изменит жизнь всего человеческого общества. Сейчас мобильный радиотелефон широко используется в пультах управления всевозможных устройств, эксплуатации кредитных карточек, фото- и видеокамерах и т. д. История развития сети сотовой связи в нашей стране начинается с 1994 г., когда начал действовать первый оператор сотовой связи “АЛТЕЛ”. Компания предоставила услуги мобильной связи в аналоговом стандарте AMPS(Advanced Mobile Phone Service) в диапазоне частот от 825 МГц до 890 МГц, для чего были использованы технологии и оборудование фирмы Motorola. Следующий этап развития средств связи в стране связан с работой компании “Кар-Тел”, который начал свою деятельность в 1998 г. В настоящее время в Казахстане сеть мобильной связи в основном осуществляется в формате GSM, UMTS и CDMA в стандарте GSM (900, 1800) МГц, UMTS / WCDMA (2100) МГц и CDMA(450, 800) МГц. Основными операторами являются:

- АО “Kcell” — торговые марки: Kcell, Activ и Vegaline;
- ТОО “Кар-Тел” — торговая марка Beeline;
- ТОО “Мобайл Телеком Сервис” — торговая марка Tele2;
- АО “АЛТЕЛ” — торговые марки Dalacom, Pathwovd и City.

Сейчас вводятся технологии 4G. Основным преимуществом 4G является высокая скорость передачи данных. В свое время переход к 3G означал (означает) возможность передачи данных на скоростях, позво-

ляющих смотреть видео — это качественно новый шаг. Технологически он основывается на прорыве в создании малопотребляющих микроэлектронных средств обработки сигналов — как цифровых (DSP), так и аналоговых (например, высокочастотные малошумящие усилители, полупроводниковые приборы на основе GaAs и других широкозонных полупроводниковых материалов). Микроэлектронные технологии глубоко субмикронного уровня (65—45 мкм и ниже) — это ни что иное, как снижение энергопотребления и увеличение функциональности в заданном объеме. Именно ради создания портативных устройств, в том числе телекоммуникационных, и ведут мировые лидеры полупроводниковых технологий пресловутую “гонку за нанометрами”.

4G устройства — это полноценный мультимедийный “офис в кармане”. Это — возможность устанавливать голосовые соединения, одновременно возможность для различных информационных сервисов — работа в Интернете, обмен большими массивами данных, просмотр ТВ-трансляций (IPTV), видео по запросу и т. п. То есть все то, что пользователь имеет сегодня у себя дома (в офисе). Операторы сотовой связи ввели в эксплуатацию в 2011 г. в городах Нур-Султан, Алматы, также во всех областных центрах сети поколения 3G. С 2012 г. началось освоение проекта построения сети четвертого поколения в стандарте 4G.

Первые сети кабельного телевидения в нашей стране начали проводить в 1980 г. Сейчас в республике услуги кабельного телевидения предлагают 146 операторов.

В марте 2003 г. в Казахстане была создана Ассоциация кабельных операторов ТВ. Назовем крупных операторов: АО “Алма-ТВ”, Холдинг “Alem Communications”; “Icon TV”; “Казахтелеком”; “iDTV”.

В развитии спутниковой связи большую роль играет Центр управления полетами космических ракет космодрома Байконур, где через спутниковую сеть “Жарык” телевидение распространяется во все регионы Казахстана, в приграничные районы России, Узбекистана, Монголии и Китая. Спутник “Казсат-3”, который запустили 28 апреля 2004 года, обеспечивает независимость нашей телекоммуникационной связи от зарубежных операторов связи. В 2014 г. был запущен первый казахстанский спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) “KazEOSat-1”.



1. Какие виды связи используются в ваших домах, городах?
2. Подготовьте проектные работы по 3G, 4G — стандартам.
3. Подготовьте сообщение о 5G стандартах и искусственном интеллекте.

Самое важное в главе 4

Максвелл создал теорию электромагнитного поля. По теории Максвелла любые изменения магнитного поля в окружающем пространстве способствуют появлению вихревого электрического поля. Переменное электрическое поле всегда создает вихревое магнитное поле. Электромагнитное поле может распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн.

В электромагнитной волне напряженность электрического поля и вектор индукции магнитного поля \vec{B} периодически изменяются. Векторы и взаимно перпендикулярны направлению распространения волны. Электромагнитные волны поперечны.

Электромагнитные волны излучаются в процессе колебаний ускоренно движущихся заряженных частиц (электронов).

Электрическая характеристика электромагнитных излучений — *плотность потока волн*:

$$I = \frac{W}{S \cdot \Delta t}.$$

Интенсивность электромагнитной волны обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника и прямо пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I \sim \frac{\omega^4}{r^2}.$$

Немецкий ученый Г. Герц был первым, получивший электромагнитные волны. А. С. Попов открыл систему связи радиотелеграфа, а Г. Маркони изобрел радио.

С помощью электромагнитных волн осуществляются радиосвязь, радиолокация, радиовещание и телевидение, космическая связь, радиотелескопические исследования и др.

Раздел III. ОПТИКА

Глава 5. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

§ 21. Интерференция света



Ключевые понятия:

- ✓ метод Юнга
- ✓ метод Френеля

На этом уроке вы:

- проведете сравнительный анализ интерференционных картин световых и механических волн.



При взаимодействии световых волн особенно интересен случай сложения волн одинаковой частоты с постоянным сдвигом фаз, так как при этом мы будем наблюдать интерференцию, заключающуюся в том, что в одних точках пространства волны будут усиливать друг друга, а в других — ослаблять. При этом будут наблюдаться чередующиеся светлые и темные полосы. Это и есть *интерференция света*. Она происходит точно так же, как и интерференция механических волн, и условия минимума (ослабления света) и максимума (усиления света) будут находиться в соответствии с формулами (22.4) и (22.5). В то же время есть и некоторые особенности интерференции световых волн.

Нам известно, что если два источника излучают синусоидальные волны одинаковой частоты, то в месте их встречи возникает интерференционная картина, но если попытаться получить эту картину с помощью двух независимых источников света, излучающих одинаковый свет, то никакой интерференционной картины мы не получим. Вроде бы следует вывод о том, что интерференции световых волн не существует. Но явление интерференции света наблюдал еще в 1675 г. Ньютон, а позднее и Юнг, и Френель. Как же это объяснить? Оказывается, все дело в волновых цугах. Разные атомы тела излучают независимо друг от друга, и поэтому, несмотря даже на то, что у них может быть одинаковая частота, фазы у разных цугов различны. А это означает, что свет, излучаемый разными атомами возбужденного тела, приходит в данную точку пространства так, что сдвиг фаз между этими колебаниями постоянно меняется. Тогда амплитуда результирующего колебания, возникающего при сложении двух волн в данной точке, тоже будет изменяться за одну секунду случайным образом около миллиона раз (то минимум, то максимум). Наши глаза будут воспринимать картину равномерного освещения всей поверхности, на которую падает световая энергия. Поэтому *интерференция световых волн возникает только при сложении когерентных волн*.

Практическое применение интерференции света. Интерференция света — это физическое явление, которое представляет собой интерес как с научной точки зрения, так и с практической. Рассмотрим некоторые примеры практического применения интерференции света.

1. *Интерферометры* — это чувствительные приборы, позволяющие точно определять очень малые углы, длины световых волн, размеры малых отрезков, показатели преломления различных веществ, качество обработки поверхности, точность полировки поверхности. Интерферометры особенно эффективны при изучении качества обработки поверхностей линз, зеркал и других приборов оптики. С их помощью исследуют быстротекущие процессы в воздухе, происходящие вокруг летательных аппаратов. Действие интерферометров основано на явлении интерференции света. Во всех интерферометрах световые лучи сначала расщепляются на два или более когерентных луча, а затем эти лучи сходятся вместе. Конструкции интерферометров различны, но принцип действия одинаков. В современной науке используются двухлучевые интерферометры Майкельсона и многолучевые интерферометры Линника, Луммера — Герхе, Фабри — Перо.

2. *Явление интерференции* используется для просветления оптики, другими словами, с помощью интерференции можно увеличить или уменьшить количество отраженного света. В оптических приборах много оптических деталей, при отражении от которых большая часть света теряется, поэтому изображение предмета темнеет. Но если на поверхность линз наносить тонкий слой особой пленки, то можно добиться, чтобы в этой пленке световые лучи гасили друг друга в отраженном свете, тогда вся световая энергия проходит сквозь линзу, и изображение получается более ярким.

Расчеты доказали, что *показатель преломления материала пленки должен быть меньше показателя преломления вещества линзы, но больше показателя преломления среды, окружающей линзу, т. е. воздуха.* Технология покрытия линз пленкой разработана советским физиком И. В. Гребенщиковым. Свет отражается два раза: сначала на границе воздух — пленка, а затем на границе пленка — линза (рис. 21.1).

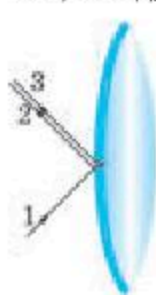


Рис. 21.1

Толщина и показатель преломления подбираются так, чтобы оба отраженных луча были в противофазах, тогда они будут гасить друг друга. Зато в проходящем свете мы будем иметь усиление света. Условие максимума в проходящем свете выглядит так: $\Delta = 2dncos\beta + \frac{\lambda_0}{2}$. Пусть свет падает нормально к поверхности линзы, тогда угол $\beta = 0^\circ$, и поэтому $cos\beta = 1$. Тогда получим, что $d = \frac{\lambda_0}{4n}$, где d — толщина

пленки; λ_0 — длина волны света в среде (в воздухе); n — показатель преломления пленки. Расчеты показали, что полное гашение света наблюдается при выполнении следующего условия: $n_{\text{пленки}} = \sqrt{n_{\text{линзы}}}$. Так как толщина пленки зависит от длины волны падающего света, то расчеты производятся для длин волн наиболее интенсивных лучей, т. е. лучей голубого и фиолетового цветов. Поэтому линзы с просветленной оптикой имеют фиолетовый оттенок.



1. В чем состоит главная особенность волнового движения?
2. Что называется фронтом волны? Как направлена скорость волны по отношению к фронту волны?
3. Какое явление называется интерференцией? Что необходимо сделать для того, чтобы его наблюдать?
4. Происходит ли сложение волн при наложении друг на друга некогерентных волн? Почему?
5. Чем объясняется расцветка крыльев стрекоз? Почему она изменяется, если рассматривать их под разными углами?
6. Можно ли потушить свет светом? Если да, то как это сделать?
7. Какова приблизительно толщина мыльного пузыря в тех местах, где он кажется зеленым?
8. Как работает интерферометр?
9. Перечислите известные вам примеры использования интерференции.



Выдуйте мыльный пузырь. Обратите внимание на изменение цвета оболочки мыльного пузыря сверху вниз. Объясните почему разные слои оболочки пузыря имеют разный цвет.



Упражнение 9

1. Тонкая пленка при освещении белым светом кажется зеленой в отраженном свете, если на нее смотреть по направлению перпендикуляра к ее поверхности. Что будет происходить с окраской пленки, если ее наклонять относительно световых лучей?

Ответ: изменяется от красной к голубой, синей, фиолетовой.

2. Чем объяснить, что при освещении тонкой пленки параллельными пучками белого света наблюдается радужная окраска пленки?
3. Почему поверхность воды, на которой разлили бензин, становится радужного цвета?

Ответ: интерференция на тонкой пленке.

4. При какой минимальной оптической разности хода две когерентные световые волны с длиной волны 0,6 мкм будут ослаблять друг друга при интерференции?

Ответ: 0,3 мкм.

§ 22. Дифракция света



Ключевые понятия:

- ✓ дифракция
- ✓ принцип Френеля
- ✓ дифракционная решетка
- ✓ дифракционная картина
- ✓ период решетки



На этом уроке вы:

- объясните дифракционную картину от нити, щели, круглого отверстия, используя теорию Френеля.

Дифракцией света называется отклонение света от прямолинейного распространения, или огибание светом препятствий. Дифракция света была открыта итальянским физиком Франческо Мария Гримальди в середине XVII в. Он проделал очень простой опыт: между ставнями окна оставил узкую щель, через которую луч света попадал на палки разной толщины. Изучая тени от них, он обнаружил нарушение законов геометрической оптики. Там, где должна была быть тень, наблюдались светлые полосы, которые к тому же были еще и окрашенными. Наблюдать дифракцию света от одной щели трудно, так как для этого размеры отверстия или препятствия должны быть соизмеримы с длиной световой волны, а на практике размеры препятствий всегда больше длины световой волны. Поэтому наблюдать дифракцию можно только на довольно больших расстояниях от преграды. Так, например, во время лунного затмения можно наблюдать огибание Земли светом, идущим от Солнца. Луна становится темно-красной, так как световые волны именно этой длины волны, обогнув Землю, проинтерферировали на поверхности Луны. То есть для наблюдения дифракции необходимо создать должные условия.

Приведем некоторые опыты, подтверждающие явление дифракции света. Если поместить перед источником света узкую щель, то на экране, расположенном в темном помещении, ожидается появление изображения щели. Оно и появлялось, но было окрашенным, и не всегда напротив щели было светлое пятно, иногда оно было темным. Или, если взять отверстие, в котором натянута тонкая проволока или человеческий волос, то на экране должна появиться тень от проволоки. На самом же деле на экране были видны несколько теней от проволоки.

Проявление дифракции света состоит в том, что распределение освещенности поверхности отличается от простой картины, предсказываемой геометрической оптикой на основе прямолинейного распространения света.

Явление дифракции света было объяснено Гюйгенсом и Френелем. Согласно принципу Гюйгенса — Френеля, каждую точку волнового фронта

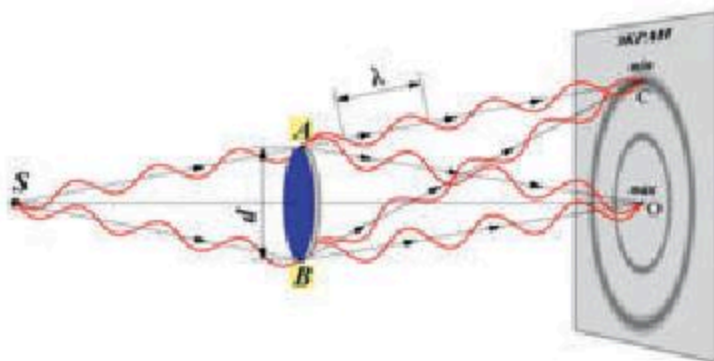


Рис. 22.1

можно принять за центр новых (вторичных) сферических волн. Пусть поверхность AB (рис. 22.1) представляет собой положение волнового фронта в некоторый момент времени. Тогда для того чтобы определить вызванные волной колебания в некоторой точке D , по Френелю, нужно определить колебания, вызываемые в этой точке отдельными вторичными волнами, приходящими в данную точку от отдельных элементов поверхности AB , а затем сложить эти колебания с учетом их амплитуд и фаз, т. е. результирующая дифракционная картина для любой точки D будет определяться как результат интерференции волн.

Дифракционная решетка. Для того чтобы получать и наблюдать четкую, яркую дифракционную картину, используют дифракционную решетку. *Дифракционная решетка — это совокупность большого числа препятствий и отверстий, на которых происходит дифракция света.*

Различают регулярные и нерегулярные дифракционные решетки. *Регулярными решетками называются те, в которых отверстия располагаются в строгом порядке, а нерегулярные — это те, в которых отверстия расположены беспорядочно.* Кроме того, по геометрической структуре различают *плоские* и *пространственные* решетки. Примером пространственной нерегулярной решетки является скопление капелек тумана в воздухе или скопление кристалликов льда.

Плоская регулярная решетка. Ее изготавливают из совокупности параллельных и близко расположенных щелей и препятствий, которые наносятся алмазным резцом. Пусть ширина щели равна a , ширина штриха-препятствия — b . Тогда величина $d = a + b$ будет называться *постоянной решетки*, или ее *периодом*.

Рассмотрим процесс распространения света в дифракционной решетке. Пусть плоский фронт монохроматического излучения достиг положения, совпадающего с плоскостью щелей решетки. С помощью линзы соберем все параллельные группы на экране. Выберем на экране произвольную точку A , в которой собирается пучок параллельных лучей, идущих в некотором направлении φ . Из рисунка 23.3 легко найти разность хода световых лучей, идущих от двух соседних щелей

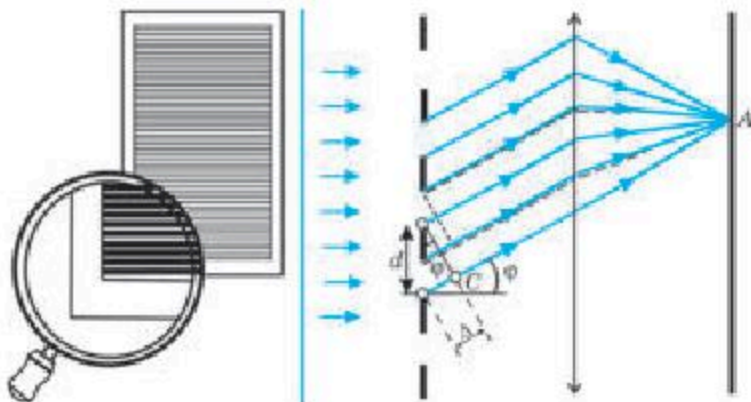


Рис. 22.2

$\Delta = d \sin \varphi$. Максимум в точке A будет наблюдаться, если $\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$. Тогда для дифракционной решетки справедлива следующая формула:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad (22.1)$$

по которой можно рассчитать положение максимумов первого, второго и т. д. порядков. *Дифракционная картина* — это ряд цветных полос, разделенных темными промежутками. При белом свете в центре наблюдается светлое пятно, по краям которого расположены окрашенные спектры первого, второго и т. д. порядков. Причем чем больше длина волны (чем “краснее” свет), тем больше угол, под которым наблюдается максимум для этой волны. Если же на решетку направить, например зеленый свет, то все максимумы будут зеленого цвета. Из формулы (22.1) следует, что для длины волны может наблюдаться несколько максимумов: при $n = 0$ угол $\varphi = 0$, и мы получим максимум, который носит название *максимум нулевого порядка*; при $n = \pm 1$ $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{d}$ мы будем иметь *два максимума первого порядка*, расположенных симметрично по обеим сторонам нулевого максимума; $\sin \varphi = \frac{2\lambda}{d}$ при $n = \pm 2$, и мы получим *два симметричных максимума второго порядка* и т. д. Отсюда следует, что максимумы первого порядка видны под определенным углом φ_1 , максимумы второго порядка — под углом φ_2 , который больше угла φ_1 . Если период решетки мал, то соответствующие значения углов φ велики, как велика и разность двух значений для волн разной длины. А это означает, что *уменьшение периода решетки приводит к увеличению углового расстояния между максимумами различных длин волн, и тогда с помощью такой дифракционной решетки можно более четко разделить длины волн, т. е. качество решетки становится выше, а максимумы — резче.*

Современные решетки содержат до 1200 штрихов на 1 мм. Хорошие решетки получают, проводя тонким резцом параллельные штрихи на

поверхности металлического зеркала. Эти решетки называются *отражательными*. Для изготовления *прозрачной решетки* прочерчивают штрихи на поверхности стеклянной пластинки.



1. Какое явление называется дифракцией? При каких условиях оно наблюдается?
2. Как рассчитать период дифракционной решетки?
3. Как изменяется качество дифракционной картины от решетки с изменением периода решетки?
4. Как определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки?



Упражнение 10

1. При освещении дифракционной решетки светом с длиной волны 590 нм спектр третьего порядка виден под углом 10° . Определите длину волны, для которой спектр второго порядка будет виден под углом 6° .
Ответ: 521 нм.
2. Определите длину волны для линии в дифракционном спектре третьего порядка, совпадающей с изображением линии в спектре четвертого порядка с длиной волны 490 нм.
Ответ: 653 нм.
3. Какой наибольший порядок спектра можно видеть в дифракционной решетке, имеющей 100 штрихов на 1 мм, при освещении ее светом с длиной волны 720 нм?
Ответ: 13.
4. Расстояние между экраном и дифракционной решеткой, имеющей 125 штрихов на 1 мм, равно 2,5 м. При освещении решетки светом с длиной волны 420 нм на экране видны синие линии. Определите расстояние от центральной линии до первой линии на экране.
Ответ: 13 см.

§ 23. Дисперсия света. Поляризация света



Ключевые понятия:

- ✓ дисперсия
- ✓ призма
- ✓ первичные цвета
- ✓ поляризация
- ✓ оптическая ось

На этом уроке вы:

- узнаете, что такое дисперсия;
- экспериментально исследуете поляризацию света.



Человечество издавна интересовал вопрос о цветах различных тел. Причем до Ньютона в этом вопросе царила полная неопределенность. Считалось, что цвет — это свойство самого тела, хотя при внимательном

наблюдении можно обнаружить, что при изменении условий освещения меняется цвет тела. Существовало и другое мнение, заключавшееся в следующем: различные цвета получаются при смешивании света и темноты. Цвета радуги связывались с дождевыми каплями. Игра цветов в ограненных алмазах или стеклянных призмах тоже была хорошо известна. Но никто до Ньютона не пытался сопоставить эти явления и найти связь между ними. В 1666 г. им был проведен эксперимент, противоречащий практически всем теориям цвета, существовавшим в то время. Прочитируем собственное описание Ньютоном этого опыта.

“В 1666 г. (когда я стал шлифовать оптические стекла несферической формы) я раздобыл себе треугольную стеклянную призму для того, чтобы с ее помощью попробовать проверить известные явления цвета. Для этой цели я затемнил мою комнату и сделал очень маленькое отверстие в ставне для пропуска соответствующего количества солнечного света. Я поместил мою призму у этого отверстия таким образом, чтобы она преломляла свет на противоположную стенку. Мне доставляло большое удовольствие рассматривать живые и интенсивные цвета, получающиеся таким образом”.

*Полосу, состоящую из различных цветов, которые получаются в результате прохождения света от источника через призму, Ньютон назвал спектром (от лат. *spektrum* — “видение”) (рис. 23.1).*

Ньютон был озадачен двумя особенностями этого эксперимента. Почему белый свет, входящий в призму, выходил из нее окрашенным? И почему падающий круглый пучок оказывался продолговатым после преломления в призме? Сравнив длину пучка с его шириной, он нашел, что длина в пять раз больше ширины. Объяснить это было трудно, но Ньютон в конце концов смог выделить каждый отдельный цвет солнечного спектра из всех других и заставил его преломляться через вторую призму. При этом он обнаружил, что разные цвета преломляются по-разному, например, красный цвет преломляется слабее других, а фиолетовый сильнее всех. Почему это происходило именно так, Ньютон не знал, но зато этот эксперимент объяснял образование продолговатости при преломлении света в призме.



Рис. 23.1

Кроме того, этот эксперимент показал, что белый цвет — это сложный цвет. Он состоит из семи основных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Есть простая поговорка, позволяющая запомнить порядок расположения цветов в солнечном спектре: “Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан”. То, что белый цвет — это сложный цвет, доказывает еще один опыт, проведенный Ньютоном. Он взял круглый диск, на котором были нанесены основные семь цветов в виде секторов. Этот диск был укреплен на оси двигателя. При определенной скорости вращения цветной диск становился белым.

Открытое Ньютоном явление получило название *дисперсии света* (от лат. *dispergo* — “разбрасываю”, т. е. означает буквально “разброс”). Дисперсия света имеет два смысла: 1) *дисперсия* — это явление разложения белого сложного цвета в спектр; 2) *дисперсия* — это явление зависимости показателя преломления вещества от длины волны падающего света. Следовательно, одно и то же вещество имеет различный показатель преломления для разных длин волн.

Нам известно, что скорость света в вакууме равна 300000 км/с, а вот в других прозрачных средах она разная, причем меньше, чем в вакууме. Кроме того, скорость распространения световых волн красного цвета в любой среде максимальна, а скорость распространения световых волн фиолетового цвета минимальна. Так, например, в воде $v_{кр} = 228\ 000$ км/с, а $v_{ф} = 227\ 000$ км/с; в сероуглероде $v_{кр} = 185\ 000$ км/с, а $v_{ф} = 177\ 000$ км/с. **В вакууме дисперсия света не происходит**, так как все световые волны там распространяются с одинаковой скоростью.

Открытие явления дисперсии позволило объяснить образование радуги. Преломление света в водяных капельках или ледяных кристалликах, парящих в атмосфере, сопровождается дисперсией в воде и льде солнечного света.

Различают *нормальную* и *аномальную* дисперсию света. Опыты показали, что в большинстве случаев *показатель преломления среды обратно пропорционален длине волны. Такая дисперсия называется нормальной*. Если же *показатель преломления среды прямо пропорционален длине волны, то дисперсия называется аномальной*.

Дополнительные цвета. Если из солнечного спектра изъять красный цвет, то в результате получится голубовато-зеленый свет; если голубой, то получится желтый свет; если удалить зеленый, то получится пурпурный. С другой стороны, если сложить голубовато-зеленый и красный цвета, то в результате опять получится белый свет. Точно так же желтый вместе с голубым цветом дают белый свет. *Два цвета, дающие при сложении белый свет, Ньютон назвал дополнительными цветами*.

Первичные цвета. В 1807 г. английский физик Томас Юнг сделал очень важное открытие. Он обнаружил, что белый цвет можно создать комбинацией красного, зеленого и голубого цветов. Кроме того, и другие цвета также можно получить, комбинируя красный, зеленый и голубой цвета. Красный, зеленый и голубой цвета были названы Юнгом *первичными цветами*. Ни один из этих первичных цветов не может быть получен никакой комбинацией других цветов. Это можно легко проверить, проектируя на белый экран пятна голубого, зеленого и красного цветов. В местах, где накладываются все три цвета, получим белый свет; там, где накладываются красный и голубой, получается пурпурный; там, где налагаются красный и зеленый, получаем желтый свет.

Цвета предметов. Опыт показывает, что цвет тела, освещаемого белым светом, зависит от того, лучи какого цвета это тело рассеивает. Если тело равномерно рассеивает все составные части белого света, то при обычном освещении оно кажется белым, например лист бумаги. Если тело, например сажа, поглощает весь падающий на него свет, то оно кажется черным. Кроме того, различные тела не только неодинаково рассеивают свет разного цвета, но и неодинаково пропускают свет через себя. Поэтому, когда мы рассматриваем прозрачные тела на просвет, они кажутся нам различно окрашенными. Такие тела называются *светофильтрами*.

Природный и поляризованный свет. Нам с вами уже известно, что свет — это электромагнитные волны с длиной волны 400—700 нм. Каждый элементарный излучатель (атом) излучает электромагнитную волну с определенной ориентацией векторов напряженности электрического и магнитного полей. Но атомов в теле много, и расположены они беспорядочно. Поэтому свет от них распространяется в различных направлениях, причем амплитуда колебаний по всем направлениям одинакова.

Свет, амплитуда колебаний которого по всем плоскостям одинакова, называется естественным, а свет, у которого энергия по разным плоскостям различна, называется частично поляризованным. Если же вся энергия света сосредоточена в одной плоскости, то свет называется полностью поляризованным. Плоскость, в которой совершаются колебания, называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость называется плоскостью поляризации.

*Выделение из световых колебаний в естественном свете определенного колебания называется поляризацией света. Приборы, предназначенные для получения поляризованного света, называются **поляризаторами**, а приборы, определяющие, какой это свет — естественный или поляризованный, — **анализаторами**. Устройство поляризатора и анализатора одинаково. Свет поляризуется как при отражении, так и при преломлении.*

Открытие поляризации света. Впервые явление поляризации было обнаружено в опытах, произведенных с кристаллами турмалина. Турмалин представляет собой кристалл буро-зеленого цвета, поэтому свет, проходя сквозь него, выходит темно-зеленым. Из кристалла турмалина были вырезаны одинаковые прямоугольные пластинки. При этом одна из сторон прямоугольника совпадает с определенным направлением внутри кристалла, которое носит название *оптическая ось*. Если эти пластинки расположить так, чтобы их оптические оси совпали, и пропустить через них узкий пучок света, то на экране мы получим темно-зеленое пятнышко. Если мы будем вращать одну из пластинок, оставляя вторую неподвижной, то обнаружим, что освещенность экрана в месте падения света будет уменьшаться, а при повороте на угол 90° пятнышко исчезнет совсем. При дальнейшем повороте пластинки освещенность снова будет возрастать, и при повороте на угол 180° она станет максимальной. При этом оптические оси пластинок снова станут параллельными. Когда же оптические оси пластинок перпендикулярны, то освещенность экрана минимальна (световое пятно исчезает). Было отмечено, что направление вращения пластинок не играет никакой роли. В каком бы направлении мы не вращали пластинку, явление происходит одинаково.

Явление поляризации можно объяснить, если выдвинуть следующие предположения.

1. Кристалл турмалина обладает свойством пропускать световые колебания только в том случае, если их плоскость колебаний расположена определенным образом по отношению к его оптической оси.

2. Световые колебания в световом пучке направлены перпендикулярно линии распространения света, т. е. световые волны — это поперечные волны.

3. Свет, распространяющийся от обычного источника света, содержит колебания, происходящие в различных плоскостях, причем в равной мере.

Третье предположение объясняет, почему естественный свет одинаково хорошо проходит через кристалл турмалина при любой его ориентировке. Ведь при любой ориентировке кристалла турмалина в естественном свете всегда окажется одна и та же доля колебаний, плоскость колебаний которых совпадет с направлением, пропускаемым кристаллом турмалина (рис. 23.2). Прохождение естественного света через турмалин (*поляризатор*) приводит к тому, что из всех возможных плоскостей колебаний отбираются только те, которые могут пропускаться турмалином (E_0). Поэтому свет, прошедший через турмалин, будет представлять собой совокупность поперечных колебаний в од-

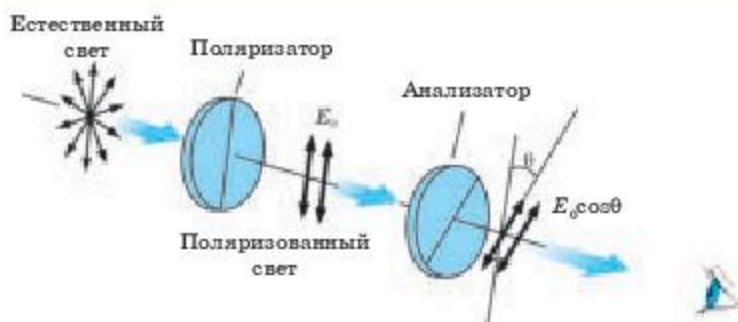


Рис. 23.2

ной плоскости, определяемой ориентацией оптической оси кристалла турмалина. Этот свет и называется **поляризованным**, а плоскость колебаний в нем — **плоскостью колебаний поляризованного света**. Следовательно, первая пластинка поляризует свет, оставляя в пучке проходящего света колебания, происходящие только в одной плоскости — плоскости поляризации. Второй же кристалл турмалина (**анализатор**) полностью пропустит эти колебания только в том случае, когда плоскости поляризации обоих кристаллов совпадут, и не пропустит совсем, если эти плоскости будут перпендикулярны друг другу. Во всех остальных случаях свет будет проходить частично ($E_0 \cos \theta$), т. е. интенсивность проходящего света уменьшится.

Очень просто объяснить явление поляризации с помощью механической модели. Если взять упругий жгут и, закрепив один из его концов, заставить другой конец вращаться, то при размещении на его пути двух плоских поверхностей, разделенных узким зазором, колебания жгута, прошедшие через зазор, будут происходить только в одной плоскости. Если на пути этих колебаний поместить две другие параллельные плоскости с малым зазором, то в зависимости от ориентации вторых плоскостей колебания жгута будут либо проходить, либо гаситься.



Рис. 23.3

Поляриды. На практике оказалось, что поляризацию света могут осуществлять не только кристаллы турмалина, но и многие другие, например, исландский шпат, кристаллы которого пропускают одновременно два луча, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Некоторые кристаллы, типа турмалина, поглощают один из двух поляризованных лучей полностью, и поэтому через них проходит только один луч, поляризованный в определенном направлении. Такие кристаллы назы-

ваются *дихроичными*. Существуют кристаллы, еще сильнее задерживающие один из поляризованных лучей. При этом их толщина может составлять 0,1 мм и даже меньше. Нанося такие пленки на целлулоид, получают поляризатор размером в несколько квадратных дециметров. Эти пластинки-пленки называются *поляроидами*. Они очень удобны в использовании. При вращении анализатора свет, проходящий через него, будет менять свою интенсивность (рис. 23.3).



1. Опишите опыт, который проводил Ньютон с треугольной призмой.
2. Какое явление называется дисперсией?
3. Какие цвета называются дополнительными, а какие первичными?
4. Как объяснить цвета тел?
5. В каких случаях поверхность тела будет представляться нам красной, зеленой, белой, черной? Как это показать на опыте?
6. Как можно объяснить образование радуги? Почему иногда радуга бывает двойной?
7. Чем определяется цвет поверхности тел?
8. Почему снег белый, а сажа черная?
9. Опишите и объясните явление поляризации света на кристаллах турмалина.
10. Какой свет называется естественным, а какой — поляризованным?
11. Что происходит при вращении анализатора вокруг поляризатора? Почему?
12. Какие вещества называются поляроидами?
13. Почему защитные стекла, сделанные из поляризующих материалов, имеют преимущества перед стеклами, действие которых основано на простом поглощении света?

Самое важное в главе 5

Явление интерференции происходит всегда, но наблюдать его можно только в случае *когерентных волн* — волн с одинаковой частотой и постоянным сдвигом фаз.

Явление интерференции света применяют для проверки качества обработки поверхностей, просветления оптики, определения длины световой волны. На явлении интерференции основан новый вид фотографии — *голография*.

2. Второе явление, присущее только волнам, называется *дифракцией*. Оно заключается в том, что волны огибают препятствие. Наблюдать это явление можно только тогда, когда размеры препятствия соизмеримы с длиной волны. Дифракцию световых волн проще всего наблюдать с помощью особого прибора — *дифракционной решетки*, представляющей собой чередующиеся отверстия и препятствия. Используя *формулу дифракционной решетки* $d \sin \varphi = k \lambda$, легко определить длину световой волны.

3. Для поперечных световых волн характерно еще одно явление — *поляризация*, которое заключается в том, что естественный свет (его электромагнитные поля колеблются во всевозможных плоскостях) превращается в поляризационный (колебания происходят только в определенной плоскости). Явление поляризации можно обнаружить, используя поляризатор и анализатор.

4. Для световых волн характерно еще одно явление — *дисперсия*, которое заключается в зависимости показателя преломления света от его цвета (частоты). Проявляется оно в разложении белого цвета на составляющие его цвета при прохождении света через призму. Благодаря дисперсии света можно объяснить происхождение цветов, образование радуги.

Глава 6. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

§ 24. Прямолинейное распространение света



Ключевые понятия:

- ✓ световой луч
- ✓ опыт Физо
- ✓ методы определения скорости света

На этом уроке вы:

- изучите законы геометрической оптики;
- научитесь применять принцип Ферма для вывода законов геометрической оптики.



Геометрическая оптика — это раздел оптики, изучающий распространение света, не рассматривая его природу. Это абстрактная оптика, опирающаяся на законы геометрии.

Геометрическая оптика является частным случаем волновой оптики и применяется в тех случаях, когда размеры рассматриваемого участка волны велики по сравнению с длиной волны. Одним из основных понятий геометрической оптики является понятие *световой луч*. **Световой луч** — это линия, вдоль которой распространяется световая энергия, или линия, проведенная перпендикулярно волновому фронту и показывающая направление распространения волнового возмущения. Световой луч берет начало на источнике света.

Законы геометрической оптики были установлены экспериментально, в основном при наблюдениях за световыми лучами, и очень давно. В геометрической оптике существуют **четыре основных закона**, которые описывают распространение света.

1. **Закон прямолинейного распространения света:** луч света в однородной среде распространяется прямолинейно.

2. **Закон независимого распространения света:** световые лучи, встречаясь, не оказывают влияния на дальнейшее распространение друг друга.

3. **Закон отражения света:** 1) луч падающий 1, луч отраженный 2 и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) угол падения α равен углу отражения γ (рис. 24.1).

4. **Закон преломления света:** 1) луч падающий (1), луч преломленный (3) и перпендикуляр (2), восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называется **относительным показателем преломления** первой среды относительно второй:

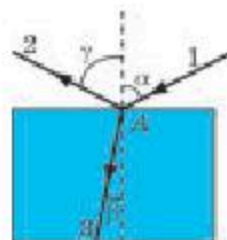


Рис. 24.1

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (24.1)$$

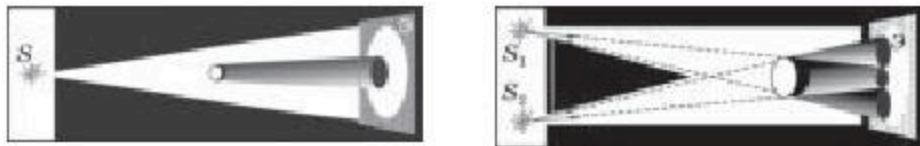


Рис. 24.2

Прямолинейное распространение света. Прямолинейное распространение света позволяет объяснить образование теней и полутеней. *Тень* — это область пространства за непрозрачным предметом, куда не попадает световая энергия. В яркий солнечный день отчетливо видны тени людей, деревьев, зданий и т. д. Если взять точечный источник света и на пути светового пучка, идущего от него, поместить непрозрачный предмет, то за предметом образуется расходящаяся конусообразная тень, а на экране появится тень, повторяющая контур предмета (рис. 24.2). Если источник света будет протяженным, то за предметом образуется сходящаяся конусообразная тень. Если же непрозрачный предмет освещается двумя источниками света, то образуется три тени. Одна из них полная тень, т. е. область пространства, куда не попадает свет ни от одного источника. Две другие тени менее темные, потому что в их область проникает свет от одного из источников. Эти тени называются *полутенями*.

Скорость света. Благодаря прямолинейному распространению света смогли измерить скорость света. Первую попытку определить скорость света еще в 1607 г. предпринял итальянский физик Галилео Галилей. На противоположных концах большой равнины он разместил двух наблюдателей со сверенными часами. У одного из них в руках был фонарь, который он зажигал, засекая при этом время по своим часам. А второй наблюдатель фиксировал промежуток времени, спустя который он увидел вспышку света. Опыт не удался, так как этот промежуток времени оказался слишком мал.

В 1675 г. датский астроном Оле Рёмер в Париже наблюдал за затмениями спутников Юпитера. Он составил таблицу, в которой было зафиксировано среднее время обращения каждого спутника вокруг Юпитера (рис. 24.3). При этом он обратил внимание на то, что, когда Земля и Юпитер находятся на минимальном расстоянии друг от друга, затмения происходят почти на 22 мин раньше момента, вычисленного из среднего периода обращения. Когда же Земля и Юпитер находятся на максимальном расстоянии друг от друга, то затмения на столько же запаздывают. Рёмер сделал верный вывод, что эти отклонения возникают из-за того, что свет затрачивает некоторое время (1320 с) на прохождение расстояния, равного диаметру орбиты Земли вокруг Солнца. После этого он легко рассчитал скорость света:

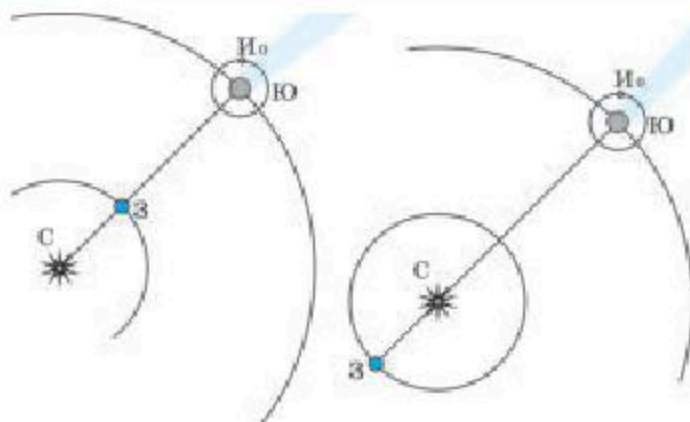


Рис. 24.3

$$c = \frac{2R_{\oplus}}{t} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}}{1320 \text{ с}} = 2,27 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Современные методы определения промежутка времени показали, что на прохождение расстояния, равного диаметру орбиты Земли, вокруг Солнца свет тратит 1000 с. С учетом этого мы получим, что скорость света равна: $c = 3 \cdot 10^5$ км/с.

В 1722 г. английский астроном Джеймс Брайдлей определил скорость света на основе открытого им явления *звездной аберрации*. По его расчетам скорость света получилась равной 303 000 км/с.

Методы, которыми пользовались для определения скорости света Рёмер и Брайдлей, получили названия *астрономические методы*. Но существуют еще и лабораторные методы определения скорости света.

Опыт Физо. В 1849 г. французский физик Арман Ипполит Луи Физо рассчитал скорость света в земных условиях. Для того чтобы точно определить скорость света, необходимо как можно точнее определять малые промежутки времени. Для измерения малых промежутков времени Физо предложил использовать зубчатое колесо с 720 зубчиками (рис. 24.4). Свет от источника света *И* направлялся на полупрозрачное зеркало *А*, которое разбивало его на два луча. Отраженный луч попадал на зубчатое колесо, проходил через его от-



Рис. 24.4

верстия, доходил до зеркала Z и, отразившись от него, возвращался обратно и снова попадал на зубчатое колесо. Меняя частоту вращения колеса, можно добиться, чтобы свет проходил через зубчатое колесо и попадал на полупрозрачное зеркало A , отразившись от которого, попадал в зрительную трубу и в глаз наблюдателя G . Чтобы получить такой эффект, необходимо, чтобы время, за которое свет проходит расстояние от колеса до зеркала Z и обратно, было равно времени поворота колеса на ширину зубца. Первое время найдем так: $t = \frac{2l}{c}$, где l — расстояние от колеса до зеркала Z ; c — скорость света.

Если частота вращения колеса равна ν , то время поворота колеса на ширину зубца будет равно $r = \frac{1}{2\nu n}$, где n — число зубцов на колесе. Тогда $t = r$;

$$c = \frac{2l}{t} = \frac{2l}{\frac{1}{2\nu n}} = 4\nu nl.$$

В опытах Физо расстояние l было равно 8,6 км. Произведя расчеты, ученый получил, что скорость света равна 313000 км/с. Для того времени это был очень неплохой результат.

Кроме перечисленных опытов по определению скорости света, существуют еще и методы Фуко (использовалось вращающееся зеркало, которое совершало 800 об/мин), метод с применением эффекта Керра (на основе поляризации света).

Опыт Майкельсона. В 1923 г. американский физик Альберт Абрахам Майкельсон усовершенствовал *метод вращающегося зеркала*. Расчеты, проведенные Майкельсоном, получили значение скорости света $c = \frac{l}{\tau} = (299796 \pm 4)$ км/с. По современным данным, скорость света в вакууме равна $299\,792\,458 \pm 0,3$ м/с.



1. О чем говорит закон прямолинейного распространения света?
2. Что называется тенью?
3. Как, используя закон прямолинейного распространения света, объяснить образование теней и полутеней?
4. Каким образом определил скорость света Рёмер?
5. Если на Земле наблюдается полное лунное затмение, то что будут наблюдать космонавты, находящиеся в это время на Луне?

§ 25. Явление отражения света. Плоские и сферические зеркала



Ключевые понятия:

- ✓ отражение света
- ✓ плоское и сферическое зеркала
- ✓ замечательные лучи
- ✓ оптическая ось

На этом уроке вы:

- научитесь строить изображение в плоских и сферических зеркалах;
- применять формулы плоского и сферического зеркала при решении задач.



Явление отражения света. *Отражением света называется явление изменения направления хода светового луча, наблюдаемое на границе двух сред. При этом луч света возвращается в исходную среду. Различают два вида отражения: правильное (или зеркальное) и рассеянное (диффузное). Правильное, или зеркальное, отражение — это отражение, которое происходит от идеально гладкой, отполированной поверхности (неровности этой поверхности малы по сравнению с длиной волны света). Различные зеркальные поверхности имеют различную интенсивность отражения. Так, например, серебряное отполированное зеркало отражает 96% падающего света, а гладкая отполированная черная поверхность отражает всего 1% световой энергии. Рассеянное, или диффузное, отражение — это отражение, происходящее от шероховатой поверхности (у такой поверхности неровности велики). При диффузном отражении параллельный пучок света отражается под разными углами, рассеиваясь во все стороны. Поверхность, равномерно рассеивающая свет во все стороны, называется **матовой**. Таких поверхностей нет, но есть близкие к ним, например мел.*

Если смотреть на шероховатую поверхность любого тела, освещенную светом, то мы видим эту поверхность; если же смотреть на зеркальную поверхность чистого зеркала, то мы ее не видим, зато видим в зеркале свое изображение и изображение окружающих предметов. Именно поэтому поверхности экранов, на которые проектируются кинофильмы, делаются не зеркальными, а шероховатыми. Лучше всего свет рассеивается от поверхностей с очень малыми неровностями, например, от чертежной или писчей бумаги, гипса, мела и т. п. Кроме того, свет сильно рассеивает частицы пыли или тумана. Рассеянный свет меньше утомляет глаз человека, чем отраженный.

Плоское зеркало. Явление зеркального отражения очень широко используется в зеркалах. Зеркала бывают плоскими и сферическими. *Плоским зеркалом называется гладкая отполированная поверхность,*

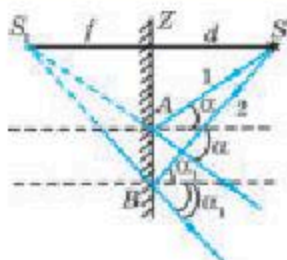


Рис. 25.1

покрытая отражающим слоем, с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности.

Построим изображение светящейся точки S в плоском зеркале Z (рис. 25.1). Направим на зеркало два луча 1 и 2. Они оба отражаются от зеркала, а нам кажется, что они выходят из точки S_1 , которая и будет изображением светящейся точки S .



Попробуйте самостоятельно доказать, что расстояние от светящейся точки S до зеркала Z равно расстоянию от зеркала Z до изображения светящейся точки S_1 , т. е. докажете, что

$$d = -f. \quad (25.1)$$

Это *формула плоского зеркала*. Для вывода формулы плоского зеркала воспользуйтесь законами отражения света и знаниями по геометрии. Плоское зеркало дает мнимое изображение предмета, поэтому в формуле перед расстоянием от зеркала до изображения стоит знак “-”. Недостатком изображения в плоском зеркале является его зеркальная симметрия (рис. 25.2).

Плоское зеркало применяют для зеркального отсчета. Допустим, что нам необходимо измерить малую величину. Пусть луч света падает на зеркало под углом 90° (рис. 25.3), тогда отраженный луч пойдет в этом же направлении, но в обратную сторону. Если зеркало повернулось на угол φ , то луч отклонится на угол 2φ . Причем $\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{d}{l}$. Если угол очень мал, то зеркало помещают в тубус микроскопа.

Плоские зеркала устанавливают в *перископах* — оптических приборах, предназначенных для наблюдений из укрытий.

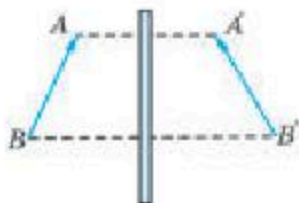


Рис. 25.2

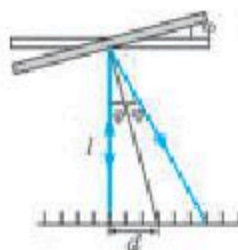


Рис. 25.3



1. Какое явление называется отражением света? Каким законам оно подчиняется?
2. Выведите законы отражения света.
3. Какие виды отражения вы знаете?
4. Какое зеркало называется плоским?
5. Выведите формулу плоского зеркала.
6. Какое изображение дает плоское зеркало?
7. Может ли плоское зеркало давать действительное изображение?
8. Карандаш находится на расстоянии 25 см от плоского зеркала. На каком расстоянии от карандаша окажется его изображение, если карандаш отодвинуть на 10 см от зеркала?
9. Как изменится расстояние между предметом и его изображением в плоском зеркале, если зеркало расположить там, где было мнимое изображение предмета?
10. Как устроен зеркальный перископ? Начертите схему его устройства и ход лучей в нем.
11. Сколько изображений мы получим, если два плоских зеркала образуют двугранный угол 60° , 30° ?
12. Сколько изображений дадут два взаимно параллельных плоских зеркала?

Примеры решения задач

1. Предмет AB и зеркало CD расположены так, как показано на рисунке 25.4, а. Постройте изображение предмета AB в зеркале. Где следует расположить глаз, чтобы увидеть изображение всего предмета?

Решение. Лучи, исходящие из точки A , после отражения от зеркала будут распространяться внутри полосы, ограниченной прямыми CC_1 и DD_1 (рис. 25.4, б). Лучи, исходящие из точки B , будут распространяться внутри полосы, ограниченной прямыми CC_2 и DD_2 (это легко определить, если воспользоваться законами отражения). Только между прямыми CC_1 и DD_2 в каждой точке пространства будут встречаться лучи, исходящие от всех точек предмета. Глаз может видеть изображение всего предмета в случае, если он будет находиться внутри полосы, заключенной между лучами CC_1 и DD_2 . Из этой задачи следует другая частная задача: где нужно расположить плоское зеркало, чтобы человек увидел себя в полный рост?

2. Солнечные лучи, отражаясь от горизонтально лежащего зеркала, падают на вертикальный экран. На горизонтальном зеркале расположен плоский предмет. Опишите характер тени на вертикальном экране.

Решение. Обозначим высоту предмета через h , а через L — расстояние от предмета до экрана. Пусть свет падает на зеркало под углом α . Рассмотрим два случая.

1) $l > 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Тогда на экране будут видны две тени, прямая и перевернутая, сложенные основаниями (рис. 25.5). Общая длина тени

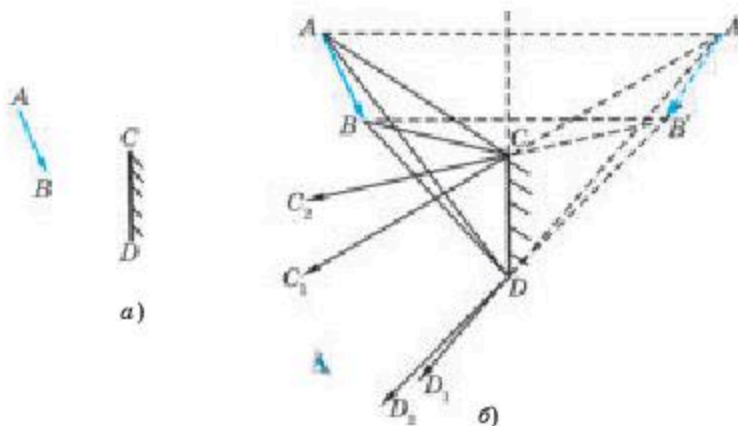


Рис. 25.4

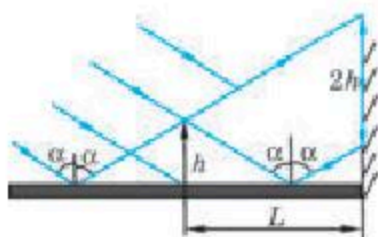


Рис. 25.5

будет равна $2h$. Тень освещена солнечными лучами и выделяется по контрасту с остальными участками экрана, освещенными и прямыми, и отраженными лучами.

2) $l < 2h \cdot \operatorname{tg}\alpha$. В этом случае длина тени будет меньше $2h$, причем на ней будут участки, не освещенные ни прямыми, ни отраженными лучами (докажите самостоятельно).



Упражнение 11

1. При каком условии плоское зеркало дает действительное изображение?
2. На какой угол повернется луч, отраженный от плоского зеркала, при повороте зеркала на 20° ?

Ответ: на 40° .

3. Сколько изображений светящейся точки мы увидим в системе из двух плоских зеркал, образующих двугранный угол 60° ? Приведите графическое доказательство.

Ответ: 5.

4. Высота Солнца составляет 50° . Как надо расположить плоское зеркало, чтобы: а) осветить дно колодца; б) направить солнечные лучи горизонтально?

Ответ: а) 70° ; б) 115° или 65° к горизонту.

5. Какую фотографию легче рассматривать: матовую или глянцевую? Почему?

§ 26. Явление преломления света



Ключевые понятия:

✓ преломление света

На этом уроке вы:

- научитесь выводить закон преломления света с помощью принципа Гюйгенса и применять его при решении задач.



Преломление света. Как нам уже известно, *явлением преломления света называется явление изменения направления распространения световых лучей на границе двух сред, когда лучи проходят из одной среды в другую.* Оно наблюдается из-за того, что скорость распространения света в разных средах различна.

Закон преломления, открытый экспериментально, гласит:

1) луч падающий 1, луч преломленный 3 и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости (рис. 26.1);

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

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (26.1)$$

Докажем вторую часть закона. Для этого обратимся к рисунку 26.1. На этом рисунке 1 и 3 — это два падающих параллельных луча, а 1' и 3' — это два преломленных луча, которые тоже параллельны друг другу. В первой среде свет распространяется со скоростью v_1 , а во второй — со скоростью v_2 . Пусть в тот момент, когда луч 1 пришел в точку А, луч 3 находился в точке Е. Пока луч 1', двигаясь во второй среде, дойдет до точки D, луч 3, двигаясь в первой среде, доберется до точки В. С учетом этого можно вычислить расстояния AD и EB: $AD = v_2 \tau$, а $EB = v_1 \tau$. Пусть α — это угол падения луча света, а β — угол преломления света. Тогда $\angle ABD = \beta$, а $\angle BAE = \alpha$ — углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Из прямоугольного треугольника ABE имеем, что

$$\frac{EB}{AB} = \sin \alpha. \quad (26.2)$$

Из прямоугольного треугольника ABD получим:

$$\frac{AD}{AB} = \sin \beta. \quad (26.3)$$

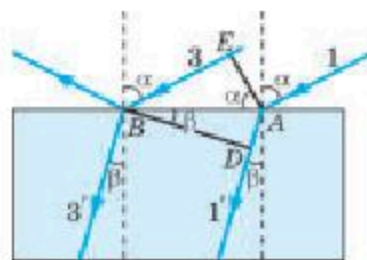


Рис. 26.1

Разделив равенство (26.2) на равенство (26.3), получим: $\frac{EB}{AD} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$.
 А поскольку $AD = v_2 \tau$, а $EB = v_1 \tau$, то получим:

$$\frac{v_1 \tau}{v_2 \tau} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \text{ или } \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (26.4)$$

А так как скорости распространения света в средах неизменны, то будет оставаться постоянным и их отношение, т. е.

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, v_2 = \frac{c}{n_2}, \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}. \quad (26.5)$$

Физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в первой среде больше скорости распространения света во второй среде, называется относительным показателем преломления. С учетом этого формула (26.4) переписется так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{2,1}. \quad (26.6)$$

Это и есть *второй закон преломления света*. Анализируя формулу, мы выясним, что с ростом угла падения света будет увеличиваться и угол преломления.

Абсолютным показателем преломления данной среды называется физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в вакууме больше скорости распространения света в данной среде, т. е.

$$n = \frac{c}{v}. \quad (26.7)$$

Так как $c > v$, то $n > 1$. Так, например, для воды $n = 1,33$, для стекла $1,5 < n < 1,8$, для воздуха $n = 1,0003$, для алмаза $n = 2,45$. *Среда с большим абсолютным показателем преломления называется оптически более плотной средой.*

Опираясь на формулу (26.7) докажете, что относительный и абсолютный показатели преломления связаны соотношением $n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$.

Тогда закон преломления света можно записать следующим образом: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$, или $n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$, т. е. *произведение абсолютного показателя преломления среды на синус угла падения светового луча остается постоянной величиной:*

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta. \quad (26.8)$$

Она называется *оптическим инвариантом*.

При переходе светового луча из одной среды в другую происходит отклонение светового луча от первоначального направления, причем

отклонение будет тем больше, чем больше угол падения луча света.

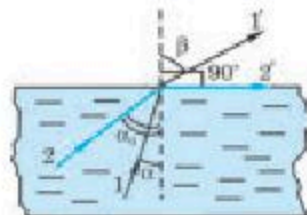


Рис. 26.2

Полное внутреннее отражение света. Рассмотрим переход света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду. В этом случае угол падения луча будет меньше угла преломления. Мы уже знаем, что с ростом угла падения луча растет и угол преломления. Тогда может наступить такой момент, что при некотором угле падения α_0 (рис. 26.2) угол преломления станет равным 90° , и луч света пойдет по границе раздела двух сред. А это означает, что во вторую среду свет не проходит. Такое явление называется *полным внутренним отражением*. При углах падения больших, чем α_0 , лучи света и подавно не выйдут из первой (более плотной) среды. Для случая полного внутреннего отражения закон преломления записывается следующим образом: $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ или $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$. Для воздуха и вакуума $n_2 = 1$, и поэтому последняя формула при переходе света из какой-либо среды в воздух или вакуум будет выглядеть так: $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1}$. По этой формуле легко рассчитать величину абсолютного показателя преломления среды:

$$n_1 = \frac{1}{\sin \alpha_0}.$$

Призма. Явление отражения и преломления света применяется во многих оптических приборах. Одним из таких приборов является призма.

Призма — это прозрачное тело, ограниченное двумя пересекающимися плоскостями. Угол, образованный пересекающимися плоскостями, называется преломляющим углом призмы, а пересекающиеся плоскости — преломляющими гранями. Линии пересечения плоскостей называются преломляющими ребрами. Плоскость призмы, расположенная напротив преломляющего угла, называется основанием призмы.

Рассмотрим ход лучей в призме. Обратимся к рисунку 26.3, на котором изображен ход лучей в призме в соответствии с законами отражения и преломления света. Пусть на преломляющую грань призмы KO падает луч света под углом α_1 . После преломления в призме луч, изменив направление своего распространения, пойдет под β_1 . Пусть направление распространения луча света (прямая AB) после преломления будет параллельно основанию призмы KL . Восстановив перпендикуляр ко второй пре-

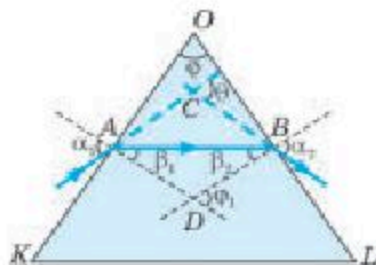


Рис. 26.3

ломляющей грани, мы получим, что на нее луч света будет падать под углом β_2 , а выйдет из призмы под углом α_2 , который будет являться углом преломления луча света AB . Точка C — это точка пересечения продолжений падающего и преломленного лучей, а точка D — это точка пересечения нормалей к преломляющим ребрам призмы. Угол φ — это *преломляющий угол призмы*. Найдем угол θ — это угол отклонения луча света от первоначального направления. Под *углом отклонения призмы* понимают угол, составленный направлениями вошедшего и вышедшего лучей. Для треугольника ABC угол θ является внешним углом, а внешний угол равен сумме внутренних углов, не смежных с ним. Следовательно, $\theta = \angle CAB + \angle CBA = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2)$, или $\theta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2)$. Для треугольника ABD угол φ_1 — тоже внешний, т. е. $\varphi_1 = \beta_1 + \beta_2$, но $\varphi_1 = \varphi$ как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Тогда получим:

$$\theta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi.$$

Проведя ряд несложных расчетов с использованием тригонометрических преобразований и законов преломления света, можно доказать, что угол отклонения призмы будет минимальным при следующих условиях: $\alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta_1 = \beta_2$. Если продолжить расчеты, то можно получить *формулу тонкой призмы*:

$$\theta_{\min} = (n - 1) \varphi.$$

Условие максимального отклонения лучей после преломления в призме таково:

$$\theta_{\max} = \alpha_1 + \frac{\pi}{2} - \varphi.$$

При этом вышедший луч будет скользить по преломляющей грани.



1. Какое явление называется преломлением света? Почему оно наблюдается?
2. Сформулируйте и выведите законы преломления света.
3. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления? Как они связаны между собой?
4. Какое явление называется полным внутренним отражением света? Когда оно наблюдается?
5. Какие явления мы наблюдаем при прохождении света через плоскопараллельную пластинку?
6. Что такое истинная и кажущаяся глубина водоема? Почему они не равны?
7. Дайте определение основных характеристик призмы.
8. Как определить ход лучей в призме?

Примеры решения задач

1. Под каким углом должен упасть луч света на поверхность стекла, чтобы угол преломления оказался в два раза меньше угла падения? Показатель преломления стекла 1,5.

Дано:

$$\beta = \frac{\alpha}{2}$$

$$n = 1,5$$

$$\alpha - ?$$

$$\alpha - ?$$

Решение. Воспользуемся законом преломления:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (26.9).$$

Так как $\beta = \frac{\alpha}{2}$, то $\alpha = 2\beta$, и тогда выражение (26.10)

перепишется так: $\frac{\sin 2\beta}{\sin \beta} = n.$

Из тригонометрии нам известно, что $\sin 2\beta = 2\sin \beta \cdot \cos \beta$. С учетом этого получим: $\frac{2\sin \beta \cdot \cos \beta}{\sin \beta} = n$ или $\cos \beta = \frac{n}{2}$. Мы знаем, что $\sin^2 \beta +$

$+\cos^2 \beta = 1$, т. е. $\sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{n^2}{4}} = \frac{\sqrt{4 - n^2}}{2}$. Подставив это

значение синуса угла преломления в (26.9), получим: $\frac{2\sin \alpha}{\sqrt{4 - n^2}} = n$. От-

сюда находим угол падения луча света: $\sin \alpha = \frac{n\sqrt{4 - n^2}}{2}$. Подставив

численные значения, получим: $\sin \alpha = \frac{1,5\sqrt{4 - 2,25}}{2} = 0,992$. По таблице Брадиса находим, что $\alpha = 83^\circ$.

$$(\alpha = 83^\circ)$$

2. На поверхности водоема глубиной $H = 2$ м плавает деревянный диск радиусом $r = 3$ м, который освещается рассеянным светом. Определите радиус тени и полутени от диска на дне водоема.

Дано:

$$H = 2 \text{ м}$$

$$r = 3 \text{ м}$$

$$n = 1,3$$

$$R_1 - ?$$

$$R_2 - ?$$

Решение. Так как на диск падает рассеянный свет, то угол падения света произвольный — от 0° до 90° . Область полной тени будет наблюдаться на дне при угле падения света, равном 90° . А максимальный радиус полутени R_2 тоже будет наблюдаться при угле падения 90° (рис. 26.4). Из закона преломления света для данного случая получим:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta} = n.$$

Отсюда $\sin \beta = \left(\frac{1}{n}\right)$. Из рисунка 26.4 видно, что $R_1 = r - x$, а $R_2 = r + x$ и $x = H \cdot \operatorname{tg} \beta$. Тогда $R_1 = r - H \cdot \operatorname{tg} \beta$ и $R_2 = r + H \cdot \operatorname{tg} \beta$. Так как

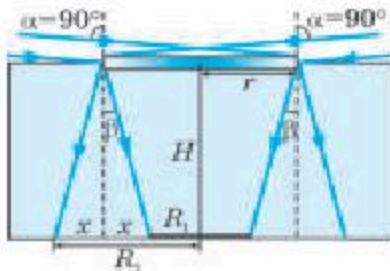


Рис. 26.4

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}},$$

то с учетом уравнения (26.1)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 \cdot n}{n \sqrt{n^2 - 1}} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

Тогда радиусы тени и полутени от диска на дне водоема будут равны:

$$R_1 = r - \frac{H}{\sqrt{n^2 - 1}} \text{ и } R_2 = r + \frac{H}{\sqrt{n^2 - 1}}. \text{ Произведем вычисления и получим:}$$

$$R_1 = 0,6 \text{ м и } R_2 = 5,4 \text{ м.}$$

$$(R_1 = 0,6 \text{ м; } R_2 = 5,4 \text{ м})$$



Упражнение 12

1. Абсолютные показатели алмаза и стекла соответственно равны 2,42 и 0,5. Каково отношение толщины этих веществ, если время распространения света в них одинаково?

Ответ: 0,62.

2. При переходе солнечных лучей из воздуха в стекло угол падения 60° , а угол преломления 30° . Найдите скорость распространения света в стекле и предельный угол полного внутреннего отражения.

Ответ: $1,73 \cdot 10^8$ м/с; 35° .

3. Палка с изломом посередине погружена в пруд так, что наблюдателю, находящемуся на берегу и смотрящему вдоль надводной части палки, она кажется прямой, составляющей угол 30° с горизонтом. Какой угол излома имеет палка? Показатель преломления воды $4/3$.

Ответ: 160° .

4. На дне стакана, заполненного водой на 10 см, лежит монета. На каком расстоянии от поверхности воды наблюдатель видит монету? Показатель преломления воды $4/3$.

Ответ: 7,5 см.

§ 27. Линзы. Формула тонкой линзы



Ключевые понятия:

- ✓ линза
- ✓ оптическая сила линзы

На этом уроке вы:

- научитесь строить изображение в линзах, применять формулу тонкой линзы при решении задач.



Во многих оптических приборах: телескопах, микроскопах, фотоаппаратах, проекционной аппаратуре, биноклях, очках, применяют *линзы* — прозрачные тела, ограниченные двумя сферическими поверхностями. Линзы делятся на *собирающие* и *рассеивающие*. Первые собирают проходящий сквозь них свет в одну точку, а вторые рассеивают его. У собирающих линз середина толще, чем края, а у рассеивающих, наоборот, середина тоньше краев.

Основные понятия и характеристики линзы. Рассмотрим линзу, изображенную на рисунке 27.1. Здесь точки O_1 и O_2 — центры кривизны сферических поверхностей, образовавших линзу; R_1 и R_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей. *Прямая, проходящая через центры кривизны сферических поверхностей, образовавших линзу, называется главной оптической осью линзы.* Точка O , расположенная внутри линзы на главной оптической оси линзы, в которой лучи не преломляются, называется *оптическим центром линзы*. Прямая линия KL , проходящая через оптический центр, но не через центры кривизны, называется *побочной осью*. Точки A и B пересечения главной оптической оси с поверхностями линз называются *вершинами линзы*. Расстояние AB между вершинами линзы называется *толщиной линзы*. Если толщина линзы соизмерима с радиусом кривизны сферических поверхностей, образовавших линзу, то линза называется *толстой*, если же она намного меньше его, то линза называется *тонкой*.

По форме поверхностей, образующих линзу, линзы делятся на *выпуклые* (плосковыпуклые, двояковыпуклые и вогнуто-выпуклые) и на *вогнутые* (плосковогнутые, двояковогнутые и выпукло-вогнутые).

Если направить на собирающую линзу пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то они соберутся в одной точке — главном фокусе F линзы (рис. 27.2). Эта точка находится на главной оптической оси линзы. У линзы два главных фокуса, расположенных по обе стороны линзы. Если же на линзу направить пучок лучей, идущих параллельно побочной оси (рис. 27.3), то они тоже соберутся в одной

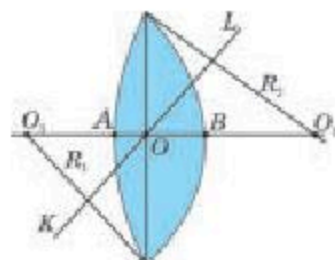


Рис. 27.1

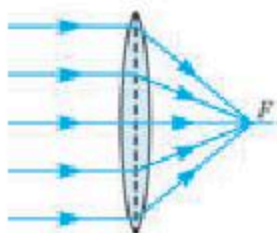


Рис. 27.2

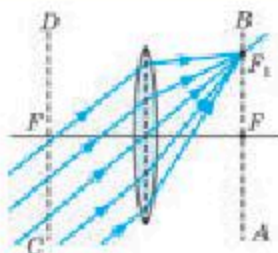


Рис. 27.3



Рис. 27.4

точке — побочном фокусе F_1 , который расположен в фокальной плоскости AB линзы. **Фокальной плоскостью линзы** называется плоскость, проведенная через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси линзы. Понятно, что фокальных плоскостей у линзы две (AB и CD), а побочных фокусов — бесконечное число.

На практике в основном используются тонкие линзы. Для удобства были введены следующие обозначения: значком \downarrow обозначается собирающая линза, а значком \uparrow — рассеивающая линза.

Формула тонкой линзы. Выведем формулу тонкой линзы. Для этого обратимся к рисунку 27.4. Здесь S — светящаяся точка; S_1 — изображение светящейся точки; SA — падающий луч; AS_1 — луч, прошедший через линзу, F — главный фокус линзы; BF — фокальная плоскость линзы; точка O — оптический центр линзы; OB — побочная ось линзы (она параллельна падающему лучу SA); точка B — побочный фокус линзы. Обозначим расстояние от предмета (светящейся точки) до оптического центра линзы SO буквой d , расстояние от оптического центра линзы до изображения предмета OS_1 буквой f , фокусное расстояние линзы OF буквой F и произведем следующие расчеты. Треугольники SAS_1 и OBS_1 подобны по третьему признаку подобия треугольников. В подобных треугольниках соответствующие стороны и отрезки сторон пропорциональны, следовательно, $\frac{SS_1}{OS_1} = \frac{SO}{OF}$ или с учетом введенных обозначений $\frac{d+f}{f} = \frac{d}{F}$. Преобразуем эту формулу: $\frac{d}{f} + 1 = \frac{d}{F}$. Теперь, разделив левую и правую части формулы на d , получим:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (27.1)$$

Эта формула называется **формулой тонкой линзы**. Кстати, вывести формулу тонкой линзы можно и другим способом.

Предложите свои способы вывода формулы тонкой линзы.

Рассмотрим особенности применения формулы. В зависимости от того, какое изображение дает линза (мнимое или действительное), и от того, какая это линза, мы можем получить следующие формы записи этой формулы.

1. *Линза собирающая дает действительное изображение.* Тогда $d > 0$ (положительно), $f > 0$ (положительно) и $F > 0$ (положительно). Формула тонкой линзы в этом случае будет выглядеть так:

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

2. *Линза собирающая, но дает мнимое изображение.* Тогда $d > 0$ (положительно), $f < 0$ (отрицательно) и $F > 0$ (положительно). Формула тонкой линзы в этом случае будет выглядеть так: $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.

3. *Линза рассеивающая.* Она всегда дает мнимое изображение. Тогда $d > 0$ (положительно), $f > 0$ (положительно) и $F < 0$ (отрицательно). Формула тонкой линзы в этом случае будет выглядеть так:

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

Оптическая сила линзы. Для того чтобы показать, как сильно “ломает” лучи линза, ввели особую физическую величину — *оптическую силу линзы D* . Под *оптической силой линзы* понимают величину, обратную главному заднему расстоянию или величину, обратную фокусному расстоянию линзы. Следовательно, *физический смысл оптической силы линзы состоит в том, что она характеризует степень преломления световых лучей после прохождения через линзу:*

$$D = \frac{1}{F}, \quad (27.2)$$

или

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Оптическая сила линзы измеряется в *диоптриях*: $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Построение изображения в линзах. Для построения изображения в линзах пользуются тремя замечательными лучами (рис. 27.5):

1. Луч, идущий параллельно главной оптической оси, после преломления проходит через фокус линзы.

2. Луч, идущий через оптический центр линзы, не испытывает преломления.

3. Луч, идущий через главный фокус линзы, после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси.

Собирающая линза может давать и действительное, и мнимое изображение предмета. Напоминаем, что *действительное изображение получается только тогда, когда пересекаются сами лучи, а мнимое — когда пересекаются не сами лучи, а их продолжения.*

Увеличение линзы. Линза может давать увеличенное и уменьшенное изображения предмета. Под *линейным увеличением линзы* понима-

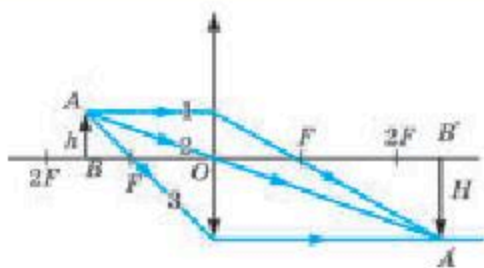


Рис. 27.5

ют физическую величину, определяемую отношением линейного размера изображения к линейному размеру предмета:

$$\Gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{H}{h}. \quad (27.3)$$

По рисунку 27.5 можно доказать, что

$$\Gamma = \frac{f}{d}. \quad (27.4)$$

Если построить изображение предмета в рассеивающей линзе, то можно увидеть, что она всегда дает уменьшенное мнимое, не перевернутое изображение. А собирающая линза в зависимости от того, где находится предмет, может давать и действительное, и мнимое изображения, увеличенное и уменьшенное изображения.



1. Что вы понимаете под линзой? Какие виды линз вы знаете?
2. Чем отличается рассеивающая линза от собирающей?
3. Что называется оптическим центром линзы? Что такое фокус линзы? Какая ось называется главной оптической осью линзы, а какая — побочной оптической осью?
4. Какой фокус у собирающей линзы, а какой — у рассеивающей?
5. Какая плоскость называется фокальной плоскостью?
6. Как с помощью побочного фокуса определить нахождение главного фокуса линзы?
7. Какое изображение называется действительным, а какое — мнимым?
8. Выведите формулу тонкой линзы и проанализируйте ее. Попробуйте применить ее самостоятельно для нескольких случаев расположения предмета и линзы: а) $d > 2F$; б) $d = 2F$; в) $d = F$; г) $d < F$. Рассмотрите рассеивающую и собирающую линзы.
9. Постройте изображение предмета, находящегося: а) на двойном фокусе линзы; б) между линзой и ее главным фокусом. Дайте характеристику получившихся изображений.
10. Как среда, окружающая линзу, влияет на ход лучей в ней?
11. Может ли одна и та же линза быть собирающей и рассеивающей? Если да, то приведите обоснование и примеры. Если нет, то поясните, почему.
12. Что называют оптической силой линзы?
13. Что называют линейным увеличением линзы? Что означает фраза: "Увеличение линзы равно 0,25"?
14. Получится ли полное изображение предмета в линзе, если половину линзы закрыть непрозрачной ширмой?
15. Как надо расположить две собирающие линзы, чтобы пучок параллельных лучей, пройдя через обе линзы, остался пучком параллельных лучей? Изобразите это на рисунке.

Примеры решения задач

1. На рисунке 27.6, а дан ход луча SA после его преломления в рассеивающей линзе. Найдите построением положение главных фокусов линзы. Покажите дальнейший ход луча CD .

Решение. Проведем побочную ось OO' (рис. 27.6, б), параллельную лучу SA . Эта ось пересекается с продолжением преломленного луча AB в точке K , лежащей в фокальной плоскости LM . Главным фокусом рассеивающей линзы будет точка пересечения фокальной плоскости с главной оптической осью линзы.

Для того чтобы найти дальнейший ход луча CD , проведем прямую OO' (рис. 27.6, в), проходящую через оптический центр линзы параллельно лучу CD . Точка пересечения этой прямой, которая является побочной осью линзы, с фокальной плоскостью LM будет побочным фокусом линзы N . Проведя прямую через точки N и D , получим дальнейший ход луча CD после преломления в линзе. Это будет прямая DE .

2. Тонкая линза с некоторым фокусным расстоянием F_1 создает прямое изображение предмета с увеличением $\Gamma_1 = \frac{2}{3}$. Каким будет увеличение линзы, если, не меняя расстояния между предметом и линзой, заменить эту линзу собирающей с такой же по модулю оптической силой? (рис. 27.7)

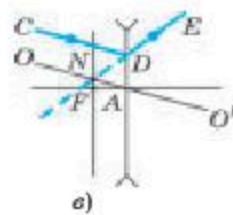
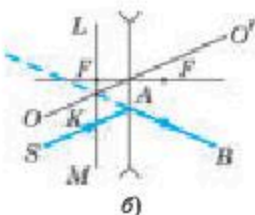
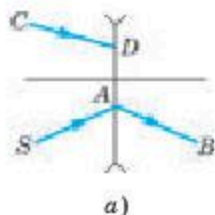


Рис. 27.6

Дано:

$$\Gamma_1 = \frac{2}{3}$$

$$\Gamma_2 = ?$$

Решение. Сначала мы имели дело с рассеивающей линзой, так как только с ее помощью можно получить прямое (неперевернутое) уменьшенное изображение предмета. Для рассеивающей линзы формула тонкой линзы имеет вид:

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_1}. \quad (27.5)$$

Так как линза рассеивающая, то перед фокусным расстоянием F линзы ставится знак “-”. Если изображение мнимое, то расстояние от изображения до линзы тоже берется со знаком “-”. Из этого следует, если увеличение линзы больше 0,5, то предмет находится между линзой и ее оптическим центром.

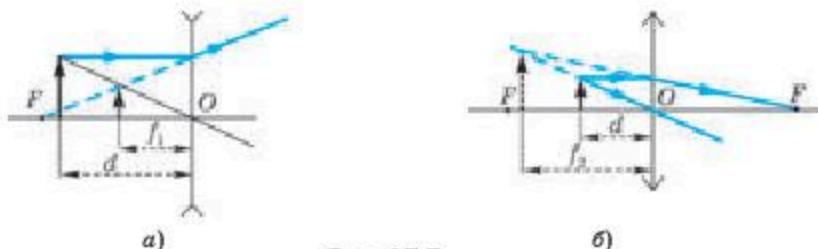


Рис. 27.7

После замены рассеивающей линзы на собирающую мы получим изображение предмета на расстоянии f_2 (рис. 27.6, б), и поэтому изменится увеличение линзы. Для этого случая формула тонкой линзы запишется так:

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2} \quad (27.6)$$

Знак “-” перед f_2 стоит потому, что изображение собирающая линза в этом случае ($d < F$) дает мнимое, увеличенное и прямое.

Увеличение линзы находим по формулам: $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d}$ в первом случае и $\Gamma_2 = \frac{f_2}{d}$ во втором. Отсюда следует, что $f_1 = \Gamma_1 d$ (27.7) и $f_2 = \Gamma_2 d$ (27.8).

По условию задачи $d_2 = -d_1$, т. е. $\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{F_1} - \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2}$. Следовательно, равны и правые части в формулах (27.5) и (27.6): $-\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2}$.

Отсюда получим, что

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{2}{d}. \quad (27.9)$$

Подставив в равенство (27.9) формулы (27.7) и (27.8), получим:

$$\frac{1}{\Gamma_1 d} + \frac{1}{\Gamma_2 d} = \frac{2}{d} \quad \text{или} \quad \Gamma_2 = \frac{\Gamma_1}{2\Gamma_1 - 1} = 2.$$

Ситуации, описанные в задаче, можно изобразить графически (см. рис. 27.7, а, б), используя для построения три замечательных луча.

$$(\Gamma_2 = 2)$$



Упражнение 13

1. Взяли два стекла от часов и склеили выпуклую линзу. Как будет действовать эта линза на пучок света в воде? Ответ поясните с помощью рисунка.

Ответ: рассеивает.

2. Когда с помощью собирающей линзы получают мнимое изображение предмета? Ответ поясните построением хода световых лучей в линзе.

Ответ: зависит от окружающей среды.

3. В каком случае высота изображения, полученного с помощью собирающей линзы, равна высоте предмета? Ответ поясните построением хода световых лучей в линзе.

Ответ: когда тело находится на расстоянии $2F$ от линзы.

4. Даны главная оптическая ось линзы MN , предмет AB и его изображение A_1B_1 (рис. 27.8). Определите центр линзы и ее фокусное расстояние.



Рис. 27.8

5. Даны главная оптическая ось линзы и ход одного из лучей (рис. 27.9). Определите положение фокуса линзы.

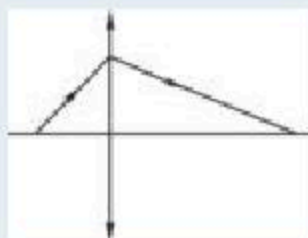


Рис. 27.9

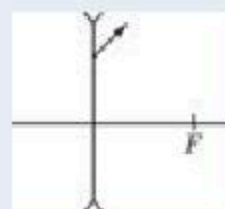
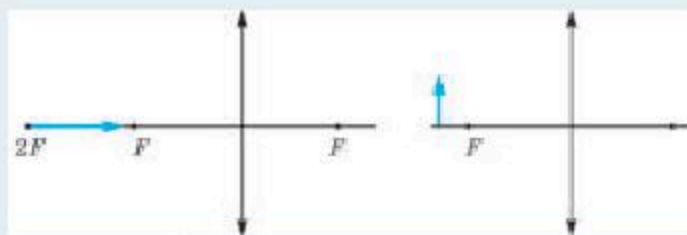


Рис. 27.10

6. На рисунке 27.10 дан луч, прошедший сквозь линзу с фокусным расстоянием F . Постройте ход луча до линзы.
 7. Постройте изображение данного предмета (рис. 27.11, а, б) в линзе. Какое это изображение?

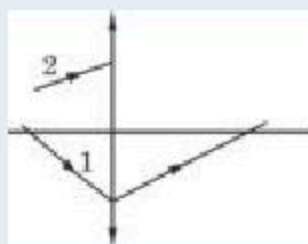


а)

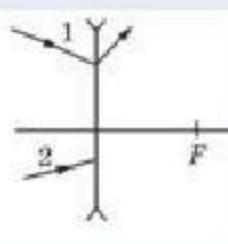
Рис. 27.11

б)

8. На рисунке 27.12, а, б дан ход луча 1 в линзах. Найдите построением ход луча 2.



а)



б)

Рис. 27.12

9. На экране с помощью тонкой линзы получено изображение предмета с увеличением 2. Предмет передвинули на 1 см. Для того чтобы получить четкое изображение, пришлось передвинуть экран. При этом увеличение оказалось равным 4. На какое расстояние передвинули экран?

Ответ: 8 см.

10. Предмет поместили на главной оптической оси собирающей линзы на расстоянии 20 см от нее и получили его действительное изображение на расстоянии $4F$, где F — фокусное расстояние линзы. Найдите оптическую силу линзы.

Ответ: 6,67 дптр.

11. Предмет поместили на главной оптической оси собирающей линзы на расстоянии $1,5F$ от нее. Изображение при этом получается на расстоянии 21 см от линзы. Определите фокусное расстояние линзы.

Ответ: 7 см.

12. Расстояние между точечным источником и экраном 3 м. Линза, помещенная между ними, дает четкое изображение предмета при двух его положениях, расстояние между которыми равно 1 м. Найдите фокусное расстояние линзы.

Ответ: 0,67 м

§ 28. Оптические приборы



Ключевые понятия:

- ✓ фотоаппарат
- ✓ глаз
- ✓ очки
- ✓ лупа
- ✓ микроскоп
- ✓ телескоп

На этом уроке вы:

- научитесь строить ход лучей в лупе, телескопе, микроскопе.



Законы геометрической оптики лежат в основе действия разнообразных оптических приборов, основной частью которых является некоторая оптическая система, которая формирует изображение предмета. В зависимости от назначения различают следующие оптические приборы: проекционная аппаратура, микроскопы, телескопы, фотоаппараты и др.

Проекционные оптические приборы. К проекционным приборам относятся оптические приборы, дающие на экране действительное, увеличенное изображение предмета. Различают три вида этих приборов: *диаскоп* (от лат. *диа* — “прозрачный”), *служащий для проектирования прозрачных предметов на экран*; *эпископ*, *проектирующий на экран непрозрачные предметы*, и *эпидиаскоп*, *проектирующий и прозрачные,*

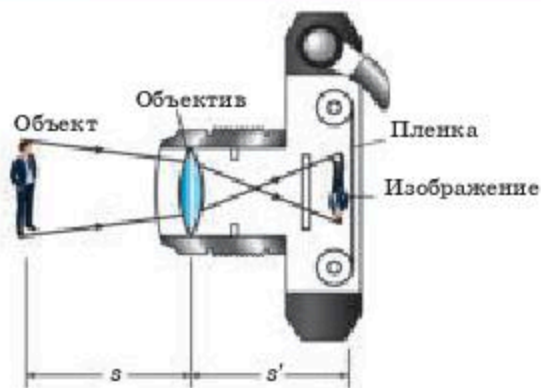


Рис. 28.1

и непрозрачные предметы. Во всех случаях предмет помещают между фокусом и двойным фокусом объектива. Чем ближе предмет к фокусу, тем большее увеличение дает проекционный аппарат. В диаскопе имеется мощный источник света, световой поток от которого направляется с помощью *конденсора* (системы линз) на *диапозитив* (прозрачный объект). Для увеличения светового потока иногда за источником света устанавливают вогнутое зеркало, которое отражает свет и направляет его обратно в систему линз. Конденсор устанавливают так, чтобы он давал изображение небольшого источника света на объектив, который в свою очередь проектирует диапозитив на экран.

Для демонстрации непрозрачных предметов, например рисунков в книге, их сильно освещают с помощью лучей, идущих от лампы, помещенной в фокус вогнутого зеркала. Далее световой поток, отражаясь от рисунка, попадает на плоское зеркало, а от него с помощью светосильного объектива на экран. Такой прибор называется *эпископом*.

Фотоаппарат. *Фотоаппарат* — это оптическое устройство с линзовой системой, с помощью которой получают изображение предмета на светочувствительной пленке, сохраняющей изображение. Основные части фотоаппарата: объектив, непрозрачная камера, фотопленка (рис. 28.1). *Объектив* представляет собой сложную систему линз, предназначенную для проектирования изображения на фотопленку. С помощью объектива исправляют такие оптические дефекты, как сферическую и хроматическую аберрации, астигматизм и др., присущие линзам. На плоскости фотопленки получается действительное, уменьшенное, перевернутое изображение предмета. Под действием световой энергии на фотопленке происходит разложение бромистого серебра и образуется негатив.

Сам предмет при фотографировании помещают за двойным фокусом, а его изображение получается между фокусом и двойным фокусом. Так

как расстояние от предмета до объектива может быть различным, то для получения резкого изображения необходимо изменять и расстояние между объективом и фотопленкой. Это делают, перемещая сам объектив. От величины световой энергии, попадающей на фотопленку, зависит качество снимка. Поэтому в фотоаппарате есть *специальный затвор, пропускающий свет лишь определенное время — время экспозиции*, которое зависит от качества пленки и от ее освещенности. Освещенность фотопленки зависит от светосилы объектива. *Светосила объектива — это величина, определяемая квадратом отношения диаметра объектива к его фокусному расстоянию.*

Диаметр действующей части объектива можно изменять с помощью диафрагмы. Уменьшая отверстие диафрагмы, можно добиться того, что изображения точек, находящихся на разных расстояниях от фотоаппарата, будут одинаково четкими. Возрастает, как говорят, глубина резкости.

Значение фотографии трудно переоценить. Современная фотография стала быстрой, цветной, стереоскопической. Она широко применяется во многих областях жизни: с ее помощью получают информацию и о космических объектах, и о микрочастицах, она фиксирует невидимые излучения. Нас радует художественная фотография. Фотокорреспонденты дают более полный отчет о событиях, происходящих вокруг нас.

Глаз. Глаз представляет собой “живой” оптический прибор, позволяющий воспринимать окружающий мир как человеку, так и животным. Глаз дает уменьшенное, действительное, перевернутое изображение предмета на сетчатке глазного яблока.

Структура глаза изображена на рисунке 28.2.

1. *Склера* — внешняя оболочка глазного яблока.

2. *Роговица* — передняя прозрачная часть склеры (ее показатель преломления $n = 1,38$).

3. *Сосудистая оболочка*, состоящая из кровеносных сосудов, питающих глаз. Она прилегает к склере с внутренней стороны.

4. *Радужная оболочка* — передняя часть сосудистой оболочки. У разных людей цвет радужной оболочки разный.

5. *Зрачок* — отверстие в середине радужной оболочки, сквозь которое проходит свет. Диаметр зрачка рефлекторно изменяется от 2 до 8 мм в зависимости от освещенности.

6. *Хрусталик* — прозрачное, упругое, слоистое тело, похожее на двояковыпуклую линзу, проектирующую изображение на сетчатку глазного яблока. Это становится возможным,

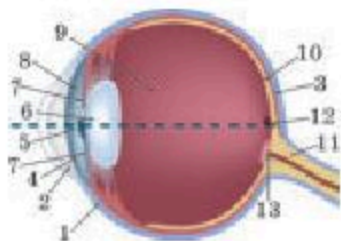


Рис. 28.2

так как кривизна хрусталика может изменяться под воздействием мышц, облегающих его со всех сторон, что приводит к тому, что изображения предметов, лежащих на различных расстояниях, проектируются точно на поверхность чувствительного слоя сетчатки. Этот процесс называется *аккомодацией*. Расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего рассматривать детали предмета, называется *расстоянием наилучшего зрения*. Для нормального глаза это расстояние 25 см.

7. *Мышцы*, которые могут деформировать хрусталик, что приводит к изменению его радиуса кривизны. Кроме того, эти мышцы поворачивают глаз так, чтобы его ось была направлена на рассматриваемый предмет. Напряжения мышц правого и левого глаза различаются тем сильнее, чем ближе предмет. Изображения близкого предмета на сетчатках правого и левого глаза несколько отличаются друг от друга. Это дает человеку возможность оценивать расстояние до предмета или его частей, а также создает впечатление объемности наблюдаемых тел.

8. *Водянистая жидкость*.

9. *Стекловидное тело*, заполняющее полость глазного яблока, представляет собой студенистую жидкость.

10. *Сетчатка* покрывает все дно глазного яблока. Она состоит из разветвлений зрительного нерва.

11. *Зрительный нерв*, нервные окончания которого называются *колбочка* и *палочка*. Они представляют собой светочувствительные элементы.

12. *Желтое пятно* — место на сетчатке, наиболее чувствительное к свету.

13. *Слепое пятно* — место на сетчатке, куда входит зрительный нерв.

Глаз можно рассматривать как оптическую систему с переменным фокусным расстоянием и неизменным расстоянием до экрана (сетчатки). Свет проецируется на сетчатку, нервные окончания которой (палочки и колбочки) посылают импульс в центр зрения головного мозга. Этот процесс приводит к образованию зрительных образов. Глаз устроен так, что уничтожает хроматическую и сферическую аберрации. Первая уничтожается потому, что заднее фокусное расстояние хрусталика не равно переднему, а вторая из-за того, что строение глаза неоднородно (показатель преломления в центре глаза 1,41, а по его краям 1,38).

По своему устройству глаз сходен с фотоаппаратом. Роль объектива выполняет хрусталик совместно со стекловидным телом. Изображение получается на чувствительной поверхности сетчатки. Получение четкого изображения осуществляется путем аккомодации. Зрачок играет роль изменяющейся по размерам диафрагмы.

Очки. Глаз человека с нормальным зрением (расстояние наилучшего видения равно 25 см) проецирует изображение предмета на сетчатку. У некоторых же людей глаза в ненапряженном состоянии проецируют

изображение не на сетчатку, а перед ней (рис. 28.3, а). Такие люди обладают дефектом зрения, называемым *близорукостью*. Близорукий человек отчетливо видит предметы, начиная с определенного расстояния. Он хорошо различает близкие предметы, но плохо — удаленные от него. Для исправления этого дефекта применяют очки с рассеивающими линзами или, как говорят, минусовыми (рис. 28.3, б).

Если же глаз дает изображение предмета за сетчаткой (рис. 28.4), то дефект называется *дальнозоркостью*. Люди с этим дефектом хотя и видят далекие предметы, но не отчетливо, слабо различая их подробности. Близкие же предметы дальнорукые люди видят плохо, расплывчато. У них ближний предел аккомодации наблюдается при расстояниях до предмета, больших 25 см. Дальнорукость исправляют ношением очков с собирающими линзами (рис. 28.4, а, б).

Лупа. Для того чтобы различить мелкие детали рассматриваемого предмета, угол зрения должен быть большим. Увеличение угла зрения можно достигнуть приближением предмета к глазу, что обеспечивается с помощью оптических приборов. Большему углу зрения соответствует и большее изображение на сетчатке глаза. При малых же углах отношение размеров изображений приблизительно равно отношению углов зрения. *Отношение угла зрения при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения при наблюдении невооруженным глазом называется угловым увеличением прибора:* $\Gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0}$. Угол зрения, под которым предмет виден невооруженным глазом, равен $\varphi_0 = \frac{h}{d_0}$, где $d_0 = 25$ см — расстояние наилучшего видения; h — линейный размер предмета.

Простейший прибор, позволяющий рассматривать мелкие предметы, представляет собой собирающую короткофокусную линзу ($F \approx 10$ см). Эту линзу называют *лупой*. Лупу, как правило, помещают близко к глазу, а рассматриваемый предмет располагают в ее фокальной пло-

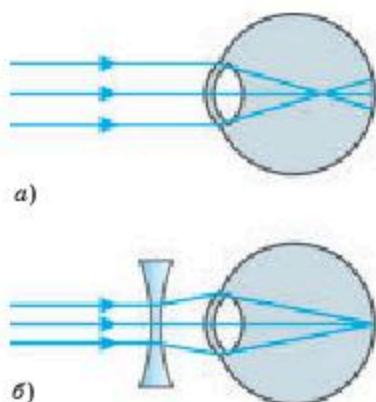


Рис. 28.3

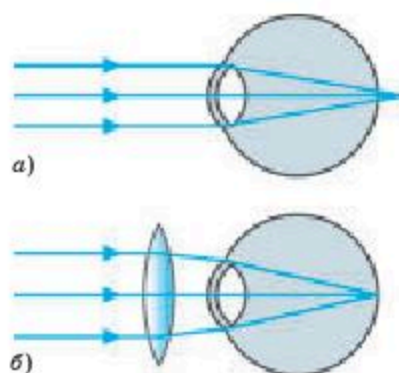


Рис. 28.4

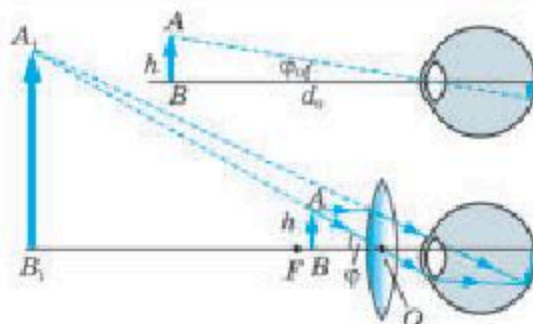


Рис. 28.5

скости (рис. 28.5). При этом изображение на сетчатке получается без напряжения глаза. В лупу предмет виден под углом $\varphi = \frac{h}{F}$.

Найдем угловое увеличение лупы $\Gamma = \frac{h/F}{h/d_0} = \frac{d_0}{F}$. Увеличение, даваемое лупой, ограничено ее размерами. Нам известно, что линза с большой оптической силой — сильно выпуклая линза. Из-за этого размеры лупы приходится уменьшать, что ограничивает поле зрения и затрудняет пользование лупой. Именно поэтому лупы с увеличением более 40 не применяются.

Лупами пользуются часовые мастера, геологи, ботаники, криминалисты, филателисты.

Микроскоп. Для рассматривания совсем маленьких предметов используют *микроскоп* (рис. 28.6). Простейший микроскоп представляет собой комбинацию двух линз (рис. 28.7). Собирающая длиннофокусная линза, обращенная к предмету h , называется *объективом*. Она дает действительное, увеличенное изображение предмета H . Это изображение рассматривается через другую собирающую короткофокусную линзу (лупу), которую называют *окулярюм*. Рассматриваемый предмет располагается между фокусом объектива F_1 ближе к фокусу. Тогда объектив даст увеличенное, действительное изображение предмета, которое получается за объективом вблизи фокуса окуляра H .

Увеличение микроскопа (Γ) называется *величина, определяемая отношением угла зрения φ , под которым виден предмет при наблюдении через микроскоп, к углу зрения φ_0 при наблюдении невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения.*

Так как $\varphi_0 = \frac{h}{d_0}$, а $\varphi = \frac{H}{F_2}$, то угловое увеличение микроскопа будет равно:

$$\Gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{\frac{H}{F_2}}{\frac{h}{d_0}} = \frac{Hd_0}{F_2 h}, \quad (28.1)$$



Рис. 28.6

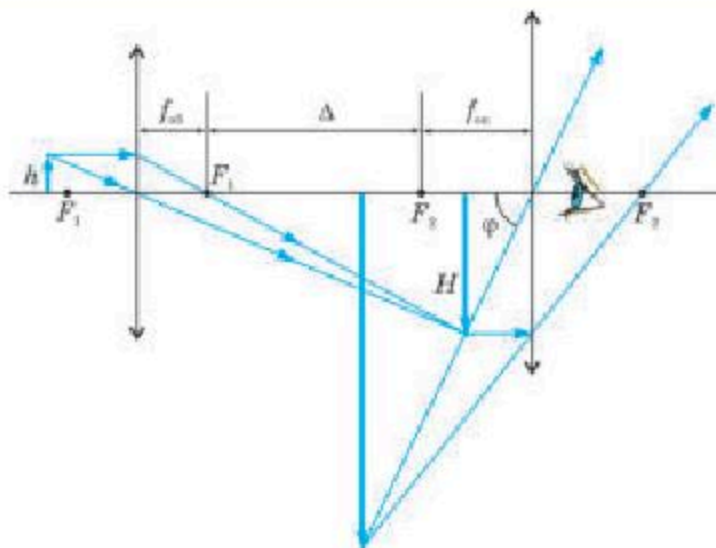


Рис. 28.7

где h — линейный размер предмета; H — линейный размер изображения, даваемого объективом; F_2 — фокусное расстояние окуляра; d_0 — расстояние наилучшего видения. Линейный размер первого изображения предмета найдем, исходя из того, что расстояние от первого изображения до фокуса объектива примерно совпадает с расстоянием между фокусами объектива и окуляра, т. е. $\Delta \approx \Delta + F_1$, так как $F_1 \ll \Delta$. Тогда $\frac{H}{h} = \frac{\Delta}{F_1}$, где F_1 — фокусное расстояние объектива. Расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра Δ называется *оптической длиной тубуса* микроскопа. Подставим это в формулу (28.1) и получим

$$\Gamma = \frac{d_0 \Delta}{F_1 \cdot F_2}. \quad (28.2)$$

Современные оптические микроскопы дают увеличение в 2—3 тысячи раз.

Кроме оптических приборов, позволяющих рассматривать мелкие предметы, существуют и другие оптические приборы, с помощью которых можно рассматривать предметы, расположенные на дальнем расстоянии. К ним относятся телескопы, зрительные трубы, бинокли и т. д. Первая в мире зрительная труба была изготовлена Г. Галилеем в 1609 г. С помощью объектива зрительной трубы получают изображение предмета вблизи глаза, которое затем рассматривается в окуляр, как в лупу.

Телескоп — это оптический прибор для наблюдения небесных тел (планет, звезд, комет и т. д.). Телескопы разделяются на линзовые (*рефракторные*, от лат. *refractus* — “преломлять”) и зеркальные (*рефлек-*

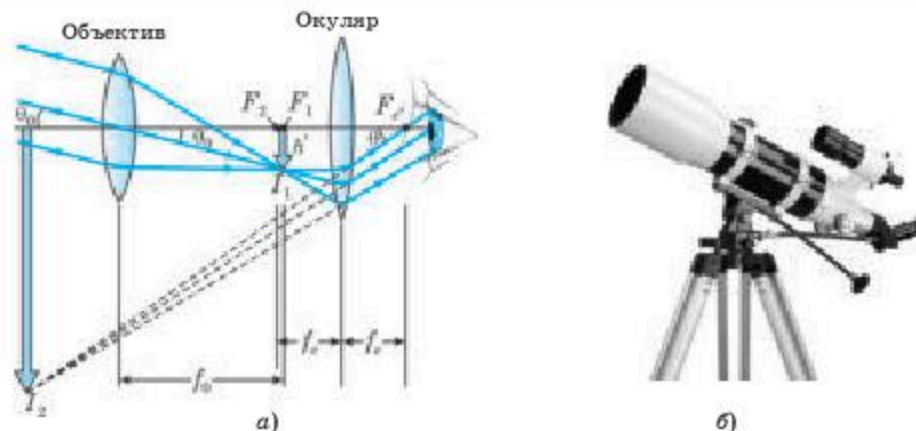


Рис. 28.8

торные, от лат. *reflectere* — “отражать”). Первый зеркальный телескоп создал И.Ньютон в 1671—1672 гг. В телескопе-рефлекторе объективом служит параболическое зеркало большого диаметра. Так как зеркала лишены хроматической аберрации, то телескопы-рефлекторы имеют преимущество перед телескопами-рефракторами. Кроме того, изготовить зеркало большого диаметра гораздо проще, чем линзу. Поэтому современные большие телескопы являются рефлекторами.

Крупнейший в мире телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 6 м был изготовлен в СССР и установлен на Северном Кавказе, а крупнейший в мире телескоп-рефрактор с объективом диаметром 1,02 м изготовлен и установлен в США. Увеличение телескопов превышает 500 за счет большого фокусного расстояния объектива. С помощью телескопов можно различать предметы на Луне размером менее 1 м, а на Марсе — предметы размером около 100 м. Ход лучей в рефракторном телескопе изображен на рис. 28.8, а, а его внешний вид — на рис. 28.8, б.

Самое важное в главе 6

В *геометрической оптике*, которая изучает законы распространения света, есть четыре закона:

- **Закон прямолинейного распространения света:** луч света в однородной среде распространяется прямолинейно.
- **Закон независимого распространения света:** световые лучи, встречаясь, не оказывают влияния на дальнейшее распространение друг друга.
- **Закон отражения света:** 1) луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) угол падения α равен углу отражения γ .
- **Закон преломления света:** 1) луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе

раздела двух сред, лежат в одной плоскости; 2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называется *относительным показателем преломления первой среды относительно второй*: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$.

На явлении отражения и его законах работают многие оптические приборы, в том числе и плоские, и сферические зеркала.

Во многих оптических приборах используется *линза* — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. *Формула тонкой линзы* $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ позволяет найти положение изображения предмета, которое дает линза.

Раздел IV. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Глава 7. АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

§ 29. Единство корпускулярно-волновой природы света



Ключевые понятия:

- ✓ **корпускула**
- ✓ **двойственность свойств электромагнитного излучения**
- ✓ **флуктуации**

На этом уроке вы:

- познакомитесь с двойственной природой электромагнитного излучения.



Волновая природа света. Вопрос о том, что представляет собой свет, занимал умы ученых со времен античности. До XIX века свет рассматривался как поток быстро движущихся частиц-корпускул. Сторонником этой точки зрения был и И. Ньютон. Однако в XIX века были открыты такие явления, как интерференция, дифракция света и т. д., в которых ярко проявляются его волновые свойства. После работ Юнга и Френеля подводится твердая экспериментальная основа под волновую теорию света, и из двух альтернативных теорий — корпускулярной и волновой — господствующей становится волновая. И наконец, результаты работ Максвелла приводят к окончательному выводу, что *свет — это электромагнитная волна*. Ярким экспериментальным доказательством волновой природы света служат такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация света, с которыми вы познакомились в предыдущих главах.

Корпускулярная природа света. Однако открытие и изучение закономерностей новых явлений, таких как тепловое излучение, фотоэффект, закономерностей линейчатых спектров, показало, что свет распространяется в виде потока частиц — фотонов. Распространение света в виде потока фотонов и квантовый характер взаимодействия излучения были подтверждены в ряде опытов.

Опыт Боте. Если свет представляет собой поток фотонов, взаимодействующих с регистрирующим прибором независимо друг от друга, то при регистрации очень слабых световых потоков должны наблюдаться заметные *флуктуации* (от лат. *fluctuatio* — “колебание”) их интенсивностей.

Такие флуктуации обуславливаются случайными отклонениями от среднего значения числа фотонов N , попадающих в прибор за секунду. Когда число N велико, флуктуации столь малы, что незаметны, а при малых N их можно обнаружить. Одним из первых такой опыт по наблюдению флуктуаций поставил в 1924 году немецкий физик В. Боте.

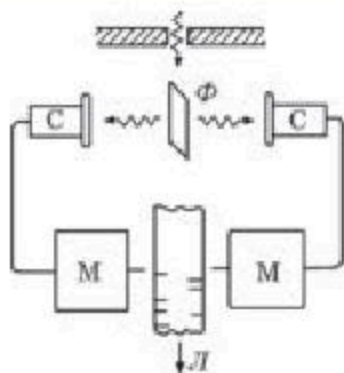


Рис. 29.1. Опыт Боте

В опыте тонкая металлическая фольга Φ помещалась между двумя газоразрядными счетчиками (рис. 29.1). Фольга Φ сбоку освещается слабым узким пучком жесткого рентгеновского излучения. Под воздействием облучения фольга начинает сама испускать рентгеновские лучи (рентгеновская флуоресценция), интенсивность которых очень мала, т. е. число фотонов, испускаемых ею в единицу времени, весьма невелико. При попадании рентгеновских лучей счетчики срабатывают и приводят в действие специальные механизмы M , делающие отметки

на равномерно движущейся ленте L . Если бы излучение распространялось в виде волны непрерывно и равномерно во все стороны, отметки по обе стороны ленты были бы одинаковы и расположились бы одна против другой. А на опыте отметки оказались расположенными совершенно беспорядочно. Это можно объяснить только тем, что из фольги вылетают отдельные фотоны независимо друг от друга то в одном, то в другом направлении.

Опыты Вавилова. В этих опытах визуально наблюдали периодически повторяющиеся вспышки слабого источника, средняя интенсивность которого совпадала с порогом зрительного ощущения наблюдателя.

Опыт основывался на том, что после достаточно длительного пребывания в темноте, человеческий глаз зрительно может воспринимать свет, только если его интенсивность выше некоторого порогового значения. Например, при длине волны 500 нм этот порог соответствует падению на глаз от 200 до 400 фотонов в секунду. Из периодически повторяющихся вспышек наблюдатель смог увидеть только часть, что доказывает наличие флуктуации интенсивности света: он видел только те вспышки, интенсивность которых (число фотонов в секунду) выше порогового значения.

Есть и другие опыты, убедительно доказывающие прерывистую, квантовую природу света.

Единство корпускулярно-волновой природы света. Таким образом, в начале XX-го века опять возникает вопрос: что же такое свет — волна или частица? Ученые-физики постепенно приходят к выводу об ошибочности такой постановки вопроса. *Свет одновременно обладает свойствами непрерывного электромагнитного излучения и свойствами дискретных фотонов.*

Первым эту двойственность свойств света понял А. Эйнштейн при изучении флуктуаций энергии абсолютно черного тела и флуктуаций светового давления. Он вывел формулы для вычисления этих величин, которые представляют собой сумму двух членов. Причем, один из них — “квантовый член” — соответствует представлению о свете как о пото-

ке фотонов, а другой — “волновой член” — описывает флуктуации в распространяющейся электромагнитной волне. При больших частотах основной вклад дает “квантовый член”, при малых частотах — “волновой”. Проанализировав закономерности известных оптических явлений, можно прийти к выводу, что с уменьшением длины волны (увеличением частоты) все более проявляются квантовые свойства света и наоборот. Двойственность корпускулярно-волновых свойств света и их взаимосвязь становится понятной, если применить к процессу распространения света статистический подход. По квантовым представлениям свет — это поток фотонов, в которых локализованы энергия, импульс и масса излучения. Взаимодействие фотонов с веществом при прохождении света через какую-нибудь оптическую систему (например, дифракционную решетку) приводит к перераспределению фотонов в пространстве. В результате на экране возникает дифракционная картина. Освещенность E экрана в данной точке пропорциональна суммарной энергии всех фотонов, а значит, числу фотонов n_0 , попавших в эту точку за единицу времени. Другими словами, величины E и n_0 пропорциональны вероятности попадания фотонов в рассматриваемую точку экрана. С волновой точки зрения освещенность пропорциональна интенсивности I , которая, в свою очередь, пропорциональна квадрату амплитуды волны A^2 , т. е. $E \sim A^2$. Сопоставляя два подхода, приходим к выводу: *квадрат амплитуды световой волны в какой-либо точке пространства определяет вероятность попадания фотонов в эту точку.*

Таким образом, корпускулярные и волновые свойства света не исключают друг друга, а взаимно дополняют. Корпускулярные свойства обусловлены тем, что энергия, импульс и масса излучения локализованы в дискретных частицах — фотонах, а волновые свойства обусловлены статистическими закономерностями распределения фотонов в пространстве. Эксперименты по дифракции дают основание считать, что волновые свойства присущи не только потоку фотонов, а также и каждому отдельному фотону. Это проявляется в том, что для фотона нельзя точно узнать, в какую именно точку экрана он попадает после прохождения дифракционной решетки. Можно определять лишь вероятности попадания каждого фотона в ту или иную точку экрана. Из сказанного ясно, что фотоны по своим свойствам в корне отличаются от световых корпускул Ньютона, которым приписывались свойства классических частиц.



1. Расскажите о развитии учения о природе света.
2. В каких явлениях подтверждается волновая природа света? Расскажите о них.
3. В каких явлениях проявляются квантовые свойства излучения?
4. Расскажите об опыте Боте.
5. Опишите опыт Вавилова.
6. Обоснуйте единство корпускулярно-волновых свойств света.

§ 30. Спектры. Спектральный анализ, спектральные аппараты



Ключевые понятия:

- ✓ спектр излучения
- ✓ спектр поглощения
- ✓ сплошной спектр
- ✓ линейчатый спектр
- ✓ полосатый спектр
- ✓ спектральные аппараты
- ✓ спектральный анализ

На этом уроке вы:

- познакомитесь со спектрами излучения и поглощения;
- изучите принцип действия спектральных аппаратов и области их применения.



Открытие и исследования основных закономерностей линейчатых спектров испускания послужило одним из важных экспериментальных фактов, послуживших рождению и развитию атомной физики. Рассмотрим виды спектров и их основные закономерности.

Спектры излучения. *Спектром излучения* (испускания) называется совокупность длин волн, присутствующих в излучении данного вещества.

Спектры излучения (испускания) можно разделить на три типа:

1. Сплошной (непрерывный) спектр.
2. Линейчатый (атомный) спектр.
3. Полосатый (молекулярный) спектр.

Сплошной спектр дает излучение нагретых до высоких температур твердых и жидких тел, а также газов при большом давлении. В нем спектральные цвета непрерывно переходят один в другой (рис. 30.1, а).



а)



б)



в)

Рис. 30.1. Спектры испускания: а) сплошной спектр; б) полосатый спектр; в) линейчатые спектры

Полосатый спектр представляет собой совокупность полос, четких с одного края и размытых с другого (рис. 30.1, б). Такой спектр создается молекулами вещества, слабо связанными друг с другом.

Линейчатый спектр — это оптический спектр, состоящий из отдельных четких ярких спектральных линий на черном фоне (рис. 30.1, в). Линейчатый спектр излучают разреженные газы или пары любого химического элемента, нагретые до высоких температур.

Спектры поглощения. *Спектром поглощения* называют совокупность длин волн, которые поглощаются данным веществом. Если белый свет от источника, дающего сплошной спектр, пропустить через пары

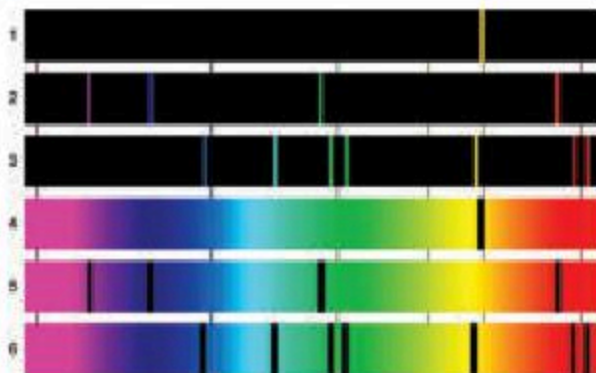


Рис. 30.2. Спектры испускания и поглощения паров натрия, водорода и гелия

какого-нибудь вещества, потом его разложить в спектр, то можно на фоне сплошного спектра увидеть темные линии в тех же местах, где находились бы линии спектра испускания паров этого же вещества. Такие спектры называются спектрами поглощения. На рисунке 30.2 представлены: первые три — это линейчатые спектры паров натрия, водорода и гелия, последующие три — это соответствующие этим веществам спектры поглощения.

Исследования показали, что каждому газу присущ свой линейчатый спектр излучения, отличный от спектра любого другого газа. Каждой линии в спектре соответствует определенная длина волны (*частота*). Поэтому можно сказать, что разреженные газы испускают электромагнитные волны, имеющие определенную длину волны (*частоту*). Почему так происходит? Почему спектр данного газа состоит из линий определенного дискретного набора частот $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$, а не каких-нибудь других частот? Вот важный вопрос, ответ на который надо было искать во внутренней структуре атомов. Ведь сильно нагретый газ находится в атомарном состоянии, поэтому излучение должно быть связано с процессами, происходящими внутри атомов.

Самым простым из всех является спектр водорода. В видимой области он состоит всего из четырех линий. Поэтому экспериментально наиболее полно изучали именно спектр водорода. В результате швейцарский ученый Бальмер в 1885 г. подобрал эмпирическую формулу, по которой можно было определить частоты (длины волн) всех линий в спектре водорода в видимой области:

$$\nu = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ или}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (30.1)$$

где $R' = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц; $R = 1,0968 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — постоянные Ридберга.

Это — формула Бальмера.

Спектральные линии, которые можно определить по формуле Бальмера, отличаются друг от друга значением n , и их совокупность называется серией Бальмера.

Кроме того, в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра водорода были обнаружены еще несколько серий. Все эти серии могут быть описаны одной формулой, которая называется *обобщенной формулой Бальмера*:

$$\nu = R' \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ или } \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (30.2)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$, $n = (m + 1), (m + 2), (m + 3), \dots$ и т. д.

Позже было установлено, что частоты излучения атомов любого вещества можно представить в виде формулы (31.2), т. е. в виде разности двух чисел. Если обозначить $T_1(m) = \frac{R}{m^2}$; $T_2(n) = \frac{R}{n^2}$, где функции $T_1(m)$ и $T_2(n)$ получили название термов, формулу Бальмера можно записать:

$$\nu = T_1(m) - T_2(n). \quad (30.3)$$

Таким образом, частоту излучения любых атомов можно представить в виде разности двух термов. Отсюда вывод: в строении атомов всех веществ имеют место общие закономерности.

Открытие Бальмера сыграло большую роль в дальнейшем развитии учения о строении атома. Спектральные закономерности излучения веществ были объяснены в рамках квантовой теории строения атома.

Спектральный анализ. То обстоятельство, что линейчатые спектры различных элементов имеют свойственные только этому элементу линии, послужило созданию и развитию метода спектрального анализа. Спектральный анализ — это метод определения химического состава вещества по его спектру излучения или поглощения. Основы метода были разработаны в 1859 г. немецкими учеными Г.Р. Кирхгофом и Р.В. Бунзенем. Как уже было сказано, у каждого газа свой, только ему присущий спектр излучения, который состоит из набора ярких линий определенных цветов. Цвет этих линий соответствует определенным длинам волн, они всегда находятся в одних и тех же местах спектра.

Учеными составлены таблицы с перечнем линий каждого газа и с указанием яркости каждой линии. Изучив спектр исследуемого газа (паров вещества), с помощью таких таблиц можно установить элементный состав этого вещества. Еще во второй половине 19 века методом спектрального анализа удалось исследовать состав Солнца. В 1868 году в спектре Солнца были обнаружены линии ранее неизвестного элемен-



Г. Р. Кирхгоф
(1824—1887)



Р. В. Бунзен
(1811—1899)

та. Так был открыт гелий (греч. helios “Солнце”). Только через 27 лет небольшое количество этого газа обнаружилось и в земной атмосфере. Сегодня известно, что гелий — второй по распространенности элемент во Вселенной.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Термин “спектр” впервые ввёл Ньютон в 1671—1672 годах. Он в 1666 г. установил, что при прохождении через стеклянную трехгранную призму полоска белого света разлагается в похожую на радугу многоцветную полосу. Для обозначения этой полосы он и ввел термин “спектр”. В своём труде “Оптика” (1704 г.) он опубликовал результаты своих опытов разложения с помощью призмы белого света на отдельные компоненты семи различных цветов, то есть получил спектр солнечного излучения и объяснил его природу. Ньютон показал, что цвет есть собственное свойство света, он не вносится призмой. Фактически Ньютон заложил основы оптической спектроскопии.

Спектральные аппараты. Для проведения спектрального анализа нужны приборы, дающие четкий спектр, т. е. приборы, хорошо разделяющие волны различной длины и не допускающие перекрытия отдельных участков спектра. Такие приборы называют *спектральными аппаратами*. Их основной частью является призма или дифракционная решетка, которая разлагает исследуемое излучение в спектр. На рисунке 30.3 представлен двухтрубный призмный *спектроскоп*.

Рассмотрим принцип действия спектрального аппарата.

Он содержит: коллиматор с щелевым устройством, призму и зрительную трубу (рис. 30.4). Исследуемое излучение по-



Рис. 30.3. Двухтрубный
спектроскоп

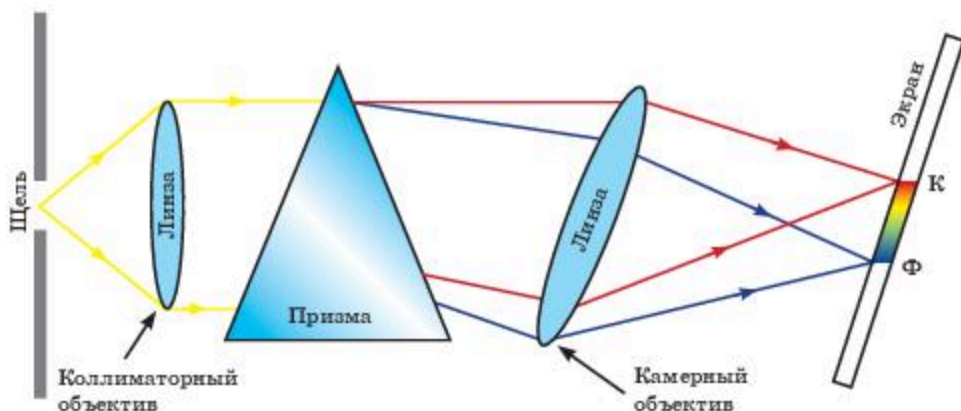


Рис. 30.4. Устройство призмного спектрографа

стует в коллиматор, который представляет собой трубу, на одном ее конце имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза. Щель расположена в фокальной плоскости линзы (см. рисунок). Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из нее параллельным пучком и падает на призму. Из призмы выходят параллельные пучки различных частот (цветов), не совпадающие по направлению. Они падают на вторую линзу. На фокусном расстоянии от этой линзы располагается экран — матовое стекло или фотопластинка. Линза проецирует на экране параллельные пучки лучей, вышедшие из нее, и на экране получается ряд изображений щели, соответствующие разным частотам. Эти изображения образуют спектр. Это *спектрограф*. Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для визуального наблюдения спектров, то прибор называется *спектроскопом* (рис. 30.3). В спектроскопе можно глазами увидеть, увеличив изображение с помощью линзы, а спектрограф позволяет делать фотографии спектра.

Применения спектрального анализа. В астрономии спектральный анализ дает возможность определять элементный состав небесных тел, находящихся от исследователя на расстоянии многих миллионов километров.

В геологии методом спектрального анализа определяют состав почв и минеральных находок.

В ювелирном деле это — установление пробы драгоценных металлов и определение состава сплавов; оценка чистоты драгоценных камней.

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслях — выявление загрязнений в нефтяном сырье и примесей в топливных продуктах.

В археологии и в области искусства методами спектрального анализа проводится экспертиза произведений искусства и археологических находок с целью экспертизы подлинности и датирования.

В отраслях сельского хозяйства и пищевой промышленности проводится микроэлементный анализ почвы, воды и продуктов; экспертиза на содержание тяжёлых металлов.



1. Какие виды спектров испускания знаете?
2. Что такое сплошной спектр? Полосатый? Опишите их. Назовите источники излучения сплошного и полосатого спектров.
3. Какой спектр называется линейчатым? Опишите его. Какие вещества излучают линейчатый спектр?
4. Напишите формулу Бальмера и объясните ее.
5. В чем суть метода спектрального анализа?
6. Объясните устройство призмного спектрального аппарата
7. Расскажите о применениях метода спектрального анализа

§31. Шкала электромагнитных излучений



Ключевые понятия:

- ✓ инфракрасное излучение
- ✓ ультрафиолетовое излучение
- ✓ рентгеновские лучи
- ✓ диапазон частот
- ✓ шкала электромагнитных излучений

На этом уроке вы:

- познакомитесь с природой возникновения и взаимодействия с веществом инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучений и их расположением в шкале электромагнитных волн.



Самым мощным естественным источником электромагнитного излучения на Земле является Солнце. Состав солнечного излучения вблизи земной поверхности сложен и зависит от высоты Солнца над горизонтом. В частности, согласно международной классификации, в интервале длин волн, прилегающих к оптическому диапазону, из состава солнечного излучения можно выделить инфракрасное и ультрафиолетовое излучения. Природа всех видов солнечного излучения одна, но их свойства существенно зависят от длины волны (частоты). В частности, чем меньше длина волны, тем более выражено биологическое действие данного излучения.

Инфракрасное излучение. Спектр солнечного излучения представляет собой смесь электромагнитных волн различных частот (длин волн). Инфракрасное излучение — это электромагнитные волны с диапазоном длин волн от 760 нм до (2600—3000) нм. Тепло, которое исходит от нагретых тел, это инфракрасное излучение с диапазоном длин волн от 1400 нм до 1 мм. Поэтому инфракрасное излучение называют также

тепловым излучением. Более половины солнечного спектра составляет инфракрасное излучение.

Весь диапазон инфракрасного излучения можно разделить условно на три области: ближняя: $\lambda = 0,74—2,5$ мкм; средняя: $\lambda = 2,5—50$ мкм; дальняя: $\lambda = 50—2000$ мкм.

При прохождении через вещество инфракрасное излучение усиливает колебательное движение атомов и молекул, что приводит к повышению температуры. Таким образом, инфракрасное излучение оказывает *тепловое воздействие*.

Фотохимическое действие инфракрасного излучения на живые организмы связано с поглощением энергии тканями и клетками, что ведет к активизации ферментных процессов и, как следствие, к ускорению обмена веществ, усилению процессов регенерации, иммуногенеза. При этом воздействие может быть как местным, так и общим. Местное воздействие на ткани приводит к ускорению биохимических реакций, иммунологических процессов, роста клеток и регенерации тканей, к усилению кровотока.

Общее действие сводится к противовоспалительным, болеутоляющим, общетонизирующим эффектам. Эти эффекты широко используются в физиотерапии для лечения заболеваний воспалительного характера с целью уменьшения болевого синдрома при ревматизме, остеохондрозе и т. д.

Инфракрасное излучение также существенно *влияет на климат и микроклимат*. Вследствие неравномерного нагревания земной поверхности и испарения воды происходит движение воздуха и водных масс, формирование циклонов и антициклонов, теплых и холодных течений, разнообразие климатических зон, погодных условий, которые опосредованно влияют на человека.

Отрицательное воздействие инфракрасного излучения на живые организмы связано с тепловым эффектом, что может привести к перегреванию организма с развитием теплового или солнечного удара.

Человек и многие теплокровные животные не могут видеть в инфракрасном диапазоне, но некоторые биологические виды все же могут воспринимать органами зрения инфракрасное излучение. Так, например, некоторые виды змей могут видеть в инфракрасном диапазоне и охотиться на теплокровную добычу ночью. У обыкновенных удавов эта способность имеется одновременно с нормальным зрением, в результате чего они способны видеть окружающее одновременно в двух диапазонах: нормальном видимом (как и большинство животных) и инфракрасном. Среди рыб способность видеть под водой в инфракрасном диапазоне имеется у пираний и золотой рыбки. Инфракрасным зрением обладают также комары, что позволяет им с большой точно-

стью ориентироваться на наиболее насыщенные кровеносными сосудами участки тела добычи.

Ультрафиолетовое излучение. *Ультрафиолетовое излучение* — это электромагнитные волны, длины волн которых лежат в диапазоне от 10 до 400 нм. На границе с земной атмосферой ультрафиолетовые лучи занимают около 5% спектра солнечного излучения, на поверхности земли доля ультрафиолетовых лучей составляет 1%, так как его коротковолновая часть (менее 300 нм) задерживается озоновым слоем Земли. Спектр ультрафиолетового излучения может быть поделён на следующие группы (стандарт ISO — международной организации по стандартизации): *ближний* или *ультрафиолет А*, это длинноволновой диапазон (400—300) нм; *средний*, иначе *ультрафиолет В* — средневолновой диапазон (300—200) нм; *дальний* или *ультрафиолет С* — коротковолновой (200—122) нм; *экстремальный* (121—10) нм.

Основной естественный источник ультрафиолетового излучения на Земле — Солнце. К искусственным источникам относятся: эритемные лампы, ртутно-кварцевые устройства, люминесцентные лампы, ртутно-ксеноновые лампы, газоразрядные устройства, аппараты для соляриев, и т. д. Другой тип искусственных источников — это лазеры.

Эритемные лампы (рис. 31.1, а) — это ртутные лампы низкого давления, колбы которых выполнены из специального стекла. На внутреннюю поверхность колбы наносится люминофор, обеспечивающий генерацию ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 280—380 нм, применяется в физиотерапии с лечебной и профилактической целью.

Ртутно-ксеноновые лампы (рис. 31.1, б), в них в колбе, заполненной ксеноном и парами ртути светится электрическая дуга. Они излучают голубовато-белый свет с сильным выходом ультрафиолета, используют их для физиотерапевтических целей, стерилизации и озонирования.



а)



б)



в)

Рис. 31.1. Искусственные источники УФ излучения:

- а) эритемные лампы;
- б) ртутно ксеноновые лампы;
- в) аппарат для соляриев

Солярий (рис. 31.1, в) — это специально оборудованная открытая площадка для проведения дозированных облучений. Излучение получают от специальных эритемных ультрафиолетовых ламп, в стекло колбы которых вводятся специальные добавки, не пропускающие опасную коротковолновую часть УФ спектра.

Лазерные источники ультрафиолетового излучения в основном применяются в медицинской технике, системах контроля и автоматике и для научных исследований, в биотехнологиях.

Рентгеновские лучи — это электромагнитное излучение, длина волн которого соответствует диапазону 10^{-7} до 10^{-12} м. Основным источником рентгеновского излучения является *рентгеновская трубка* (см. 9 класс). В ней между анодом и катодом создается высокое напряжение. Электроны, вылетающие из катода вследствие его нагрева, ускоряются в электрическом поле и резко тормозятся при соударении в веществе анода. При этом возникает *тормозное рентгеновское излучение*.

При дальнейшем увеличении напряжения между анодом и катодом энергия ускоренных полем электронов может возрасти настолько, что при соударении с веществом анода ускоренный электрон может вырвать электрон с внутренней оболочки атома. Тогда на фоне сплошного энергетического спектра тормозного излучения появляются резкие линии *характеристического излучения*. Частоты этих линий зависят от природы вещества анода, поэтому их и называли характеристическими.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Шкала электромагнитных излучений. Значения длин электромагнитных волн (частоты) лежат в очень широком диапазоне. Какой бы ни была длина волны (частота), природа всех электромагнитных волн и их свойства одинаковы, но они могут проявляться по-разному. В зависимости от длины волны (частоты) источники и приемники электромагнитных волн тоже могут быть разными. Поэтому электромагнитные волны классифицируются по длине волны (частоте) в так называемой шкале электромагнитных волн. Она представляет собой непрерывную последовательность длин волн (частот) электромагнитных волн, существующих в природе (рис. 31.2).

Как видно из рисунка, по шкале электромагнитных волн можно выделить следующие области: радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма излучение.

Электромагнитные излучения различных длин волн отличаются друг от друга также по тому, каким способом они получены (радиоволны, тепловое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение и т.д.). Различны и методы регистрации электромагнитных

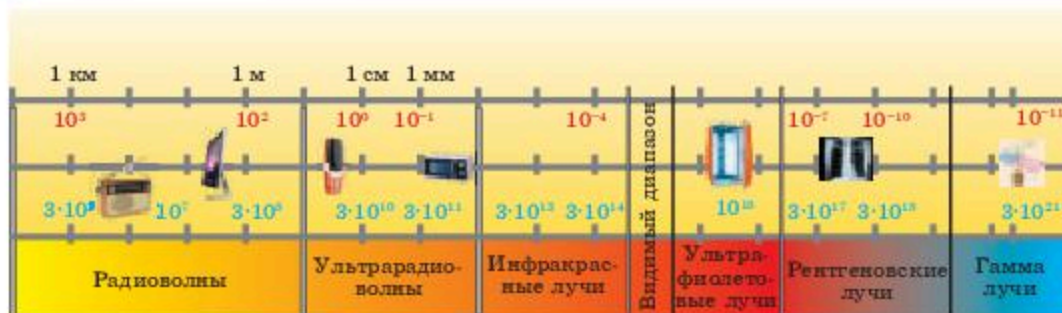


Рис. 31.2. Шкала электромагнитных излучений

волн разного диапазона. Источниками электромагнитного излучения являются и космические объекты, такие как звезды, черные дыры и прочее. Исследование этих излучений ведется с помощью искусственных спутников, космических кораблей. Такие исследования в основном направлены на изучение гамма и рентгеновских излучений, так как на поверхности Земли затруднены из-за того, что большая их часть задерживает земная атмосфера. Коротковолновое излучение (гамма лучи и рентгеновские излучения) слабо поглощается, поэтому у них высокая проникающая способность.



1. Чем отличаются друг от друга различные виды электромагнитных излучений?
2. Расскажите об основных свойствах инфракрасного излучения.
3. Что такое ультрафиолетовое излучение? Почему оно так называется?
4. Какие искусственные источники ультрафиолетового излучения вы знаете?
5. Что вы знаете о рентгеновских лучах?
6. Что такое шкала электромагнитных волн?



Изучите шкалу электромагнитных волн. Выделите их основные диапазоны, выясните, чем они (кроме длины волны) отличаются друг от друга? Рассмотрите области применения излучений различных диапазонов. Подготовьте презентацию.

§ 32. Фотозффект



Ключевые понятия:

- ✓ фотозффект
- ✓ задерживающее напряжение
- ✓ работа выхода
- ✓ фотоэлектроны
- ✓ красная граница фотозффекта
- ✓ многофотонный фотозффект

На этом уроке вы:

- изучите законы и природу фотозффекта;
- научитесь решать задачи с применением уравнения Эйнштейна.



Одним из явлений, открытых и изученных в конце XIX — начале 20 веков, послуживших толчком для создания и развития современной квантовой теории, является фотозффект.

Это вы знаете

Явление испускания электронов с поверхности вещества под действием излучений называется внешним фотоэлектрическим эфффектом (фотозффектом).

Фотозффект был открыт Г. Герцем в 1887 г. случайно — при исследовании электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом. Конструируя приемник электромагнитных волн (диполь Герца), он по-разному воздействовал на его шарики и промежутки между ними, чтобы облегчить прием сигнала. С этой целью он освещал их ультрафиолетовыми лучами и заметил, что при освещении отрицательно заряженного шарика разряд между шариками происходит при меньшем напряжении.

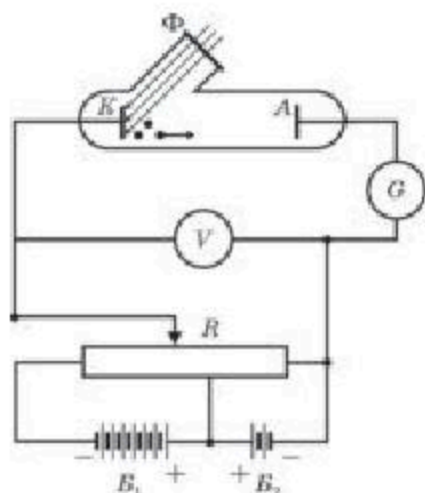


Рис. 32.1. Схема установки для исследования фотозффекта

Первые экспериментальные исследования фотозффекта были проведены русским ученым А. Г. Столетовым, немецким ученым Ф. Ленардом — учеником Г. Герца. Большой вклад внес Р. Милликен, которому в 1923 г. за исследования элементарных зарядов и фотозффекта была присуждена Нобелевская премия.

Для исследования фотозффекта можно использовать установку, схема которой представлена на рисунке 32.1. В эва-

куированный стеклянный баллон помещены два электрода — анод и катод.

При освещении катода ультрафиолетовыми лучами через кварцевое окошко, из него вырываются фотоэлектроны и под действием электрического поля устремляются к аноду.

Законы Столетова. В результате проведенных экспериментов к 1905 г. А.Г. Столетовым были установлены следующие законы фотоэффекта:

1. *Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения, а зависит только от его частоты.*

2. *Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения, но не зависит от частоты излучения.*

3. *Для каждого металла существует красная граница фотоэффекта — предельная наименьшая частота ν_{\min} (или наибольшая длина волны λ_{\max}), при которой еще возможен фотоэффект.*

Частоту $\nu_{\text{кр}}$ (соответствующую длине волны $\lambda_{\text{кр}}$) называют красной границей фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта Экспериментально наблюдаемые законы фотоэффекта удалось объяснить в 1905 г. А. Эйнштейну. Он развил идею М. Планка о квантах света и предположил, что энергия в пучке монохроматического света состоит из квантов энергии, каждая из которых равна $h\nu$. При падении на поверхность металла квант энергии может быть полностью поглощен электроном, тогда он приобретает дополнительную энергию $h\nu$. Часть этой энергии расходуется на то, чтобы вырвать электрон из металла, т. е. на работу выхода $A_{\text{вых}}$, а оставшаяся часть сообщается свободному электрону, вырванному из металла в виде максимальной кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (32.1)$$

Мы получили знаменитое *уравнение Эйнштейна для фотоэффекта*. По сути, это уравнение представляет собой закон сохранения энергии для рассматриваемого процесса. Надо заметить, что не все кванты энергии падающего излучения поглощаются электронами. Оказывается, из тысячи поглощенных квантов энергии в среднем лишь один вызывает фотоэффект, оставшаяся часть энергии излучения идет на нагревание металла.

Уравнение Эйнштейна объясняет все известные экспериментальные законы фотоэффекта. Так как работа выхода есть величина постоянная для данного металла, из уравнения (32.1) следует, что *кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты*. По Эйнштейну, каждый квант энергии поглощается целиком одним



А. Г. Столетов
1839—1896

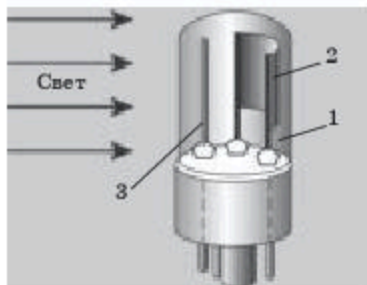


Рис. 32.2. Вакуумный фотозлемент

электроном, поэтому число вырванных фотоэлектронов (сила тока насыщения) должно быть пропорционально количеству квантов, падающих на поверхность металла, т. е. интенсивности излучения.

Из (32.1) также следует, что для наблюдения фотоэффекта необходимо, чтобы энергия кванта была хотя бы равна работе выхода, иначе не удастся вырвать электрон из металла, т. е. $h\nu_{\min} = A_{\text{вых}}$. Отсюда:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}. \quad (32.2)$$

Это и есть *красная граница фотоэффекта*.

Фотоэффект широко используется в различных областях науки и техники. Приборы, основанные на использовании фотоэффекта, называются *фотозлементами*. Простейшим из них является *вакуумный фотозлемент*. Он представляет собой эвакуированный стеклянный баллон, часть внутренней поверхности которого покрыта слоем металла, играющим роль фотокатода (рис. 32.2). В качестве анода используется металлическое кольцо или редкая сетка, помещаемая в центре баллона. Фотозлемент включается в цепь аккумуляторной батареи, ЭДС которой подбирается так, чтобы фототок был равен току насыщения.

Вакуумные фотозлемента безынерционны, в них фототок строго пропорционален интенсивности излучения, что позволяет использовать их в качестве фотометрических приборов. Рассмотрим некоторые из них:

Люксметр — прибор для измерения уровня освещенности в пространстве, например, в жилом помещении или на рабочем месте (рис. 32.3, а). Основная часть этого прибора — это полупроводниковый



Рис. 32.3. Фотометрические приборы

фотоэлемент, который преобразует световую энергию в энергию электрического тока, сила тока строго пропорциональна освещенности.

Фотозлектрический экспонометр — прибор для определения экспозиции при фото- и киносъемке (рис. 32.3, б). В нем яркость или освещенность объекта съемки определяется при помощи фотоэлементов или фоторезисторов, что позволяет устанавливать нужную экспозицию.

Фотореле — это прибор, замыкающий и размыкающий электрические цепи при изменении падающего на него светового потока (рис. 32.3, в). Он применяется для регулировки освещения, например, для автоматического включения и выключения уличных фонарей. Может применяться также в промышленности и военном деле.

Широко используется *внутренний фотоэффект* — явление увеличения концентрации свободных зарядов (электронов и дырок) в полупроводнике под действием облучения. Как известно, в полупроводнике, находящемся в определенных условиях, существует динамическое равновесие между генерируемыми и рекомбинирующими свободными зарядами.

При освещении полупроводника излучением, энергия квантов которого выше энергии генерации, появляются дополнительные свободные заряды, повышается электропроводность. Первое очевидное применение этого эффекта — *фотосопротивление* (рис. 32.4), это фотоэлектрические приборы, в которых используется свойство полупроводников увеличивать проводимость под действием света. При освещении у полупроводника сопротивление уменьшается, причем, чем интенсивнее освещение, тем меньше сопротивление.

Второе применение — *фотоэлемент с запирающим слоем* (рис. 32.5), или *вентильный фотоэлемент*. Он состоит из металлической подложки и дырочного полупроводника (оксида металла), покрытого прозрачным слоем металла. На границе металл — полупроводник (окись металла)



Рис. 32.4. Фоторезисторы

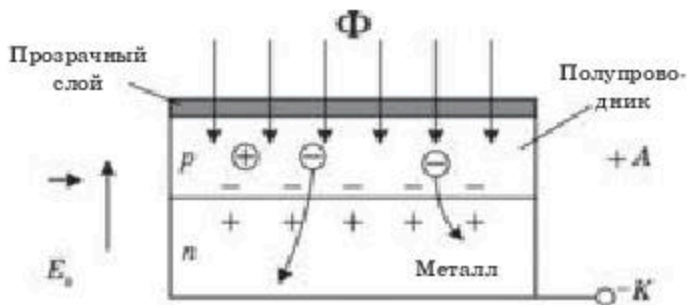


Рис. 32.5. Фотоэлемент с запирающим слоем

вследствие диффузии возникает контактный запирающий слой с напряженностью \vec{E}_k , возникает $p - n$ переход, пропускающий электроны из металла в окись, а дырки из окиси в металл. При появлении светового потока Φ , проникающего в полупроводник, увеличивается концентрация и электронов, и дырок. Электроны при этом могут свободно диффундировать через контакт, а дырки — нет. В результате при освещении электроны накапливаются на подложке, а дырки — в полупроводнике. Между контактами A и K возникает разность потенциалов — фото-ЭДС, пропорциональная освещенности полупроводника. Такие фотоэлементы могут быть применены в качестве источников тока (солнечных батарей), фотоэкспонометров, приборов контроля, для управления и автоматизации различных технологических процессов, в военной технике для сигнализации и локации невидимым излучением, космических кораблях, искусственных спутниках и т. д.



1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Сформулируйте законы Столетова для фотоэффекта.
3. Напишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и объясните на его основе экспериментальные законы фотоэффекта.
4. Что такое красная граница фотоэффекта? Почему она так называется? Ответ обоснуйте.
5. Приведите примеры применения фотоэлементов.
6. Объясните явление внутреннего фотоэффекта.
7. Что такое вентильный фотоэлемент? Где он применяется?



Используя информацию, полученную в ходе изучения данного параграфа, заполните (в устной форме) ниже приведенную таблицу 32.1. Ставьте знак "+" в соответствующую графу ответов.

Таблица 32.1

№	Утверждение	Правильно	Неправильно
1	Фотоэффект возникает при облучении вещества инфракрасным излучением		
2	Фотоэффект возникает при облучении вещества ультрафиолетовым излучением		
3	Уравнение Эйнштейна объясняет все законы фотоэффекта		
4	При фотоэффекте из металла вылетают электроны		
5	При фотоэффекте из металла вылетают протоны		
6	Фотоэффект возникает при соударении электронов с металлом		
7	Фотоэффект лежит в основе работы солнечных батарей		
8	В фотоэлементах электрическая энергия преобразуется в световую		
9	Фотореле — это прибор, замыкающий и размыкающий электрические цепи при изменении падающего на него светового потока		

§ 33. Химическое действие света



Ключевые понятия:

- ✓ фотохимическая реакция
- ✓ красная граница фотохимической реакции
- ✓ фотосинтез
- ✓ фототрофы
- ✓ фотография

На этом уроке вы:

- познакомитесь с химическими действиями света.



При облучении световыми волнами могут происходить различные изменения свойств вещества, т.е. свет оказывает *химическое действие*. Изменения свойств вещества под действием света происходят вследствие протекания в нем химических реакций, которые называются *фотохимическими реакциями*. Можно выделить два типа фотохимических реакций в веществе: это — реакции *синтеза*, когда под действием света из исходных молекул вещества образуются более сложные молекулы и реакции *разложения*, когда под действием света сложные молекулы вещества разлагаются на более простые.

Как правило, первичные фотохимические реакции сопровождаются вторичными химическими превращениями. Установлено, что масса вещества, участвующего в первичной фотохимической реакции, пропорциональна энергии световой волны, поглощенной веществом. Для каждой фотохимической реакции существует наименьшее значение частоты падающего излучения ν_0 , когда возможно протекание этой реакции. Это значение частоты носит название *красной границы*. Излучение, частота которого меньше красной границы, не может вызвать данную фотохимическую реакцию.

По квантовой теории атомы в молекулах удерживаются химическими связями. Как мы уже знаем, световое излучение — это поток фотонов. При взаимодействии с излучением молекула вещества может поглотить фотон, вследствие чего она получает дополнительную энергию $h\nu$. Если этой энергии хватает для разрыва химической связи ($\nu > \nu_0$), то фотохимическая реакция происходит, если нет ($\nu < \nu_0$), то реакция не происходит.

Фотохимические реакции играют большую роль в природе и во многих отраслях жизнедеятельности современного общества.

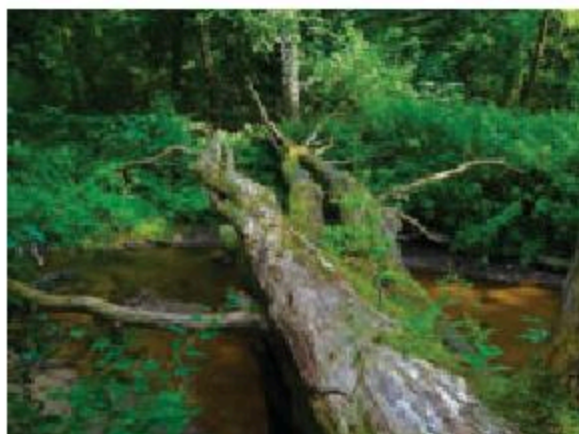
Фотосинтез. В природе в зеленых листьях растений и во многих микроорганизмах происходят важнейшие фотохимические реакции. Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Это происходит в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Корни растений извлекают из земли атомы элементов, необходимых

для животных и людей. Эти атомы пристраиваются к углеродной цепочке, растения строят из них молекулы белков, жиров и углеводов — пищу для человека и животных. Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. Итак, *фотосинтез* — это процесс образования в растениях и некоторых микроорганизмах углеводов под действием света с выделением кислорода. Он обеспечивает круговорот кислорода в природе и составляет энергетическую основу всего живого на Земле. Расщепление молекулы воды квантами солнечного излучения с образованием кислорода делает солнечный свет главным источником энергии биосферы.

Организмы, использующие солнечный свет для получения энергии, называются *фототрофами*. К ним относятся все зеленые растения и некоторые бактерии, например, цианобактерии (рис. 33.1, а, б).

Растения являются первичными производителями органических веществ и служат пищей для всех остальных организмов. Цианобактерии — это сине-зеленые водоросли, считаются древнейшими живыми организмами на Земле. Они породили фотосинтез на нашей планете и насытили земную атмосферу кислородом, дав начало всем остальным формам жизни. Источником свободного кислорода, выделяющегося в атмосферу, служит вода. Совокупность реакций, приводящих к разложению воды под действием света, носит название *фотолиза*. Таким образом, основой жизни на Земле являются солнечный свет и вода.

Фотография. Химическое действие света лежит в основе фотографии. Фотография в переводе с греческого означает светопись (*photos* — свет, *graph* — пишу). Изображение, полученное с помощью оптического прибора — фотоаппарата, формируется на фотопленке или фотопластинке. В качестве материалов для фотоснимков используются светочувствительные вещества, в которых под воздействием света происходят химические изменения. В качестве реагентов в фотографии применяются



а)



б)

Рис. 33.1. Фототрофы:
а) растения; б) цианобактерии

галоидные соли серебра: бромистое, хлористое и йодистое серебро. Наибольшее применение получило бромистое и хлористое серебро. Фотобумага имеет светочувствительный слой из мелких кристалликов бромида серебра AgBr . Под действием света электрон отрывается от иона брома и захватывается серебром. Ион серебра становится нейтральным, при этом происходит почернение фотобумаги на свету. Распад молекулы происходит по схеме: $\text{AgBr} + h\nu \rightarrow \text{Ag}^* + \text{Br}^+ + e^-$, где Ag^* — возбужденный атом серебра, Br^+ — положительный ион брома, e^- — электрон.

Классический способ получения фотоснимка состоит из следующих этапов:

1) *Негативный процесс.* После съемки фотопластинку или пленку в специальных лабораторных условиях (полная темнота или красный свет) подвергают химической обработке: проявлению, ополаскиванию водой и фиксированию. Отфиксированные пластинки и пленки тщательно промывают и высушивают. Окончательным результатом является негатив. В негативном изображении, образованном зернами металлического серебра, относительное распределение яркостей при рассматривании в проходящем свете обратно яркостям деталей объекта снимка. Другими словами, в негативе темные детали объекта фотографирования получаются светлыми и наоборот. В цветных фото процессах изображение объекта съёмки формируется красителями, цвета которых дополнительные к цветам объекта съёмки. Например, синие предметы на цветном негативе выглядят желтыми, зеленые — пурпурными и т. д. На рисунке 33.2 представлены негативы и позитивы черно-белого и цветного изображения.

2) *Позитивный процесс.* Для получения фотографического снимка фотобумагу прикладывают к негативу и освещают источником света. После определенной выдержки лист фотобумаги в лабораторных условиях (оранжевый или красный свет) подвергают такой же химической обработке, как и фотопластинки: проявляют, споласкивают водой, фиксируют, промывают и высушивают. Фотопечать осуществляется двумя способами: контактным (прикладывание фотобумаги непосредственно к негативу) и проекционным (применяя проекционный аппарат-фотоувеличитель). Второй позволяет получать увеличенные (по сравнению с негативом) позитивные снимки.

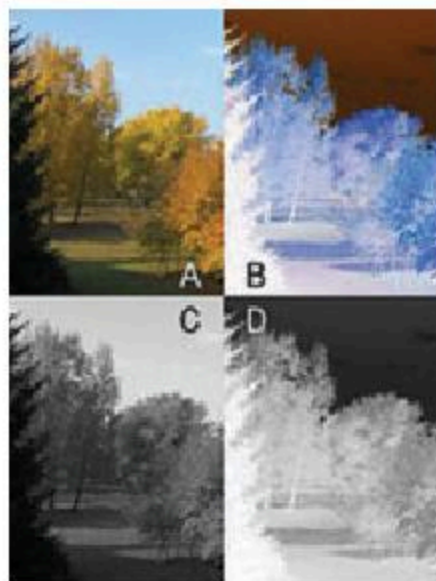


Рис. 33.2 Негативное и позитивное изображения

У химического действия света есть положительные и отрицательные стороны. Например, выцветание тканей на солнце относится к отрицательному эффекту химического действия света. А вот об образовании загара такой однозначный вывод сделать нельзя. В зависимости от степени воздействия солнечных лучей он может оказывать на организм человека как положительное, так и отрицательное воздействие.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!



"Вид из окна" первая в мире Фотография

Фотограф Ж. Н. Ньепс

Первая в мире фотография, сохранившаяся до наших дней, была сделана в 1826 году французским изобретателем Жозефом Ньепсу. Эту фотографию, которая представлена ниже, он назвал "Вид из окна".

А человека впервые запечатлел 1838 году другой французский изобретатель Луи Дагер. Первый фотоавторпортрет в мире, нечто вроде селфи, был сделан примерно осенью 1839 года известным американским фотографом Робертом Корнелиусом. После снятия крышки с фотообъектива, он бросился в кадр, где просидел больше минуты до закрытия линзы.

Таким образом, первый практический способ фотографирования был создан Жозефом Ньепсом. В качестве светочувствительного слоя он использовал раствор асфальта в лавандовом масле, наносимого на оловянную, медную или посеребренную пластинки. Этот способ называется дагеротипия. Дело в том, что процесс получения дагеротипа — изображения на светочувствительной металлической пластинке был представлен Французской академии наук 9 августа 1839 года французским художником и изобретателем Луи Дагером и именно благодаря ему этот способ получения фотографического изображения стал известен во всем мире.

Первую цветную фотографию, на которой запечатлена трехцветная лента, завязанная в бант, представил Максвелл в 1861 году на лекции в Королевском институте в Лондоне. В 1981 году компанией Sony была изобретена цифровая камера, что позволило делать цифровые фотографии и отказаться от традиционной фотопленки. Но надо отметить, что многие профессиональные фотографы по сей день предпочитают использовать в своей работе традиционные фотопленки.



1. Какие реакции называются фотохимическими?
2. Что называется красной границей фотохимической реакции?
3. Расскажите о процессах фотосинтеза
4. Что вы знаете о фототрофах? Приведите примеры
5. Как получается изображение на фотопластинке или фотопленке?
6. Чем негативное изображение отличается от позитивного?



Соберите информацию и напишите реферат на тему: "Загар — польза и вред". Обсудите тему и сделайте выводы.

§ 34. Рентгеновское излучение



Ключевые понятия:

- ✓ рентгеновские лучи
- ✓ рентгеновская трубка
- ✓ тормозное рентгеновское излучение
- ✓ характеристическое рентгеновское излучение

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основными характеристиками и применениями рентгеновского излучения.



Это вы знаете

Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. В. Рентгеном. Они представляют собой электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны порядка ($10^{-12} + 10^{-9}$ м), которое возникает при торможении быстрых электронов в веществе.

Тормозное рентгеновское излучение. Для получения рентгеновских лучей используют так называемые *рентгеновские трубки*. Она представляет собой вакуумный баллон с несколькими электродами (рис. 34.1). Нагреваемый катод *К* служит источником термоэлектронов, цилиндрический электрод *Ц* фокусирует электроны, которые ускоряются высоким напряжением, создаваемым между катодом и анодом (антикатодом) *А*. Антикато́д изготавливают из тяжелых металлов (W, Cu, Pt и т. д.).

Ускоренные электроны, ударяясь об антикатод, испытывают сильное торможение. При этом возникает электромагнитное излучение, которое называется *тормозным рентгеновским излучением*. Надо отметить, что при торможении почти вся энергия электронов превращается в тепло, и лишь 1—3% энергии превращается в излучение, поэтому антикатод необходимо интенсивно охлаждать.

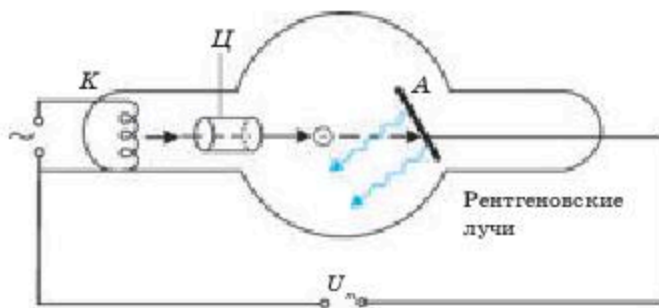


Рис. 34.1. Схематическое изображение рентгеновской трубки



Вильгельм Рентген
(1845—1923)

Возникновение рентгеновского излучения может быть описано в рамках классической электромагнитной теории, согласно которой заряженная частица при движении с ускорением излучает. В данном случае электрон при торможении в веществе антиматода получает отрицательное ускорение, следовательно, он должен излучать.

Мощность излучения пропорциональна квадрату заряда электрона и квадрату его ускорения: $p \sim e^2 a^2$. Причем, согласно классической теории, при торможении электрона должны возникать волны всех длин: от нуля до бесконечности.

Длина волны, на которую приходится максимум интенсивности рентгеновского излучения, должна уменьшаться с увеличением скорости электронов, а значит, ускоряющего напряжения U .

На рисунке 34.2 представлены экспериментальные кривые зависимости интенсивности излучения от длины волны. Как видно из рисунка, эти зависимости в основном укладываются в рамки классической теории, за исключением одного: кривые не начинаются с нуля, а обрываются при конечных значениях длины волны λ_{\min} . Эта длина волны называется *коротковолновой границей тормозного рентгеновского излучения*.

Существование коротковолновой границы тормозного рентгеновского излучения объясняется довольно просто квантовой теорией. Если при торможении электрона излучение возникает в виде квантов энергии, то максимальная энергия каждого такого кванта (фотона) не может быть больше энергии самого электрона. Тогда $h\nu_{\max} = eU$, отсюда

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU}; \quad \lambda_{\min} = \frac{ch}{e} \cdot \frac{1}{U}.$$

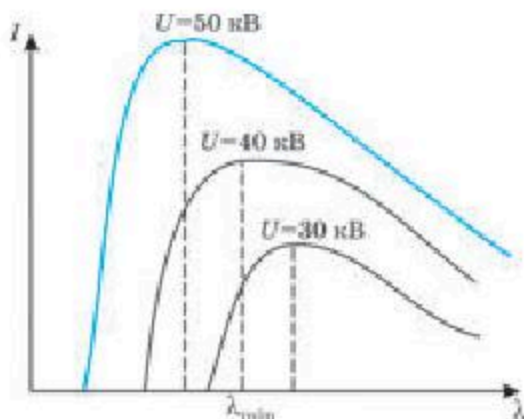


Рис. 34.2. Спектр тормозного рентгеновского излучения

Данный результат хорошо согласуется с экспериментом. Экспериментально определив λ_{\min} , из выше приведенной формулы можно определить постоянную Планка h . Этот метод является одним из самых точных.

При достаточно больших энергиях электронов возникает так называемое *характеристическое рентгеновское излучение*, которое имеет линейчатый спектр. Этот тип рентгеновских лучей характеризует вещество антикатаода.

Применения рентгеновского излучения. Рентгеновские лучи широко применяются в самых различных областях жизнедеятельности современного общества. Так как длина волны рентгеновских лучей очень мала (от 10^{-12} до 10^{-9} м), для них дифракционной решеткой может служить кристаллы твердых тел. Исследуя полученную дифракционную картину, можно изучать структуру вещества. Этот метод применяется в рентгеновском структурном анализе, рентгенографии материалов, рентгеновской топографии и т. д.

Компьютерная томография. Вам хорошо известно применение рентгеновского излучения в медицине для диагностики и лечения различных заболеваний. Одним из последних достижений применения рентгеновского излучения в медицине является *компьютерная томография*.

Принцип работы рентгеновского компьютерного томографа (рис. 34.3) основан на просвечивании исследуемой области тела тонким пучком рентгеновских лучей и их регистрации с противоположной стороны. При прохождении через тело рентгеновские лучи поглощаются в разной степени различными тканями, эти лучи затем считываются компьютером. Компьютер обрабатывает снимки в очень качественное объемное изображение, в котором можно увидеть в подробностях локализацию, протяженность и характер очагов заболеваний.



Рис. 34.3. Рентгеновский компьютерный томограф

Рентгеновская компьютерная томография позволяет оценить коэффициент ослабления излучения в пределах 0,5%, тогда как в обычной рентгенографии это значение составляет 10—20%, т. е. чувствительность данного метода очень высока. Кроме того, компьютерный томограф дает послойное изображение, здесь нет наложения органов и тканей.

В отличие от обычной флюорографии, на которой лучше всего видны кости и легкие, на компьютерной томографии отлично видны и мягкие ткани (мозг, печень и т. д.), что дает возможность диагностировать болезни на ранних стадиях. Компьютерная томография успешно используется и в стоматологии для исследования и точной диагностики зубных рядов и отделов челюстно-лицевой области.

Последнее достижение рентгеновской компьютерной томографии — это спиральная компьютерная томография (СКТ) (ангиография). При спиральной компьютерной томографии сканируется весь объект при однократной задержке дыхания, поэтому резко снижается лучевая нагрузка на пациента. Новым видом СКТ является МСКТ — мульти-спиральный компьютерный томограф, который позволяет проводить исследования с высокой скоростью и большим пространственным разрешением мелких и движущихся структур, таких как коронарные артерии.

Магниторезонансная томография (МРТ). Еще одно современное достижение медицины — магниторезонансные томографы, с помощью которых можно получить послойные изображения обследуемого органа.

В основе принципа работы прибора лежит явление ядерного магнитного резонанса. В магнитно-резонансном томографе создается магнитное поле и испускаются радиоволны определенной частоты. На такое воздействие реагируют атомные ядра водорода, которые имеются в организме человека. Область тела, где расположен обследуемый орган, окружается датчиками, которые будут в процессе исследования улавливать происходящие изменения и передавать их к процессору прибора для обработки.

Магнитно-резонансный томограф позволяет поддерживать стабильное магнитное поле в теле пациента во время его обследования. Аппарат производит: стимуляцию организма при помощи радиоволн; регистрацию электромагнитных излучений организма; обработку полученного сигнала и преобразование его в изображение.

Магнитно-резонансным томографом можно получать изображения просвета сосудов (магнитно-резонансная ангиография), оценивать анатомические и функциональные особенности кровотока в сосудах пациента, проводить исследования пояснично-крестцового отдела позвоночника и многое другое.

Полученная в магнитно-резонансном томографе картинка не является фотографическим снимком обследуемого отдела или органа. Специалист

получает высококачественное детализированное отображение радиосигналов, испускаемых телом пациента. МРТ диагностика полностью превосходит метод компьютерной томографии, поскольку в данном случае при проведении процедуры не применяется ионизирующее излучение, а используются безопасные для человеческого организма электромагнитные волны.



1. Что представляет собой рентгеновское излучение?
2. Объясните принцип работы рентгеновской трубки.
3. Что такое коротковолновая граница тормозного рентгеновского излучения?
- *4. Объясните принцип работы рентгеновского компьютерного томографа
- *5. Расскажите о методе МРТ обследования.

Самое важное в главе 7

Спектром излучения (испускания) называется совокупность длин волн, присутствующих в излучении данного вещества.

Спектром поглощения называют совокупность длин волн, которые поглощаются данным веществом.

Спектральный анализ — совокупность методов качественного и количественного определения состава вещества, основанная на изучении спектров взаимодействия вещества с излучением.

Явление фотоэффекта заключается в испускании электронов веществом под воздействием света.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

Свет одновременно обладает свойствами непрерывности электромагнитных волн и свойствами дискретности частиц-фотонов.

Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны порядка ($10^{-12} \cdot 10^{-9}$) м, которое возникает при торможении быстрых электронов в веществе.

Лазер — оптический квантовый генератор

Глава 8. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

§ 35. Естественная радиоактивность



Ключевые понятия:

- ✓ радиоактивность
- ✓ правила смещения
- ✓ альфа-распад
- ✓ бета-распад
- ✓ гамма-альфа-распад

На этом уроке вы:

- познакомитесь с радиоактивностью и с радиоактивным альфа, бета, гамма распадом.



Это вы знаете



Рис. 35.1

Как вы знаете из курса физики 9 класса, понятие об атомном ядре впервые было введено Э. Резерфордом в 1911 г. Он вместе со своими сотрудниками Э. Марсденом и Х. Гейгером изучал прохождение и рассеяние α -частиц сквозь тонкую металлическую фольгу. Для объяснения результатов проводимых им опытов Резерфорд предложил свою *ядерную модель атома*. Атом состоит из положительно заряженного ядра и совокупности отрицательно заряженных электронов — электронных оболочек, полный заряд которых равен положительному заряду ядра (рис. 35.1). Почти вся масса атома сосредоточена в его ядре.

Ядро занимает весьма малый объем по сравнению со всем объемом атома. В связи с открытием атомного ядра перед теоретической и экспериментальной физикой встала задача изучения структуры и свойств атомного ядра. Так возник новый раздел физики — **ядерная физика**.

Ядерная физика изучает структуру, свойства и взаимные превращения атомных ядер и другие явления, происходящие в микромире, а также природу элементарных частиц, их взаимодействия и взаимные превращения.

Как уже отмечалось, в природе наряду с устойчивыми ядрами существуют также ядра, способные к распаду. История ядерной физики берет свое начало с открытия в 1886 г. французским физиком А. Беккерелем *естественной радиоактивности*. Беккерель исследовал влияние солей урана на фотопластинки. В процессе опытов он обнаружил следующее явление: урановые соли испускают неизвестное излучение с большой проникающей способностью, которое вызывает почернение фотопластинки, обернутой в плотную черную бумагу. В результате тщательных исследований Беккерель установил, что эти неизвестные проникающие лучи излучают сами атомы урана без каких-либо внешних воздействий. При взаимодействии с веществом неизвестные излучения обладают свойствами: 1) вызывают почернение фотопластинки, т. е. обладают химическими действиями; 2) вызывают ионизацию газов; 3) возбуждают люминесценцию некоторых твердых и жидких тел.

Начались интенсивные исследовательские работы по изучению нового явления. В 1898 г. во Франции М. Склодовская-Кюри и П. Кюри открыли, что элемент торий (Th) также самопроизвольно излучает. М. Кюри предложила называть самопроизвольно излучающие химические элементы *радиоактивными*, а сам процесс излучения *радиоактивностью*. В том же году супруги Кюри сумели выделить два новых химических элемента. Элемент, радиоактивность которого в миллион раз мощнее радиоактивности урана, назвали *радием* (Ra), а второй элемент — в честь родины М. Склодовской-Кюри (Польши) — *полонием* (Po). В 1908 г. методом спектрального анализа Э. Резерфорд открыл радиоактивный газ — *радон* (Rn).



Мария
Склодовская-Кюри
(1867—1934)

Широкомасштабные исследования показали, что *все тяжелые элементы, расположенные после свинца в таблице Менделеева, обладают естественной радиоактивностью*. Некоторые легкие элементы, как, например, изотоп калия ${}^{40}_{19}\text{K}$, изотоп углерода ${}^{12}_6\text{C}$, также обладают естественной радиоактивностью.

Радиоактивный распад. Э. Резерфорд и П. Кюри обнаружили сложность состава радиоактивного излучения. Радиоактивный препарат радий Ra расположен внутри толстостенного свинцового сосуда. В центре сосуда имеется канал цилиндрической формы. На излучение, исходящее из радия, находящегося на дне сосуда, действует перпендикулярно направленное сильное магнитное поле. Напротив канала расположена фотопластинка. Установка находится в вакууме (рис. 35.2). Поток излучения радия в магнитном поле разделился на три пучка. На разделение излучения на пучки указывали почернения на фотопластинке. Их соответственно назвали α (*альфа*)-, β (*бета*)- и γ (*гамма*)-лучами. Причем α -лучи (α -частицы) являются потоком положительно заряженных, β -лучи (β -частицы) — потоком быстро движущихся отрицательно заряженных частиц с различными скоростями.

Различие углов отклонения в магнитном поле показывает различие α - и β -частиц по массе и заряду. Заряды их противоположны по знаку. Высокоэнергетическими квантами электромагнитного излучения оказались γ -лучи: они не реагируют на магнитное поле. Опираясь на знания о структуре и составе атомного

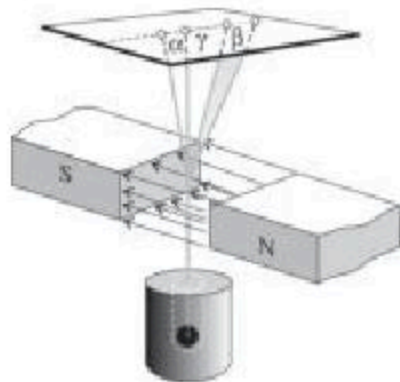


Рис. 35.2

ядра, а также об энергии связи нуклонов, можно легко объяснить при-
роду радиоактивного излучения.

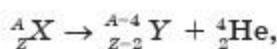
Ядра, у которых число протонов преобладает над числом нейтронов, нестабильны, так как преобладает энергия кулоновского взаимодействия. Нестабильность ядер с преобладающим числом нейтронов над числом протонов объясняется тем, что масса нейтрона больше массы протона ($m_n > m_p$). Избыток массы создает избыток энергии. Ядра с избытком энергии могут освободиться от избытка энергии двумя путями.

1. Без механических, термических и иных внешних воздействий ядро самопроизвольно распадается, испуская радиоактивное излучение и превращаясь в ядро нового элемента. *Если самопроизвольный распад сопровождается испусканием α -частиц, его называют α -распадом.*

2. Ядро самопроизвольно изменяет свой заряд на единицу заряда, т. е. нейтрон превращается в протон или протон в нейтрон. Такой процесс обычно сопровождается испусканием электрона или позитрона (электрон с положительным зарядом) и поэтому называется β -распадом. Превращения атомных ядер при радиоактивных распадах подчиняются *правилу смещения*, сформулированному английским ученым Ф. Содди в 1913 г. При радиоактивных распадах наряду с выполнением законов сохранения электрического заряда и массового числа выполняются и законы сохранения импульса и энергии.

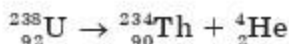
Альфа-распад. Природу α -частиц исследовал и установил Э. Резерфорд в 1908 г. При α -распаде из ядра самопроизвольно вылетает α -частица — ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$ (два протона и два нейтрона), и образуется ядро нового химического элемента. На рисунке 35.3 показан процесс α -распада.

При α -распаде ядро атома превращается в ядро дочернего элемента, у которого зарядовое число Z уменьшено на два и массовое число A — на четыре. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы элементов Менделеева:

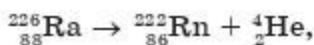


где X — символ материнского ядра; Y — символ дочернего ядра. Для α -частиц использовали символ ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$.

Приведем примеры. При α -распаде из ядра урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ появляется ядро ${}^{234}_{90}\text{Th}$:



Напишем еще одну реакцию α -распада:



где нуклиды ${}_{92}^{238}\text{U}$ и ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ называют *материнскими*, а нуклиды ${}_{90}^{234}\text{Th}$ и ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ — *дочерними ядрами*. Верхние числа у символа элемента, т. е. массовые числа (число нуклонов), в обеих частях равенства равны: $238 = 234 + 4$. Массовое число сохраняется. Также равны и числа внизу: $92 = 90 + 2$. Выполняется закон сохранения электрического заряда. При распаде материнского ядра α -частица и дочернее ядро разлетаются с определенными кинетическими энергиями. В некоторых случаях дочернее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Энергию распада можно определить, используя закон сохранения энергии в системе покоя материнского ядра. *Энергия распада* Q_α равна сумме энергии возбуждения и кинетических энергий. Если учесть, что начальная энергия равна энергии покоя материнской энергии, то:

$$M_m c^2 = (M_d + M_{\text{He}}) c^2 + Q_\alpha,$$

где M_m , M_d , M_{He} — соответственно массы материнского, дочернего ядер и ядра атома гелия; отсюда находим энергию распада:

$$Q_\alpha = (M_m - M_d - M_{\text{He}}) c^2.$$

Например, при α -распаде ядра урана выделяется 4МэВ энергии. У тяжелых ядер с $Z > 82$ наблюдаются α -распады.

Как показано на рисунке 35.4, проникающая способность α -частиц незначительна, в воздухе — всего лишь 3—7 см, затем поглощаются листом бумаги. Обладают высокой ионизирующей способностью, из-за этого быстро теряют энергию.

Бета-распад. Природу β -частиц установил в 1899 г. Э. Резерфорд. Это оказался поток быстро движущихся электронов. β -частицу обозначают символом ${}_{-1}^0e$. Массовое число $A = 0$, так как масса электрона в атомных единицах столь незначительна, что ею можно пренебречь. Применим правила смещения для β -распада.

При β -распаде зарядовое число ядра атома Z увеличится на единицу заряда, а массовое число останется неизменным. В результате элемент смещается на одну клетку к концу периодической системы элементов Менделеева:

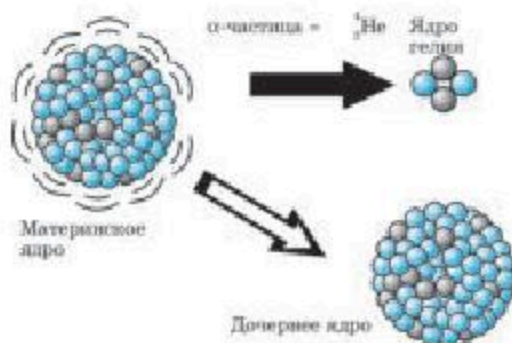
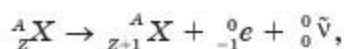


Рис. 35.3

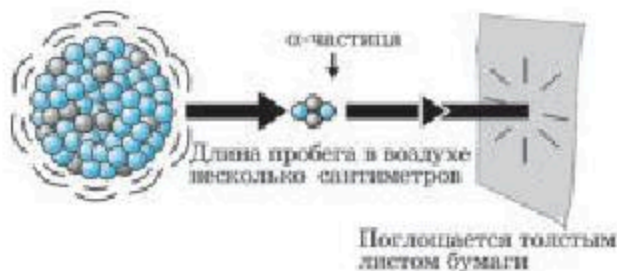


Рис. 35.4

где $\tilde{\nu}$ — частица с нулевым электрическим зарядом и без массы покоя под названием *электронное антинейтрино*. Например:



Такой распад называется *электронным β -распадом*. При электронном β -распаде в ядре происходит превращение 1_0n нейтрона в 1_1p протон с одновременным испусканием ${}_{-1}^0e$ электрона и ${}^0_0\tilde{\nu}$ антинейтрино:



Появление электрона в ядре оказалось следствием распада нейтрона. При β -распаде, как показали измерения, энергия системы “дочернее ядро — электрон” оказалась меньше, чем энергия материнского ядра. Появились сомнения насчет выполнения закона сохранения энергии.

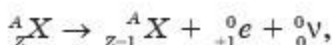
В 1931 г. швейцарский физик-теоретик В. Паули выдвинул гипотезу о том, что при β -распаде из ядра вылетает кроме электрона еще одна, пока неизвестная, частица с массовым числом $A = 0$ и зарядовым числом $Z = 0$. Причиной несохранения энергии при β -распаде является та часть энергии, которую уносит новая частица.

Великий итальянский физик Э. Ферми предложил назвать эту гипотетическую частицу *нейтрино* (от итал. *neutrino* — “маленький нейтрон”). Электрический заряд и масса покоя нейтрино равны нулю, почти не взаимодействует с веществом, поэтому обнаружить его при эксперименте чрезвычайно трудно. После долгой “охоты” за нейтрино его сумели обнаружить лишь в 1956 г. Антинейтрино является античастицей нейтрино.

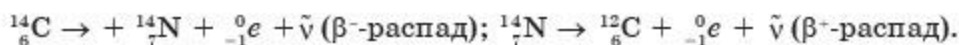
Кроме электронного β -распада существует также позитронный β^+ -распад. При позитронном β^+ -распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон, испуская при этом позитрон ${}^0_+1e$ и электронное нейтрино:



Зарядовое число ядра Z уменьшается на единицу, в результате элемент смещается на одно место к началу периодической системы элементов Менделеева:



где ${}^0_{+1} e$ — позитрон, античастица электрона, масса его равна массе электрона. Примерами β -распада являются реакции:



Материнское и дочернее ядра являются изобарами. В системе отсчета, связанной с материнским ядром, используя закон сохранения энергии, можно определить Q_β энергию β -распада:

$$M_m c^2 = M_d c^2 + Q_\beta,$$

отсюда

$$Q_\beta = (M_m - M_d) c^2.$$

Эта энергия распада распределяется между электроном (позитроном), антинейтрино (нейтрино) и дочерним ядром. Дочернее ядро может оказаться возбужденным. Скорость β -электронов в вакууме порядка $v_\beta = 2 \cdot 10^8$ м/с. Как показано на рисунке 35.5, проникаемость β -частиц выше, чем α -частиц, их пробег в воздухе равен порядка 1 м, но их полностью задерживает медная пластинка толщиной 1 мм.

Гамма-распад. В 1900 г. французский физик П. Виллард открыл сильно проникающее слабое излучение. Лучи Вилларда стали называться *гамма-лучами* (γ -лучи). Радиоактивный распад с испусканием γ -лучей не является самостоятельным видом распада, он сопровождает процессы α - и β -распадов. Как уже было сказано, дочернее ядро является возбужденным. (Вспомните возбужденное состояние атома.)

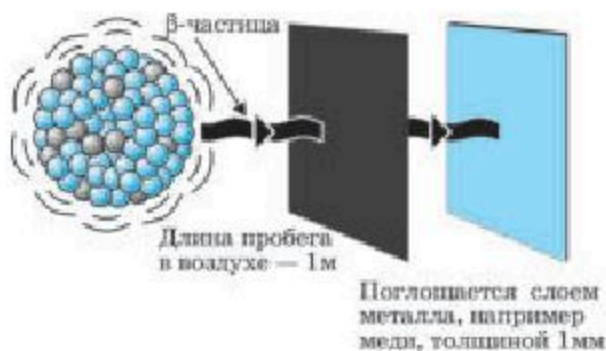


Рис. 35.5

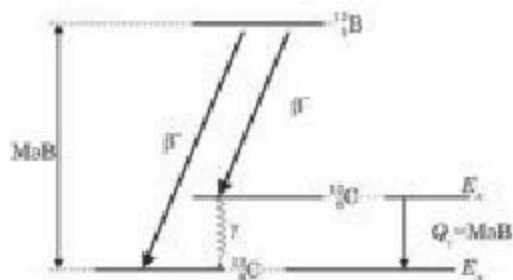


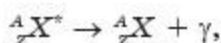
Рис. 35.6

Возбужденное ядро, как и атом, при переходе из высокоэнергетического в низкоэнергетический уровень испускает гамма-квант с энергией

$$h\nu = E_x - E_n,$$

где E_x и E_n — соответственно энергии возбужденного и нормального уровней (рис. 35.6).

Испускаемые из ядра γ -лучи оказались потоком фотонов. Напишем формулу гамма-распада:



где X^* — возбужденное материнское ядро; X — его нуклид в нормальном состоянии. На рисунке 35.7 изображена схема β -распада ядра бора.

Длина волны γ -лучей чрезвычайно коротка: $\lambda = 10^{-8} - 10^{-11}$ см. Поэтому среди радиоактивных лучей проникающая способность γ -лучей самая высокая. Пробег γ -квантов в воздухе составляет 120 м. Как показано на рисунке 35.7, они свободно проходят через слой свинца толщиной 10 см.

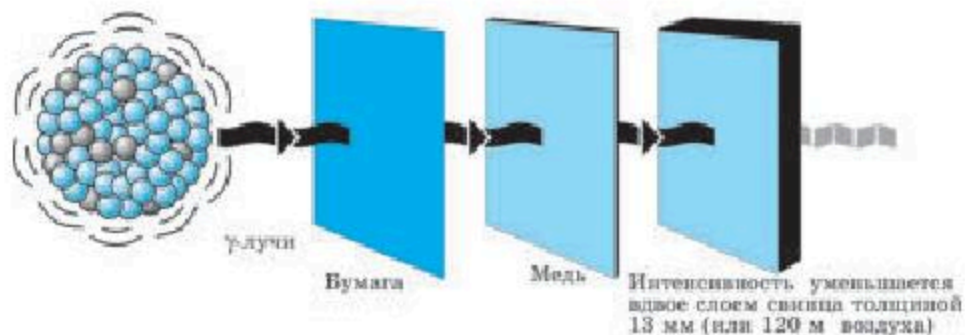


Рис. 35.7



1. В чем важность эксперимента Беккереля?
2. Каков состав радиоактивного излучения? Как его определили?
3. Что такое α -распад?
4. Объясните смысл открытия Содди.
5. Как понимают β -распад? Каковы различия между электронным и позитронным β -распадами?
6. В чем трудность регистрации нейтрино?



Составьте групповые проекты на тему: "Применение γ -ножей" в радиохирургии".



Упражнение 14

1. Какое ядро появляется при α -распаде изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$?
2. Какой элемент образуется после трехкратного α -распада изотопа актиния ${}_{89}^{225}\text{Ac}$?

Ответ: ${}_{83}^{218}\text{Bi}$.

3. При радиоактивном распаде изотопа ${}_{82}^{209}\text{Pb}$ свинца вылетает β^- -частица. В ядро какого элемента превращается ядро изотопа свинца?

Ответ: ${}_{82}^{209}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{209}\text{Bi} + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}$.

4. После четырех β^- -распадов в какое устойчивое ядро превращается ядро ксенона ${}_{54}^{140}\text{Xe}$?

Ответ: ${}_{58}^{140}\text{Ce}$.

5. Ядро протона тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ испытывает два раза α -распад, два раза β^- -распад и еще один α -распад. Ядро какого элемента появится после этих преобразований?

Ответ: ${}_{86}^{220}\text{Rn}$.

6. Радиоактивный изотоп золота ${}_{79}^{196}\text{Au}$ может распадаться с испусканием как электрона, так и позитрона. Напишите реакцию распада.

Ответ: ${}_{79}^{196}\text{Au} \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_{80}^{196}\text{Hg} + \tilde{\nu}$; ${}_{79}^{196}\text{Au} \rightarrow {}_{+1}^0e + {}_{78}^{196}\text{Pt} + \nu$.

7. Ядро висмута ${}_{83}^{212}\text{Bi}$ может превращаться после α -распада в ядро изотопа таллия или после β^- -распада в ядро изотопа полония ${}_{84}^{212}\text{Po}$. Напишите соответствующие реакции.

Ответ: ${}_{83}^{212}\text{Bi} \rightarrow {}_{81}^{208}\text{Tl} + {}_2^4\text{He}$; ${}_{83}^{212}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{212}\text{Po} + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}$.

8. Какое количество α -, β^- -распадов содержится в цепочке превращений урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ в свинец ${}_{82}^{207}\text{Pb}$?

Ответ: $n_{\alpha} = 7$; $n_{\beta} = 4$.

9. После какого числа α - и β^- -распадов искусственно полученный радиоактивный элемент нептуний ${}_{93}^{241}\text{Np}$ превращается в стабильный изотоп висмута ${}_{83}^{209}\text{Bi}$?

Ответ: восемь α -распадов и шесть β^- -распадов.

§36. Закон радиоактивного распада



Ключевые понятия:

- ✓ постоянная распада
- ✓ закон радиоактивного распада
- ✓ период полураспада
- ✓ активность

На этом уроке вы:



- на основе закона радиоактивного распада поймете долгосрочные последствия ядерных отходов;
- узнаете, как использовать формулу закона радиоактивного распада для решения задач.

Экспериментальные исследования доказали, что радиоактивный распад полностью подчиняется статистическим закономерностям. Ядра определенного радиоактивного изотопа совершенно одинаковы. Невозможно предсказать, в какой момент времени распадается ядро. Какое ядро и в какой момент времени оно распадется — событие случайное.

Каждое радиоактивное вещество имеет определенный интервал времени, в течение которого его активность уменьшается вдвое. Основной характеристикой радиоактивного вещества является период полураспада. *Интервал времени, в котором распадается половина радиоактивного ядра называется периодом полураспада $T_{\frac{1}{2}}$* . Период полураспада для разных веществ может иметь разные значения. Например, период полураспада радона $T_{\frac{1}{2}} = 3,82$ дня, а для радия $T_{\frac{1}{2}} = 1600$ лет. Чем ниже период полураспада, тем более интенсивным становится радиоактивное излучение. Следует иметь в виду, что на скорость радиоактивного распада не влияют внешние условия (давление, температура и т.д.). Поэтому мы тоже не можем влиять на скорость распада и никакие химические соединения радиоактивного изотопа также не оказывают никакого влияния.

Найдем математическую формулу закона радиоактивного распада. Предположим, что число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t = 0$) равно N_0 . Тогда после $t_1 = T_{\frac{1}{2}}$ периода полураспада число нераспадаемых атомов будет $N = \frac{N_0}{2}$. Атомы распадаются независимо друг от друга. Поэтому период полураспада не зависит от исходного числа атомов. После второго $t_2 = 2T_{\frac{1}{2}}$ периода полураспада число нераспадаемых атомов $\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$.

После n периодов полураспада при $t = nT_{\frac{1}{2}}$ времени останется $N = N_0 \frac{1}{2^n}$ радиоактивных атомов, а так как $n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$, то $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}}$. Это уравнение называется *законом радиоактивного распада*.

Зависимость числа нераспавшихся ядер по времени показана на рисунке 36.1. Этот график зависимостей является экспонентой. Можно определить количество распадаемых атомов после t времени, зная количество нераспадаемых атомов N и начальное число атомов N_0 .

$$N_n = N_0 - N = N_0 \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}}\right)$$

Закон радиоактивного распада открыли Э. Резерфорд и Ф. Содди в 1902 г.

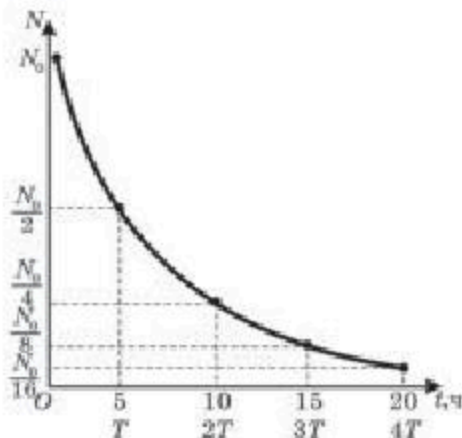


Рис. 36.1

Величина, определяемая числом ядер, распавшихся за единицу времени, называется *активностью (A) радиоактивного вещества (препарата)*:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

Единица измерения активности в Международной системе единиц — *беккерель*.

1 беккерель (Бк) — активность такого радиоактивного препарата, когда за единицу времени (1с) распадается одно ядро:

$$[A] = 1 \text{ Бк} = \frac{1 \text{ распад}}{1 \text{ с}}.$$

На практике часто используют другую единицу — **кюри (Ки)**:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}; \quad 1 \text{ мКи} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Бк}.$$

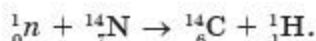
Более половины элементов в таблице Менделеева имеют естественные радиоактивные изотопы. Диапазон периода их полураспада необычайно широк. Например, у изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ период полураспада $T_{\frac{1}{2}} = 4,5$ млрд. лет, а период полураспада изотопа тория — 14 млрд. лет. Если учесть, что планета Земля образовалась 4—5 млрд. лет назад, то само собой разумеется, что уран и торий не успели еще полностью распастись.

В природе встречаются элементы, периоды полураспада которых очень коротки, даже есть элементы, периоды полураспада которых равны одной миллионной доле секунды.

Радиоуглеродный метод датировки — метод датирования археологических находок биологического происхождения, возраст которых

составляет от 1000 до 75 000 и даже до 100 000 лет. Таким методом определяют возраст египетских мумий, тканей, костей, древесины и т. д.

Попадающие в атмосферу Земли космические лучи, сталкиваясь с атомами в атмосфере Земли, в основном состоят из протонов. Протоны выбивают из них вторичные протоны и нейтроны, которые вступают в новые ядерные реакции с атомом азота:



Углерод ${}^{14}_6\text{C}$ распадается с периодом полураспада $T_{\frac{1}{2}} = 5730$ лет.

В атмосфере устанавливается равновесие между числом распавшихся и вновь образовавшихся ядер атомов ${}^{14}_6\text{C}$. Нынешнее соотношение между числом атомных ядер ${}^{14}_6\text{C}$ и ${}^{12}_6\text{C}$ составляет $1 : 1,5 \cdot 10^{-12}$. Радиоактивный углерод ${}^{14}_6\text{C}$ вступает в реакцию с находящимся в атмосфере кислородом и превращается в двуокись углерода. При усвоении углекислого газа все растения наряду с углеродом ${}^{12}_6\text{C}$ постоянно потребляют определенное количество радиоактивного углерода ${}^{14}_6\text{C}$. Вместе с растительной пищей ядра атомов ${}^{14}_6\text{C}$ попадают в организм животных и людей. Однако с момента гибели живого организма число атомов ${}^{14}_6\text{C}$ уменьшается в соответствии с законом радиоактивного распада. Измеряя скорость распада, можно определить возраст любой археологической находки. За это открытие американский физик У. Либби удостоен Нобелевской премии (1960 г.).



1. Какому закону подчиняется радиоактивный распад атомных ядер?
2. Как вы понимаете смысл термина постоянная распада?
3. В чем смысл закона радиоактивного распада?
4. Какое правило подтверждает тот, что период полураспада $T = \text{const}$?
5. Что называется активностью радиоактивного изотопа? Единица какой величины есть беккерель?
6. Известно, что возраст Земли составляет несколько миллиардов лет, а период полураспада радия 1600 лет. Почему на Земле до настоящего времени сохранилась какая-то часть радия?

Пример решения задачи

Масса радиоактивного кобальта 4 г. Сколько граммов кобальта распадается за 216 сут, если его период полураспада 72 сут?

Дано:

$$m_0 = 4 \text{ г}$$

$$t = 216 \text{ сут}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = 72 \text{ сут}$$

$$\Delta m \text{ — ?}$$

Решение. Так как масса вещества прямо пропорциональна числу атомов, можно считать, что масса вещества также изменяется со временем по экспоненциальному закону:

$$m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

$$\text{Следовательно, } \frac{\Delta m}{m_0} = \frac{\Delta N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = N_0 \frac{\left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}\right)}{N_0}.$$

$$\text{Отсюда } \frac{\Delta m}{m_0} = 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \Delta m = m_0 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}\right),$$

$$\Delta m = 4 \text{ г} \cdot (1 - 2^{-3}) = \frac{4 \text{ г} \cdot 7}{8} = 3,5 \text{ г}.$$

(3,5 г)



Упражнение 15

1. Сколько атомов распадается за одни сутки в препарате полония $^{210}_{84}\text{Po}$ массой $m = 1 \text{ г}$?

Ответ: $\Delta N = 1,44 \cdot 10^{19}$ атомов.

2. Определите период полураспада висмута $^{210}_{83}\text{Bi}$, если известно, что за 1 с из висмута массой 1 г вылетает $N = 4,58 \cdot 10^{15}$ β^- -частиц.

Ответ: 5 сут.

3. За 150 с распались $\frac{7}{8}$ первоначальных радиоактивных ядер. Чему равен период полураспада элемента?

Ответ: $T = 50 \text{ с}$.

4. Период полураспада изотопа йода $^{131}_{53}\text{I}$ — восемь суток. Если первоначальная масса препарата 40 г, сколько ядер радиоактивного изотопа останется после 80 суток?

Ответ: $1,8 \cdot 10^{20}$.

5. Определите, сколько атомов распадается в $m = 1 \text{ мг}$ радиоактивного изотопа цезия $^{137}_{55}\text{Cs}$ в течение промежутка времени $t = 20 \text{ дн}$. Период полураспада цезия $T_{\frac{1}{2}} = 30 \text{ дн}$.

Ответ: $N = 1,6 \cdot 10^{18}$.

- *6. Активность изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ в древних деревянных предметах составляет $\frac{2}{3}$ активности этого изотопа в свежесрубленных деревьях. Оцените с точностью до тысячи лет возраст древних предметов, если период полураспада атомов $^{14}_6\text{C}$ 5570 лет.

Ответ: $\approx 3000 \text{ лет}$.

§ 37. Атомное ядро



Ключевые понятия:

- ✓ заряд ядра
- ✓ масса ядра
- ✓ атомная единица массы
- ✓ относительная атомная масса



На этом уроке вы:

- познакомитесь с характеристиками атомного ядра и единицами измерения.

Заряд атомного ядра. Одной из основных характеристик атомного ядра является его *заряд*. Заряд атомного ядра впервые точно измерил Г. Мозли в 1913 г. Непосредственные измерения ядерного заряда осуществил Дж. Чедвик в 1920 г. Заряд атомного ядра равен произведению порядкового номера химического элемента Z в таблице Менделеева на величину элементарного заряда e :

$$q = Z \cdot e. \quad (37.1)$$

Таким образом, порядковый номер любого химического элемента в таблице Менделеева определяется числом положительных зарядов ядра атома этого элемента. Поэтому порядковый номер Z элемента называют *зарядовым числом*.

Масса атомного ядра. Физические свойства атомного ядра определяются наряду с его зарядом еще и его массой. *Масса* — одна из важнейших характеристик ядер. В ядерной физике массы ионов и атомных ядер определяют в основном с помощью масс-спектрографа. На рисунке 37.1 приведена схема масс-спектрографа. Атомы излучаемых веществ

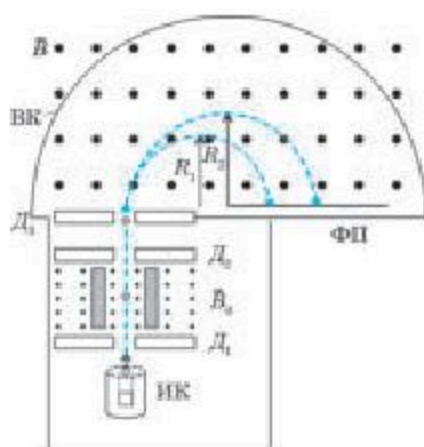


Рис. 37.1

положительно ионизируются в ионном источнике и под действием слабого электрического поля проходят через диафрагму D_1 с различными скоростями. В электрическом поле между диафрагмами D_1 и D_2 положительные ионы движутся с ускорением.

Одновременно с электрическим полем на положительные ионы действует слабое магнитное поле с индукцией \vec{B}_0 . Ускоренные таким образом положительные ионы проходят через взаимно перпендикулярные электрическое \vec{E}_0 и магнитное \vec{B}_0 поля. Для прохождения через диафраг-

му D_3 без отклонений необходимо выполнение условия: $F_e = F_m$ или $qE_0 = vqB_0$. Отсюда определим скорость:

$$v = \frac{E_0}{B_0}. \quad (37.2)$$

Таким образом, обладающие одинаковыми скоростями v положительные ионы через щель диафрагмы D_3 проходят в вакуумную камеру BK , расположенную в однородном магнитном поле \vec{B} . Вектор индукции магнитного поля \vec{B} перпендикулярен вектору скорости. На движущиеся в магнитном поле положительные ионы действует сила Лоренца $F = qvB$.

Ионы под действием этой силы движутся по окружности. Описав полуокружность, ионы с одинаковыми массами попадают в одно место фотопластинки $ФП$. Ионы с различными массами, двигаясь соответственно по дугам окружностей с различными радиусами, попадают в различные места фотопластинки.

Из равенства $F_e = F_m$ или $qvB = M \cdot \frac{v^2}{R}$ можно определить массу иона с большой точностью:

$$M = \frac{qBR}{v}. \quad (37.3)$$

Массу ядра атома принято обозначать буквой M .

Единицы измерения в ядерной физике. Наряду с применяемыми в Международной системе единиц длины, массы и других привычных единиц в ядерной физике пользуются также и специальными единицами. Это вызвано тем, что ядерные процессы протекают в *субатомном мире*.

Так, например, самое большое расстояние в ядерной физике — радиус атома — всего лишь 10^{-10} м. Единица длины в ядерной физике называется **фемтометр**: $1 \text{ фм} = 10^{-15}$ м. За единицу массы атома принято считать часть массы атома. Эту единицу называют **атомной единицей массы** (а.е.м.):

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,660546 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad 1 \text{ кг} = 6,023091 \cdot 10^{26} \text{ а.е.м.}$$

Относительная атомная масса $A_r = \frac{m_A}{1 \text{ а.е.м.}}$ показывает, сколько

атомных единиц массы содержится в абсолютной атомной массе. Например, для: водорода $A_r = 1,00783$; углерода $A_r = 12,0$; кислорода $A_r = 15,99482$.

В ядерной физике энергию выражают в **электронвольтах** (вспомните сведения из 9 класса): $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Чаще всего применяют кратные величины: $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$; $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$; $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$.

Массы элементарных частиц выражают наряду с атомными единицами массы в единицах энергии (МэВ или ГэВ). Определим энергетический эквивалент атомной единицы массы. По формуле

Эйнштейна $E_0 = m_0 c^2$. Для частицы с массой, равной атомной единице массы $m_0 = 1$ а.е.м.: $E_0 = 1,605402 \cdot 10^{-27} \cdot 2,99792458 \cdot 10^{16}$ Дж = $= 1,49242 \cdot 10^{-10}$ Дж = 931,49432 МэВ \approx 931,5 МэВ; 1 а.е.м = 931,5 МэВ. Например, для электрона энергетический эквивалент массы равен: $m_0 = 9,1093897 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,485779 \cdot 10^{-4}$ а.е.м. = 0,5109906 мэВ \approx 0,511 МэВ.

Массы электронов в атоме по сравнению с массой ядра пренебрежимо малы. Поэтому целое число, ближайшее к атомной массе, выраженной в а.е.м., называется **массовым числом** и обозначается буквой A . Оно используется в расчетах, не требующих высоких точностей; чаще всего применяется в выражениях, содержащих отношения масс ядер, в качестве массы ядер. Так, масса атома гелия $M_{\text{He}} = 4,0026$ а.е.м., а массовое число $A = 4$.



1. Как связан в периодической системе Д. И. Менделеева порядковый номер элемента с зарядом его ядра?
2. Почему химические свойства атома определяются зарядом его ядра?
3. Какие единицы измерения дополнительно применяются в ядерной физике?
4. С какой целью применяется масс-спектрограф? Объясните принцип его работы.
5. Что называется массовым числом?

§ 38. Нуклонная модель ядра



Ключевые понятия:

- ✓ протон
- ✓ нейтрон
- ✓ массовое число
- ✓ нуклоны
- ✓ нуклиды
- ✓ изотопы
- ✓ изобары

На этом уроке вы:

- познакомитесь с протон-нейтронной моделью ядра и изотопами.



Открытие протона. После открытия атомного ядра на повестку дня встал вопрос: какова структура ядра? В 1919 г. Э. Резерфорд, продолжая свои опыты с α -частицами, открыл первую частицу, входящую в атомное ядро.

В закрытом сосуде находятся источник α -частиц элемент Ra и прозрачный экран Э, покрытый сульфидом цинка (рис. 38.1). Воздух из сосуда выкачан. Вылетевшие α -частицы при столкновении с экраном вызывают свечения, которые наблюдают в микроскоп М. На следующем этапе эксперимента был взят сосуд и наполнен азотом. Теперь энергии α -частиц растрачиваются на ионизацию атомов азота и на их возбуж-

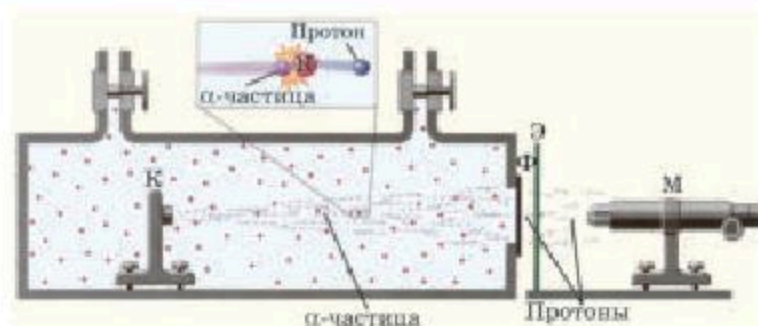


Рис. 38.1

дение, благодаря этому они уже не долетают до экрана. Все же хотя редко, но свечения появляются на экране. Электроны, возникающие при ионизации атомов азота, не в состоянии вызывать свечения. Следовательно, α -частицы при столкновении с атомом азота выбивают из его ядра неизвестные заряженные частицы, которые и вызывают свечение. Исследования этих частиц в электрическом и магнитном полях показали, что они обладают положительным зарядом. Масса их оказалась равной массе ядра атома водорода. Эксперимент повторяли и с другими веществами — фтором, натрием, бором, алюминием и т. д. При бомбардировке α -частицами почти всегда наблюдался вылет ядра атома водорода. Все это доказывало, что в состав ядра входит ядро атома водорода. Это ядро атома водорода назвали *протоном* (от греч. *protos* — “первый”).

Протон заряжен положительно, и его заряд равен по величине элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.е.м.} = 938,27 \text{ МэВ.}$$

Открытие протона родило надежду создать протонно-электронную модель ядра. Несмотря на ее простоту и естественность, протонно-электронная модель ядра по мере развития ядерной физики была оставлена. Она оказалась в противоречии с важнейшими свойствами атомных ядер.

Открытие нейтрона. Немецкие ученые В. Боте и Г. Беккер при бомбардировке α -частицами атомов лития и бериллия в 1930 г. обнаружили испускание новых, до того времени неизвестных частиц, которые очень плохо взаимодействовали с веществом и свободно проходили через слой свинца толщиной 20 см. Аналогичные опыты ставили и французские ученые Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. На пути появляющихся лучей они ставили парафиновую пластину (рис. 38.2). Исследователи ожидали, что из богатой протонами парафиновой пластины вылетят протоны. Аналогичные опыты были поставлены и английским ученым Дж.Чедвиком — учеником Э.Резерфорда. Еще раньше Резерфордом было высказано предположение, что в состав атомного ядра входит

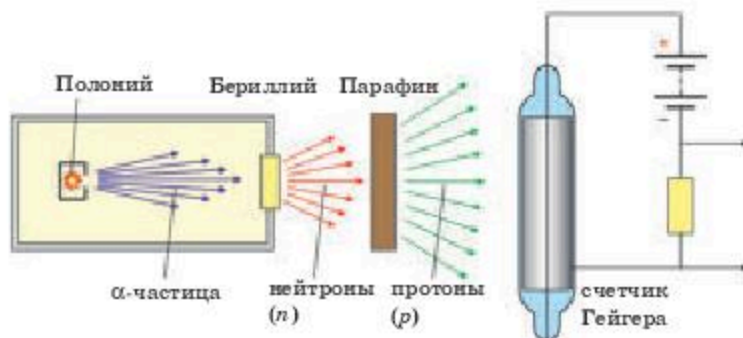


Рис. 38.2

пока неизвестная, нейтральная тяжелая частица, подобная протону. Чедвик сразу же приступил к бомбардировке α -частицами бериллия и исследовал свойства неизвестного излучения.

Используя законы сохранения энергии и импульса, он рассчитал массу неизвестной частицы. Ученый установил, что неизвестным источником излучения является поток электрически нейтральных частиц. Масса “незнакомки” оказалась близкой массе протона.

Пророчество Э. Резерфорда, высказанное им еще в 1920 г., о том, что в состав атомного ядра входит массивная, как протон, нейтральная частица, сбылось. И тогда же гипотетическую частицу назвали *нейтроном* (от лат. *neutrum* — “ни то, ни другое”). Электрический заряд нейтрона равен нулю, поэтому эта частица обладает высокой проникаемостью через вещество. По современным данным масса нейтрона равна:

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.е.м.} = 939,56 \text{ МэВ.}$$

Обозначение нейтрона ${}_0^1n$, электрически нейтрален, относительная атомная масса близка к единице. Масса нейтрона больше массы протона приблизительно на 2,5 электронных масс. Долгое время не могли обнаружить нейтрон в свободном состоянии. Только в 1950 г. выяснили причину явления. Нейтрон — не стабильная частица. Время жизни нейтрона порядка 14 мин. После этого частица распадается на протон, электрон и безмассовую частицу — *антинейтрино*. Об этом речь пойдет в последующих главах.

Состав атомного ядра. После открытия нейтрона советский ученый Д. Д. Иваненко в 1932 г. высказал гипотезу о том, что *атомные ядра состоят только из Z протонов и N нейтронов*. Эта же гипотеза чуть позже (в том же году) была высказана немецким ученым В. Гейзенбергом. Взгляды ученых очень быстро получили всеобщее признание и явились основой для создания современной теории атомного ядра.

Атом в нормальном состоянии электрически нейтрален, поэтому заряд протонов в ядре по модулю должен быть равен заряду электронов в атоме, значит, число протонов равно числу электронов в электронных

оболочках. Число протонов в ядре, называемое *зарядовым числом*, обозначают буквой Z . Зарядовое число Z равно порядковому номеру соответствующего химического элемента в периодической таблице Менделеева.

Согласно современным представлениям, массовое число ядра A представляет собой всеобщее число частиц — протонов и нейтронов, находящихся в ядре и называемых *нуклонами* (от лат. *nukluis* — “ядро”):

$$A = Z + N. \quad (38.1)$$

Число нейтронов в ядре можно определить как разность массового числа и числа протонов: $N = A - Z$.

Для описания состава ядра используют его атомный номер Z в таблице Менделеева и массовое число A . Масса электронов в атоме пренебрежимо мала по сравнению с массой ядра. Поэтому массовое число A атомного ядра равно округленному до целого числа относительной атомной массе химического элемента, выраженной в а.е.м. Ядро химического элемента с атомным номером Z , массовым числом A принято обозначать A_ZX . Например, ${}^{12}_6C$ является символом ядра атома углерода с атомным номером (зарядовым числом) $Z = 6$, массовым числом $A = 12$.

Обозначается протон через 1_1p , а нейтрон — 1_0n . Протон является также ядром атома водорода, поэтому нередко протон обозначают также через 1_1H . Вместо термина *атомное ядро* широкое применение находит название *нуклиды*.

Изотопы. Массы атомов измерены с большой точностью. При этих измерениях были обнаружены *изотопы* (от греч. *isos* — “одинаковый”, *topos* — “место”). Это *разновидности атомов данного химического элемента, обладающие одинаковым зарядом, но различающиеся массой*. Измерения масс изотопов показывают, что они всегда выражаются в а.е.м. числами, близкими к целым. *Атомные массы изотопов называются изотопными массами*. Например, в природе встречаются следующие изотопы ядра атома аргона с $A = 38$ (с числом нейтронов в ядре $N = 38; 20; 22$): ${}^{36}_{18}Ar$; ${}^{38}_{18}Ar$; ${}^{40}_{18}Ar$. Количество электронов в оболочках одинаково, поэтому химические свойства изотопов также одинаковы, а массы ядер различны, поэтому в их физических свойствах имеются различия.

Один из самых тяжелых элементов в природе — уран — имеет следующие изотопы: ${}^{238}_{92}U$, ${}^{235}_{92}U$, ${}^{234}_{92}U$ и др. У самого легкого элемента водорода — имеются три изотопа: 1_1H ; 2_1H ; 3_1H . Легкий изотоп водорода 1_1H называют *протием*, а изотоп 2_1H — *дейтерием*. (Это вы уже знаете из курса физики 9 класса.) В природном водороде доля дейтерия составляет 0,015%. При соединении дейтерия с кислородом образуется тяжелая вода. Третий изотоп водорода называют *тритием*, и в природе он не встречается.

Ядра с одинаковыми массовыми числами A , но с различными зарядами числами Z называются изобарами (т. е. одинаково тяжелыми).

Сейчас известно, что все химические элементы обладают изотопами.



1. Как был открыт протон?
2. Каковы цели экспериментов Чедвика?
3. Что называется массовым числом?
4. Почему в природе не встречаются нейтроны в свободном состоянии?
5. Что называют нуклонами и нуклидами?
6. В чем заключается основное отличие изотопов химического элемента? Сколько протонов и нейтронов содержится в 1 г алюминия?
7. Что называют изобарами?



Упражнение 16

1. Определите состав ядра в атомах бериллия, кремния и брома.
2. Определите химические элементы, в ядрах атомов которых содержатся 7 протонов и 7 нейтронов, 51 протон и 71 нейтрон, 101 протон и 155 нейтронов.
3. Ядра каких элементов получим, если в изотопах ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{16}_8\text{O}$ заменить протоны нейтронами, а нейтроны — протонами?

Ответ: ${}^3_1\text{H}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{16}_{10}\text{Ne}$.

4. Сколько электронов, протонов, нейтронов и нуклонов содержится в следующих нейтральных атомах: а) ${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{26}_{12}\text{Mg}$; б) ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$; в) ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$? Что объединяет каждую группу?

Ответ: а) изотопы; б) изобары.

§ 39. Энергия связи нуклонов в ядре



Ключевые понятия:

- ✓ ядерные силы
- ✓ энергия связи
- ✓ дефект массы
- ✓ магические числа

На этом уроке вы:

- узнаете как считать энергию связи ядра и графическую зависимость удельной энергии связи с массовым числом.



Ядерные силы. Из фундаментальных сил взаимодействия во Вселенной мы познакомились с двумя видами сил — гравитационными и электромагнитными. В 9 классе вы получили первые сведения о силах взаимодействия между нуклонами, составляющими атомное ядро. Известно, что между одноименно положительно заряженными протонами в ядре атома действуют громадные электростатические силы отталкивания: $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$.

В ядрах тяжелых элементов, например в ядре урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, имеются 92 протона. Силы отталкивания их друг с другом достигают нескольких тысяч ньютонов. Какая сила удерживает взаимно отталкивающиеся протоны, электрически нейтральные нейтроны в ядре? Из-за наличия

масс протонов и нейтронов можно было бы подумать, что их удерживает сила гравитационного взаимодействия $F_{\gamma} = G_1 \frac{m_p \cdot m_n}{r^2}$. Но расчеты показывают, что сила гравитационного притяжения между двумя протонами в ядре слабее силы их электростатического отталкивания: $\frac{F_{\gamma}}{F_{\text{эл}}} = \frac{1}{10^{36}}$.

Стабильность атомных ядер указывает на то, что в ядре действует особо мощная сила, природа которой резко отличается от известных до того времени сил. Силы, которые не дают разлететься нуклонам и обеспечивают их особо сильную связь, называются **ядерными силами**. В настоящее время свойства ядерных сил изучены экспериментально довольно хорошо.

1. На расстоянии $r = 10^{-15}$ м от центра протона ядерные силы превышают силы Кулона в 305 раз, а гравитационные силы — в 10^{38} раз. Ядерные силы относят к *сильным взаимодействиям* — самым интенсивным из всех четырех известных видов сил взаимодействия.

2. Ядерные силы *короткодействующие*. С увеличением расстояния они резко падают. На расстоянии $r > 3 \cdot 10^{-15}$ м ядерными силами можно пренебречь. Максимум сил притяжения между нуклонами приходится на $r = 1,41 \cdot 10^{-15}$ м. А на расстоянии $r < 0,5 \cdot 10^{-15}$ м между нуклонами появляются огромные силы отталкивания. Таким образом, ядерные силы являются *силами притяжения*.

3. Опыт показывает, что между парами протон — нейтрон, нейтрон — нейтрон и протон — протон ядерные силы взаимодействия во всех случаях одинаковы. Это означает, что *ядерные силы не зависят от наличия или отсутствия электрических зарядов у нуклонов*.

4. Ядерные силы обладают свойством *насыщенности*, которое указывает на то, что *в ядре нуклон взаимодействует не со всеми окружающими нуклонами, а только с близлежащими*.

5. Ядерные силы *не являются центральными* (кулоновские силы центральные).

6. Ядерные силы, или сильное взаимодействие в ядре атома, обеспечивают процессы, происходящие с очень большой интенсивностью. Они создают сильное взаимодействие между элементарными частицами. Благодаря сильному взаимодействию атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, устойчиво. *Они обеспечивают устойчивость ядер всех веществ на Земле*. Для объяснения свойств ядерного взаимодействия необходима его теория. Из-за особой сложности ядерных взаимодействий законченной количественной теории ядерных сил пока не существует.

Энергия связи нуклонов в ядре. Измерения показали, что заряд ядра равен сумме зарядов протонов в ядре. Точные измерения, проведенные

с помощью масс-спектрографа, показали, что масса ядра атома любого покоящегося химического элемента меньше суммы масс отдельных протонов и нейтронов, составляющих это ядро:

$$M_n < Z \cdot m_p + N \cdot m_n. \quad (39.1)$$

Куда исчезает разность масс? Ответ дает установленная Эйнштейном формула связи между массой и энергией: $E = mc^2$. Чтобы вырвать один нуклон из атомного ядра, необходимо совершить определенную работу против действия ядерных сил, т. е. сообщить ядру значительную энергию. *Минимальная энергия, необходимая для разложения атомного ядра на составляющие его нуклоны, называется энергией связи ядра.*

По закону сохранения энергии точно такая же энергия выделяется при соединении протонов и нейтронов в атомное ядро. *Разность масс, появляющаяся при образовании атомного ядра из нуклонов за счет работы ядерных сил притяжения, называется дефектом масс.* Дефект масс рассчитывается по формуле $\Delta M = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_n$. Теперь можно вычислить энергию связи ядра:

$$E_{св} = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_n) \cdot c^2. \quad (39.2)$$

Учитывая, что в ядерной физике используют атомную единицу массы (а.е.м.) и мегаэлектронвольты (МэВ) для энергии, формулу (39.2) перепишем в этих единицах:

$$E_{св} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_n) \cdot 931,5 \text{ МэВ}.$$

Таким образом, когда из отдельных нуклонов образуется ядро, выделяется энергия, равная энергии связи ядра $E_{св}$. Из-за выделения энергии масса ядра уменьшается на величину дефекта массы:

$$\Delta M = \frac{E_{св}}{c^2}.$$

Энергия связи ядра является одной из важнейших величин, характеризующих стабильность ядра. Наряду с ней в ядерной физике используют понятие *удельная энергия связи*.

Удельной энергией связи называется отношение энергии связи ядра к массовому числу A , т.е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$E_{у.св} = \frac{E_{св}}{A}. \quad (39.3)$$

Удельные энергии связи в различных атомах различны. Зависимость удельной связи нуклонов в ядре от массового числа A показана на рисунке 39.1. С ростом массового числа A удельная энергия связи начинает расти от значения $1,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ для ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ до значения $8,8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ для изотопа железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$. Ядра элементов с максимальными удельными энергиями связи являются самыми стабильными. Далее с

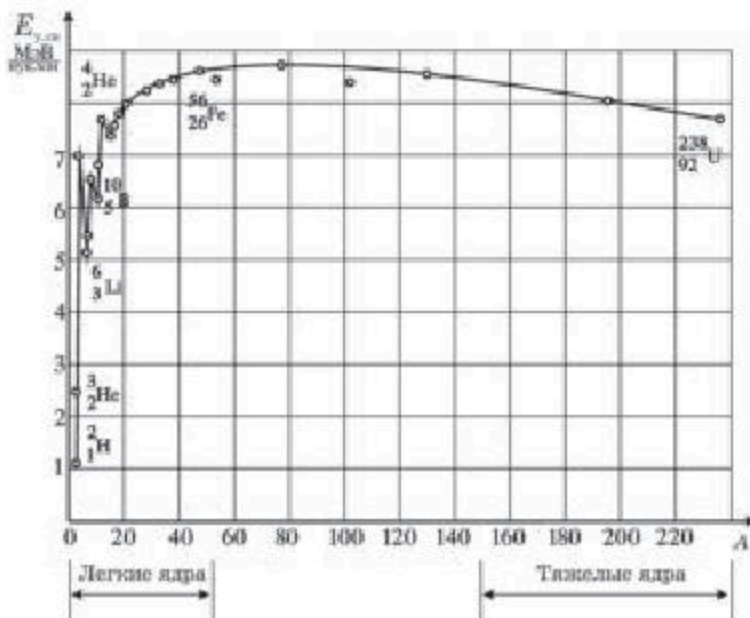


Рис. 39.1

ростом массового числа A удельная энергия связи начинает уменьшаться, например, для протона урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ удельная энергия связи:

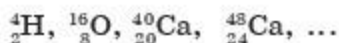
$$E_{y.св} = 7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}} .$$

Уменьшение удельных энергий связи нуклонов у тяжелых элементов вызвано увеличением числа протонов, а это, в свою очередь, приводит к увеличению кулоновских сил отталкивания между ними. Следует заметить, что энергия связи нуклонов в ядре в сотни тысяч раз больше энергии связи электронов в атоме.

Уменьшение удельных энергий связи у легких элементов связано с поверхностными явлениями. У нуклонов, расположенных ближе к поверхности ядра, по сравнению с нуклонами внутри ядра меньше соседних нуклонов, с которыми они взаимодействуют, так как ядерные силы короткодействующие. Поэтому у нуклонов, расположенных на поверхности ядра, удельная энергия связи меньше, чем у нуклонов, расположенных внутри ядра. У малых по объему ядер большая часть нуклонов расположена на поверхности ядра, поэтому у легких ядер удельная энергия связи мала.

Уменьшение удельной энергии связи у тяжелых ядер ($Z > 82$) связано с ростом числа протонов, что ведет к усилению кулоновских сил отталкивания. Значит, ядра тяжелых элементов являются менее устойчивыми. Кулоновские силы стараются разрушить ядро. Ядра, число протонов или нейтронов которых равно так называемым *магическим числам* 2,

8, 20, 24, 50, 82, 126, являются более устойчивыми. А если числа и протонов, и нейтронов являются магическими числами, то такие ядра называются *дважды магические ядра*, которые очень устойчивы:



Устойчивость магических ядер можно объяснить с помощью оболочечной модели ядра.



1. Какие силы удерживают нуклоны в ядре?
2. Каковы главные особенности ядерных сил?
3. Что называется дефектом массы?
4. Что характеризует энергия связи ядра?
5. Что называется удельной энергией связи?
6. Почему ядро цинка более устойчиво, чем ядро урана?



Упражнение 17

1. Дефект массы ядра бора ${}^{11}_5\text{B}$ выразите в килограммах и атомных единицах массы.

Ответ: 0,08186 а.е.м., $1,359 \cdot 10^{-28}$ кг.

2. Найдите энергию связи ядра гелия ${}^4_2\text{He}$.

Ответ: 28,3 МэВ.

3. Найдите энергию связи ядра лития ${}^7_3\text{Li}$.

Ответ: 39,3 МэВ.

4. Какую минимальную работу надо совершить, чтобы разложить ядро кальция ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ на протоны и нейтроны?

Ответ: 3421 МэВ.

5. Рассчитайте удельную энергию связи нуклонов в ядре лития ${}^6_3\text{Li}$.

Ответ: $5,33 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

6. Рассчитайте удельную энергию связи нуклонов в ядре железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$.

Ответ: $10,3 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

7. Рассчитайте удельную энергию связи нуклонов в нуклиде урана ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Ответ: $7,68 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

§ 40. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность



Ключевые понятия:

- ✓ ядерная реакция
- ✓ составные ядра
- ✓ искусственная радиоактивность
- ✓ экзотермическая реакция
- ✓ эндотермическая реакция

На этом уроке вы:

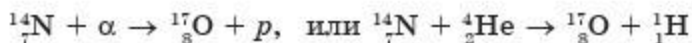
- научитесь использовать законы сохранения массового и зарядового числа при написании ядерных реакций.



Диапазон ядерных реакций широк: как правило, к ним относят любые явления, возникающие при столкновениях с участием ядерных взаимодействий между двумя или более элементарными частицами. Ясно, что столкновения с участием ядер также относятся к ядерным реакциям. Иногда под *ядерными реакциями* понимают лишь такие превращения с участием ядер. В ядерной физике изучают как ядра, так и элементарные частицы, поэтому понятие *ядерная реакция* используют в более широком смысле.

Превращения, возникающие при взаимодействии атомного ядра с другими ядрами, элементарными частицами и γ -квантами, называются ядерными реакциями. Ядерную реакцию записывают как $a + A \rightarrow B + b$ или в краткой форме как $A(a, b)B$. Здесь A — начальное ядро, или мишень-ядро; a — бомбардирующая частица; B — производное ядро; b — частица, выделившаяся из ядра.

Как уже отмечалось в § 37, первую ядерную реакцию осуществил Э. Резерфорд. В 1919 г., бомбардируя α -частицами ядро азота, он получил ядро кислорода, тем самым осуществив первую ядерную реакцию:



Известно, что и при естественном радиоактивном распаде ядро атома превращается в производное ядро. И при ядерной реакции происходят такие же процессы. При внешней схожести их главное различие состоит в том, что радиоактивный распад происходит без внешних воздействий, самопроизвольно, а ядерная реакция осуществляется под воздействием бомбардирующей частицы.

Закон сохранения энергии в ядерных реакциях. В ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и числа нуклонов. Используя законы сохранения, можно заранее предсказать, как будут проходить ядерные реакции.

Механизм ядерной реакции. Для осуществления ядерной реакции необходимо, чтобы частицы или ядра достигли области ядерных взаимодействий, т. е. они должны сблизиться до расстояния порядка 10^{-15} см. Для того чтобы положительно заряженная частица или ядро приблизилось к ядру-мишени, следует иметь достаточную кинетическую энергию для преодоления кулоновских сил отталкивания. Таким незаряженным частицам, как нейтрон, нет необходимости иметь большую кинетическую энергию, поэтому открытие нейтрона стало поворотным в ядерных исследованиях.

Энергию от десятков МэВ до сотен ГэВ, необходимую для осуществления реакции, заряженные частицы и атомные ядра получают в процессе ускорения в электрических или магнитных полях, специальных ускорителях заряженных частиц (циклотронах, синхрофазотронах и т. д.).

Когда энергия бомбардирующих частиц не слишком высока, реакция проходит, как предположил Н. Бор в 1936 г. при объяснении механизма ядерных реакций, в два этапа. Сначала при столкновении падающей частицы с ядром-мишенью ядро захватывает ее (рис. 40.1). В результате этого образуется возбужденное *составное ядро*. Вследствие слитного взаимодействия энергия возбуждения ядра быстро распределяется между всеми нуклонами. Теперь энергии каждого нуклона недостаточно для выхода из ядра. В процессе взаимодействия нуклоны начинают обмениваться энергией друг с другом. Вдруг в какой-то момент у одного или группы нуклонов оказывается энергия, которая больше, чем энергия связи ядра. Поэтому начинается второй этап ядерной реакции, во время которого составное ядро распадается.

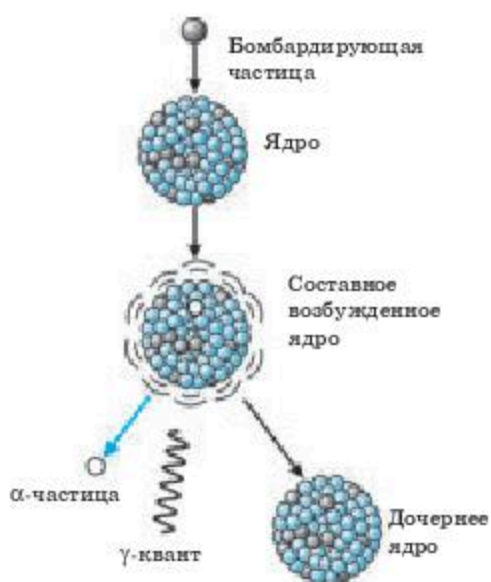


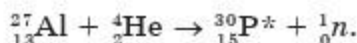
Рис. 40.1

Распад ядра может быть различным: *протонным, нейтронным, γ-квантовым* и др. Такие типы ядерных реакций происходят в процессе бомбардировки ядер-мишеней протонами, дейтронами (ядра тяжелого водорода), α-частицами и многозарядными ионами тяжелых элементов.

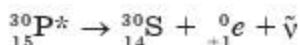
Искусственная радиоактивность. В процессе ядерных реакций появляются радиоактивные ядра, которые в природе вообще не существуют. Радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций, открыли в 1934 г. французские физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Они назвали это явление *искусственной радиоактивностью*.

Бомбардируя ядра алюминия, бора и других легких элементов и изучая продукты реакции с помощью камеры Вильсона в магнитном поле, они констатировали вылет позитронов, который продолжался и после прекращения бомбардировок α -частицами. Но их число со временем уменьшалось по закону радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$. Так было открыто явление *искусственной радиоактивности*.

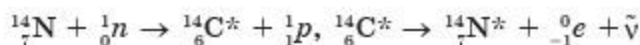
Открытие искусственной радиоактивности осуществилось с помощью следующей реакции:



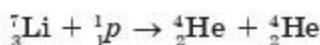
Радиоактивный изотоп фосфора оказался источником β^- -лучей. Его ядро испускает позитрон и электронное нейтрино:



Напишем реакцию, реализуемую при бомбардировке ядра β^- -радиоактивного азота нейтроном:



При бомбардировке быстрыми протонами ядра лития впервые осуществилась реакция распада его ядра:



В последнее время открыт еще один вид радиоактивности — *протонная радиоактивность*. В этом процессе из ядра самопроизвольно вылетает протон.

Область применения искусственных радиоактивных изотопов достаточно широка: медицина, промышленность, военные цели, долговременные источники тока и т. д.

Преобразование энергии в ядерных реакциях. В ядерных реакциях ядерные превращения сопровождаются изменением внутренней энергии, т. е. энергии связи. Используя закон взаимосвязи массы с энергией, можно рассчитать изменения энергии в ядерных реакциях. Напишем закон сохранения энергии для ядерных реакций: $E_{01} + E_{к1} = E_{02} + E_{к2}$, где E_{01} и E_{02} — энергии покоя системы до и после реакции; $E_{к1}$ и $E_{к2}$ — соответственно их кинетические энергии.

Чтобы описать энергии реакции, протекающей по схеме $A + a \rightarrow B + b$, воспользуемся формулой:

$$E_{01} = M_A c^2 + m_a c^2; E_{к1} = E_{кА} + E_{ка}; E_{02} = M_B c^2 + m_b c^2; E_{к2} = E_{кВ} + E_{кб}.$$

$$\text{После преобразований получим: } \Delta E = E_{01} - E_{02} = E_{к2} - E_{к1}.$$

Разность энергии связи частиц и ядер до реакции и после реакции называется энергетическим выходом ядерной реакции. Если $\Delta E > 0$, то во время реакции выделяется энергия, за счет энергии покоя кинетической энергии продуктов реакции.

тическая энергия продуктов реакции растет. *Изменение кинетической энергии во время ядерной реакции равно изменению энергии покоя частиц и ядер, участвующих в ядерной реакции.* Такая реакция называется *экзотермической*. А если $\Delta E < 0$, то реакция проходит с поглощением энергии, за счет уменьшения кинетической энергии энергия покоя (масса) повышается. Такая реакция называется *эндотермической*.

Во время ядерной реакции выделяется огромная энергия. Повышение безопасности и эффективности применения ядерной энергии на благо человечества является одной из сложных проблем, стоящих перед современной наукой.



1. Что называется ядерной реакцией?
2. Напишите уравнение ядерной реакции. Какие законы сохранения выполняются во время ядерной реакции?
3. Есть ли разница между естественной радиоактивностью и ядерной реакцией?
4. Объясните механизм ядерной реакции.
5. Какими частицами выгодно осуществлять ядерные реакции?
6. Что называется энергией ядерной реакции?
7. Почему во время ядерной реакции выделяется огромная по сравнению с химической реакцией энергия?
8. Как получают искусственную радиоактивность?

Примеры решения задач

1. При бомбардировке ядер бора (${}^{11}_5\text{B}$) протонами появляются ядра бериллия (${}^8_4\text{Be}$). Напишите уравнение реакции. Энергия в этой реакции выделяется или поглощается?

<p>Дано:</p> $M_{{}^{11}_5\text{B}} = 11,0931$ а.е.м. $M_{{}^1_1\text{H}} = 1,00783$ а.е.м. $M_{{}^8_4\text{Be}} = 8,00538$ а.е.м. $M_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260$ а.е.м. ΔE — ?	<p>Решение. ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} = {}^8_4\text{Be} + {}^A_Z\text{X}$. По закону сохранения заряда: $5 + 1 = 4 + Z$; $Z = 2$; по закону сохранения массового числа: $11 + 1 = 8 + A$; $A = 4$. Значит, ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$. Напишем выход энергии реакции: $\Delta E = E_{01} - E_{02}$, или $\Delta E = [(M_{\text{B}} + M_{\text{H}}) - (M_{\text{Be}} + M_{\text{He}})] \cdot 931,5$ МэВ.</p>
--	---

Подставим численные значения:

$\Delta E [(11,00931 + 1,00783) - (8,00531 + 4,00260)] \cdot 931,5$ МэВ = $= 0,00923 \cdot 931,5$ МэВ $\approx 8,6$ МэВ. В результате реакции выделяется $\Delta E = 8,6$ МэВ энергии.

2. Найдите минимальную энергию γ -кванта, достаточную для осуществления реакции: ${}^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n}$.

Дано:

$$M_{\text{H}} = 2,01410 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{\text{n}} = 1,00866 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{\text{p}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta E_{\gamma} = ?$$

Решение. $\Delta E_{\gamma} = [M_{\text{H}} - (M_{\text{n}} + M_{\text{p}})] \cdot 931,5 \text{ МэВ,}$

$$\Delta E_{\gamma} = [2,01410 - 2,01649] \cdot 931,5 \text{ МэВ.}$$

 $\Delta E_{\gamma} = -2,2 \text{ МэВ,}$ энергия поглощается.Значит, энергия γ -кванта должна быть равной $\Delta E_{\gamma} = -2,2 \text{ МэВ.}$ 

Упражнение 18

1. В результате захвата нейтрона ядром азота ${}^{14}_7\text{N}$ образуются неизвестный элемент и α -частица. Запишите реакцию и определите неизвестный элемент.

Ответ: ${}^{11}_5\text{B.}$

2. Рассчитайте энергетический выход ядерной реакции: ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_1\text{H}$

Ответ: 2,3 МэВ.

3. Поглощается или выделяется энергия в следующей ядерной реакции?

*Ответ:* 15 МэВ.

4. Энергия эндотермической реакции ${}^{17}_8\text{O} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{17}_7\text{N}$ равна $\Delta E = -7,89 \text{ МэВ.}$ Зная массы нейтральных атомов из таблицы, определите массу изотопа азота.

Ответ: 17,00899 а.е.м.

§ 41. Деление тяжелых ядер



Ключевые понятия:

- ✓ деление ядер
- ✓ капельная модель ядра
- ✓ спонтанное деление

На этом уроке вы:

- на основе капельной модели ядра узнаете о реакции деления ядер.

Среди ядерных реакций особо важное значение имеет деление тяжелых ядер, особенно урановых, под воздействием внешних факторов. Причина этого в том, что в атомном ядре сосредоточена колоссальная по мощности энергия. Внутреннюю энергию ядра можно выделить двумя путями: 1) реакцией деления тяжелых ядер; 2) реакцией синтеза легких ядер.

Реакция деления урановых ядер. Исследовательские работы по изучению искусственной радиоактивности в результате реакции при бомбардировке нейтронами атомных ядер были начаты Э. Ферми в 1934 г.

Во время бомбардировки нейтронами ядер урана и Жолио-Кюри, и П. Савич в 1938 г. обнаружили, что одним из продуктов ядерных реакций было ядро атома лантана (La). В том же году немецкие физики О. Ган и Ф. Штрассман во время бомбардировки нейтронами ядер урана установили, что появляются два новых, вдвое легче урана, элемента: *барий* Ba и *криптон* Kr, расположенные в середине таблицы Менделеева. Эти результаты в 1939 г. английским ученым О. Фришем и австрийской ученой Л. Мейтнер были объяснены тем, что, захватив нейтрон, ядро урана делится на два осколка. Эти явления назвали *делением ядер*.

Механизм деления ядер. В 1939 г. Я. Френкель, Н. Бор и Дж. Уиллер для объяснения механизма деления ядер предложили “капельную модель ядра”. Нуклиды можно принять как несжимаемую каплю заряженной жидкости (рис. 41.1). Ядро урана-235 по форме напоминает шар. Поглотив нейтрон, ядро (1) превращается в составное ядро (2). Получив избыток энергии за счет кинетической энергии и энергии связи, составное ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (3). При этом его объем не изменяется, а площадь поверхности растет. Поверхностная энергия жидкости прямо пропорциональна площади ее поверхности. Поверхностная энергия

увеличивается, деление энергетически невыгодно. Поэтому поверхностные силы стараются придать жидкости первоначальную шаровидную форму. Кулоновские силы отталкивания между протонами, наоборот, стремятся еще более вытянуть ядро.

Если растет расстояние между нуклонами, значит, кулоновские силы отталкивания уменьшаются, и им было бы выгодно разделиться. Ядро начинает интенсивно колебаться, и если энергия возбуждения повышается, то кулоновские силы отталкивания начинают превышать силы притяжения между нуклонами. В результате ядро делится на два осколка, которые под действием силы отталкивания разлетаются с большими скоростями ($\frac{1}{30}$ с).

Деление ядра происходит из-за превышения массы покоя ядра над суммой масс покоя осколков, появляющихся при делении ядра. Выделяется энергия,

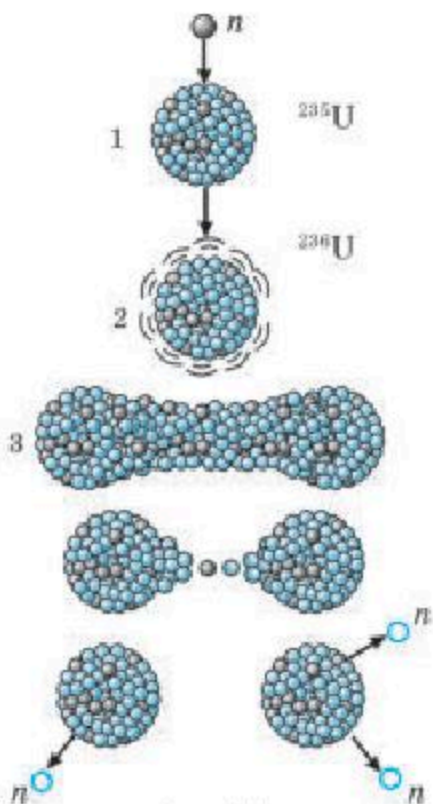
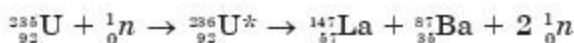
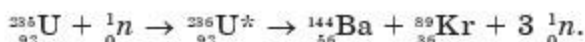


Рис. 41.1

эквивалентная уменьшению массы покоя. Полная масса сохраняется, так как массы осколков, движущихся с огромными скоростями, превышают их массы покоя. Так как у тяжелых ядер избыток числа нейтронов, то при делении ядер наряду с осколками вылетают и нейтроны. Этот факт имел большое значение. При делении каждого ядра выделяются два или три нейтрона. Напишем реакцию деления ядра урана-235:



или



Здесь ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ — возбужденное составное ядро.

Удельная энергия связи ядра урана $7,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, а осколков — $8,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. Разность удельных энергий связи $0,9 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. Значит, при делении одного ядра урана выделяется энергия 200 МэВ. Прямые измерения показали правильность расчетов. Большая часть освобожденной энергии (≈ 165 МэВ) — это кинетические энергии осколков, остальную часть уносят нейтроны и появляющиеся при делении γ -кванты.

Энергии свободных нейтронов лежат в широком диапазоне — от незначительной — $5 \cdot 10^{-3}$ эВ до нескольких миллионов эВ. Массы осколков деления в большинстве случаев соотносятся как 2 : 3. У осколков образуется избыток нейтронов, поэтому они высоко-радиоактивны.

После нескольких β^- -распадов образуется ядро стабильного изотопа. Русские физики Г. Флеров и К. Петражак в 1940 г. открыли *спонтанное деление ядер урана*. Ядро урана может делиться самопроизвольно, т. е. без внешних воздействий — бомбардировок нейтронами.

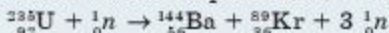


1. Какую реакцию называют делением ядер?
2. Как можно объяснить деление урана на основе "капельной модели ядра"?
3. Почему при делении ядра урана выделяется такая огромная, порядка 200 МэВ, энергия?
4. Почему при делении ядра вылетают несколько нейтронов?
5. Почему осколки подвергаются β^- -распадам? После скольких β^- -распадов осуществится преобразование ${}_{56}^{143}\text{Ba} \rightarrow {}_{50}^{143}\text{Na}$?



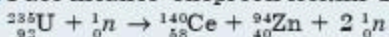
Упражнение 19

1. Рассчитайте энергетический выход ядерной реакции:



Ответ: ≈ 188 МэВ.

2. Рассчитайте энергетический выход следующей ядерной реакции:



Ответ: ≈ 208 МэВ.

3. При делении одного ядра урана-235 на два осколка выделяется 208 МэВ энергии. Какое количество керосина должно сгореть, чтобы выделилось столько же энергии, сколько выделяется при делении 1 г урана-235? Удельная теплота сгорания керосина $4,3 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Ответ: 2 т.

§ 42. Цепные ядерные реакции



Ключевые понятия:

- ✓ цепные реакции деления
- ✓ замедлители
- ✓ тепловые нейтроны
- ✓ коэффициент размножения
- ✓ критическая масса
- ✓ атомная бомба

На этом уроке вы:

- поймете природу ядерного синтеза и естественного радиоактивного распада.



Деление тяжелых ядер под воздействием нейтронов имеет важную особенность: при ядерной реакции деления высвобождается несколько нейтронов. Например, при делении каждого ядра урана-235 в среднем выделяются два-три нейтрона, которые называют *производными*, или *вторичными нейтронами*. Теперь представьте, что эти нейтроны, выделившиеся при делении, поделят соседние два ядра, а выделившиеся из двух ядер нейтроны совершат деление соседних четырех ядер и т. д. Так будет продолжаться, и число нейтронов, и число подвергнутых делению ядер будет лавинообразно возрастать. *Явление лавинообразного роста числа деления ядер называется цепной реакцией деления ядер.*

Цепной ядерной реакцией называется процесс, в котором определенная ядерная реакция вызывает такие же последующие реакции.

На рисунке 42.1 показано развитие цепной реакции деления уранового ядра. Для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые тяжелые ядра, способные к делению с помощью нейтронов. Причина заключается в том, что энергия большинства нейтронов, освобожден-

ных при делении, равна порядка 1—4 МэВ. В этот момент их скорости достигают величины $v = 10^7$, поэтому их называют **быстрыми нейтронами**.

Природный уран является в основном смесью двух изотопов: $^{238}_{92}\text{U}$. Изотоп урана-238 составляет 99,3% этой смеси, а остальную часть — 0,7% — изотоп урана-235. Ядра изотопа урана-238, поглощая нейтроны, необязательно делятся. Обычно лишь один из пяти нейтронов вызывает деление.

Чтобы повысить вероятность совершения реакций деления с малочисленными ядрами урана-235, необходимо уменьшить скорость быстрых нейтронов. Это осуществляется с помощью веществ, называемых **замедлителями**. Хорошими замедлителями являются обыкновенная вода, тяжелая вода (H_2O) и графит. При столкновении с их ядрами энергии нейтронов уменьшаются. Нейтроны со скоростями, равными скорости теплового движения молекул при комнатной температуре $v \approx 2000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, называются **тепловыми (медленными) нейтронами**. Вероятность распада ядер урана-235 с помощью тепловых нейтронов в сотни раз выше вероятности деления с помощью быстрых нейтронов. Для непрерывности цепной ядерной реакции необходимо, чтобы среднее число вторичных нейтронов во времени не изменялось. Но не все нейтроны, которые появились в процессе деления, вызовут ядерные реакции деления, некоторые захватывают ядра, не производя деления, некоторые рассеиваются в окружающую среду.

Физическую величину, характеризующую степень размножаемости нейтронов, называют коэффициентом размножения нейтронов. Коэффициентом k размножения нейтронов называется отношение числа нейтронов в любом поколении к числу нейтронов в предыдущем поколении.

Если $k = 1$, то число нейтронов остается неизменным во времени, и цепная реакция протекает стационарно и равномерно. А если $k > 1$, то нарастает скорость цепных реакций, и произойдет ядерный взрыв. Если $k < 1$, то число нейтронов со временем падает, и цепная реакция гаснет.

Критическая масса. Чтобы цепная реакция проходила непрерывно в постоянном темпе, необходимо учесть еще одно обстоятельство. Существует определенная масса урана, при которой цепная реакция проходит равномерно. Если масса урана меньше, чем эта масса, то нейтроны, не

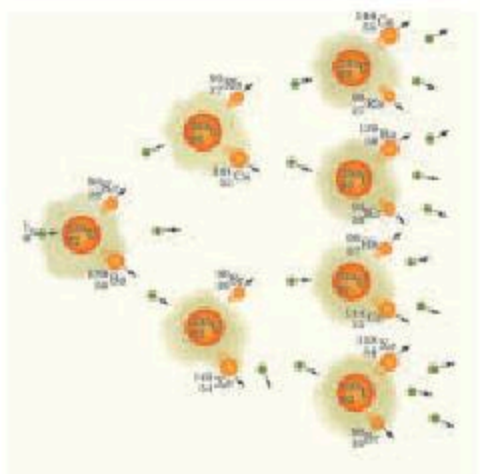


Рис. 42.1

встречая на своем пути достаточного количества ядер, рассеиваются в окружающей среде. Цепная реакция гаснет.

Минимальную массу делимого вещества (урана), обеспечивающую постоянное равномерное протекание цепной ядерной реакции, называют критической массой. Для чистого урана-235 критическая масса близка к 50 кг. Радиус шара, сделанного из такой массы урана плотностью 18950 кг/м^3 , приблизительно равен 8,5 см. Для плутония-239 (для массы размером с теннисный шар) критическая масса 5,6 кг.

Атомная бомба (А-бомба). Результатом неуправляемой цепной ядерной реакции будет ядерный взрыв, освобождающий немислимо мощную энергию. Для осуществления такого взрыва служит атомная бомба, в которой применяют чистый уран-235 или плутоний-239. В бомбе металлический уран состоит из двух частей, каждая из которых по массе меньше критической, поэтому цепная ядерная реакция не может осуществиться.

С помощью обычного взрывчатого вещества обе части урана резко объединяют, что способствует быстрой цепной ядерной реакции — бомба взрывается. За мгновение температура достигает миллионов градусов, появляется ослепительно яркий свет. Уран и другие вещества превращаются в газы. Сверхтемпературный газовый шар быстро увеличивается, сжигает и разрушает все вокруг себя. Продукты реакции при атомном взрыве высокорadioактивны и опасны для окружающей среды.

Первые атомные бомбы были созданы в 1945 г. в США и сброшены в том же году на города Японии: 6 августа на Хиросиму и 9 августа на Нагасаки. В атомной бомбе, сброшенной на Хиросиму, масса урана была приблизительно равна 1 кг. Освобожденная энергия эквивалентна взрыву 20000 т тринитротолуола.

Единственный путь избежать ядерного столкновения и сохранить жизнь на Земле — это уничтожение всего запаса ядерных боеприпасов.

Республика Казахстан полностью избавилась от ядерного оружия и является одним из мировых лидеров по нераспространению ядерного оружия.



1. Как осуществляется цепная ядерная реакция?
2. На какие типы делятся нейтроны по своим энергиям?
3. Почему не происходит цепная ядерная реакция в уране-238?
4. Что называется коэффициентом размножения нейтронов? Каково его влияние на протекание цепной ядерной реакции?
5. Что называется критической массой?
6. Какую опасность представляет атомная бомба для человечества?



Подготовьте эссе на тему "Семипалатинский полигон".

§ 43. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации



Ключевые понятия:

- ✓ радиация
- ✓ Грэй
- ✓ Зиверт
- ✓ радиационный фон

На этом уроке вы:

- поймете природу, свойства и биологическое действие α , β , γ — излучений.



Радиоактивные лучи, потоки нейтронов оказывают вредное влияние на окружающую среду, особенно на живые организмы. *Радиоактивные лучи называют ионизирующими лучами*, или коротко — *радиацией*. Обладающие определенной энергией эти лучи и частицы ионизируют молекулы и атомы тел. Изменяется их химическая активность, клетки подвергаются мутации, повреждаются гены в хромосомах, вызывая различные физиологические отклонения.

Если излучение большой интенсивности, то оно вызывает злокачественные опухоли, лучевую болезнь, может привести к летальному исходу. Огромное влияние оказывает облучение на наследственность, поражая гены в хромосомах. Опасность радиации заключается в том, что облучение даже высокой степени проявляется не сразу. Ионизирующие лучи в первую очередь действуют на нервную систему, в результате чего нарушается кроветворная способность. Затем наступает поражение клеток пищеварительного тракта, других органов. Ограниченные дозы радиоактивных лучей, особенно γ -лучей, применяют для уничтожения клеток злокачественных опухолей.

Биологическое влияние ионизирующих лучей характеризуется особыми величинами. Чем больше энергия, полученная клетками живых организмов, тем больше активность химических реакций, и повреждение усиливается. Поэтому надо уметь правильно определять дозу энергии, полученной живым организмом вследствие радиации.

Поглощенной дозой испускаемых лучей называется отношение поглощенной энергии к массе облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}.$$

В системе СИ единицей измерения поглощенной дозы излучения является 1 Гр (*грэй*).

Когда облученное вещество получает 1 Дж энергии, поглощенная часть испущенного излучения равняется одному грэю (1 Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

На практике используют величину, называемую *экспозиционной дозой*. Она измеряется по ионизационному эффекту рентгеновских и γ -лучей. Ее внесистемная единица **1Р (рентген)**:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

В дозиметрах радиация считается $1\text{Р} \approx 0,01 \text{ Гр}$. Влияние излучения на живые организмы зависит от его вида. Воздействие ионизирующих излучений принято сравнивать с биологическим влиянием рентгеновских и γ -лучей.

Влияние излучений на живые организмы характеризуют специальной величиной — *эквивалентной дозой*.

Эквивалентной дозой поглощения излучения называется произведение поглощенной дозы на коэффициент биологической эффективности:

$$D_{\text{экв}} = k \cdot D,$$

где k — коэффициент биологической эффективности, который определяют опытным путем. Для рентгеновских β^- и γ -лучей $k = 1$, для тепловых нейтронов $k = 2,3$, для быстрых нейтронов $k = 10,0$, для α -лучей $k = 20,0$. Единицей измерения эквивалентной дозы является *зиверт* — **1 Зв**.

Мы все время подвергаемся влиянию радиоактивных лучей. Источниками такой радиации являются: космические лучи; радиоактивные вещества на Земле, здания, в которых живем, рентгеновские установки, телевизоры, человеческое тело (в нашем организме содержится $0,01 \text{ г}$ радиоактивного калия — $^{40}_{13}\text{К}$). Их называют *естественным радиационным фоном*. За счет естественного радиационного фона человек получает дозу $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$. Для лиц, работающих с радиоактивными препаратами, годовая предельно допустимая доза составляет $0,05 \text{ Гр}$.

Защита от радиации. Люди, работающие на атомных электростанциях с радиоактивными изотопами, радиоактивными остатками, должны принять меры защиты от радиации. Учитывая, что интенсивность радиоактивных излучений обратно пропорциональна квадрату расстояния, необходимо держать работников на определенном расстоянии от опасных источников. Для защиты от рентгеновских и γ -лучей используют свинец, который хорошо их поглощает. Чтобы радиоактивные вещества не проникли через органы дыхания в организм человека, используют специальные защитные материалы.



1. В чем заключается опасность радиоактивных лучей для живых организмов?
2. Что называется поглощенной дозой? В чем она измеряется?
3. Что такое эквивалентная доза?
4. Вызывает ли болезни естественный радиационный фон?
5. Как защититься от радиации?

§ 44. Ядерный реактор. Ядерная энергетика



Ключевые понятия:

- ✓ ядерный реактор
- ✓ тепловыделяющий элемент
- ✓ регулирующие стержни
- ✓ бридеры
- ✓ ядерная энергетика

На этом уроке вы:

- познакомитесь со структурой и принципом работы ядерных реакторов;



*Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называется **ядерным реактором**. Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. под руководством Э. Ферми, а второй — в СССР в 1946 г. группой ученых во главе с И. В. Курчатовым.*

В настоящее время во всех развитых странах существуют установки с ядерными реакторами. Реакторы по своим мощностям и целям назначения делятся на:

- научно-исследовательские;
- промышленные, т. е. реакторы по производству радиоактивных изотопов;
- энергетические, преобразующие ядерную энергию в электрическую.

Ядерный реактор на тепловых нейтронах. Принципиальная схема и структура ядерного реактора с энергетической установкой показаны на рисунке 44.1. Любой ядерный реактор состоит из следующих основных частей:

- активная зона, где происходит цепная реакция;
- замедлитель нейтронов;
- теплоноситель, уносящий выделяемую энергию из активной зоны;
- отражатель нейтронов;
- стержни, регулирующие скорость цепных реакций;
- стальная защитная оболочка;
- железобетонная биологическая защита;
- автоматическая система управления.

В активной зоне реактора с тепловыми нейтронами в качестве ядерного горючего используют уран-235. В природном уране доля изотопа урана-235 составляет всего лишь 0,7%, поэтому, чтобы это количество довести до 5%, его обогащают. Приготовленные из обогащенного урана так называемые *тепловые элементы (ТЭ)* помещают в стальную, герметически закрытую трубку. Трубку с ТЭ помещают в *замедлитель нейтронов* — вода или *тяжелая вода*. В зависимости от типа реактора в качестве замедлителя используют и графит.

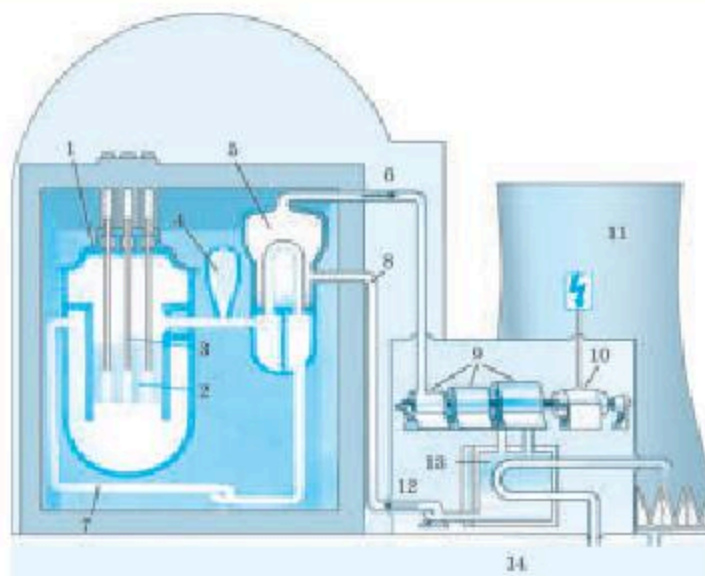


Рис. 44.1

- 1 — котел реактора; 2 — тепловыделяющий элемент (ТЭ); 3 — регулирующие стержни; 4 — регулятор давления; 5 — парогенератор; 6 — пар; 7 — первый контур; 8 — второй контур; 9 — турбины; 10 — генератор; 11 — градирня; 12 — вода; 13 — конденсатор; 14 — охладитель

Энергию, выделяемую во время реакции, удаляют с помощью теплоносителя. В основном в качестве теплоносителя используют обычную воду под высоким давлением. Высокое давление не дает воде закипеть. Хорошими теплоносителями являются *тяжелая вода, водяной пар, газ гелия, жидкий натрий*.

Активную зону окружают *бериллиевым слоем*, который уменьшает рассеивание нейтронов во внешнюю среду и отражает их. Снаружи закрывают стальным панцирем для защиты от сильно проникающих γ -лучей и нейтронов, а его в свою очередь — железобетоном толщиной в несколько метров. Скорость реакции меняется с помощью регулирующих стержней из *бора* или *кадмия*. Когда регулирующие стержни полностью введены в активную зону, реактор не работает. Основная часть нейтронов поглощается, цепная реакция не развивается. До того как начавшаяся цепная реакция не стабилизируется, регулирующие стержни постепенно вынимаются. Когда мощность реактора начинает превышать установленный уровень, регулирующие стержни автоматически вводятся в активную зону.

Цепная реакция на тепловых нейтронах показана на рисунке 44.2. Большая часть энергии, освобожденной на ТЭ во время цепных реакций, преобразуется в кинетические энергии осколков и нейтронов, а остальная — в электромагнитную энергию γ -квантов. Осколки и

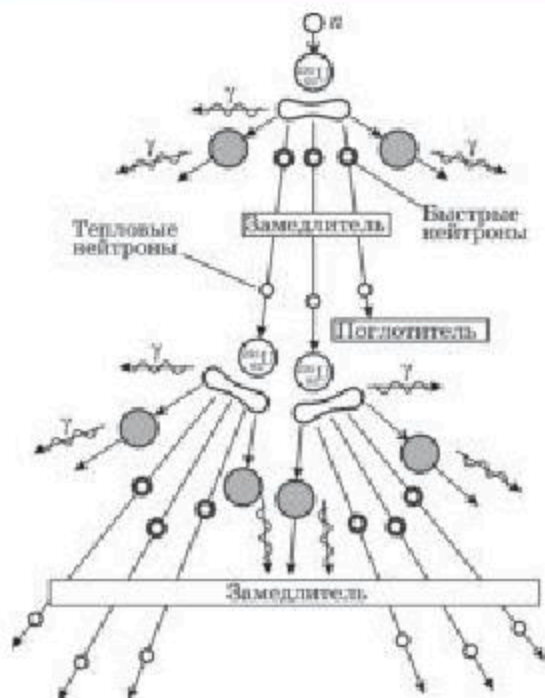


Рис. 44.2

нейтроны, проходя через воду, нагревают ее до высокой температуры (330°C). Высокотемпературную воду с помощью насоса приводят в движение по первому замкнутому контуру, состоящему из реактора, труб и теплообменника. В паровом генераторе во втором контуре вода превращается в пар. Пар под высоким давлением начинает вращать турбины, связанные с ротором электрогенератора.

Ядерная энергетика. Наиболее эффективным способом использования выделяемой энергии при ядерных цепных реакциях является преобразование ее в электрическую энергию. Это осуществляется с помощью реакторов на атомных электростанциях (АЭС). Первая атомная электростанция мощностью 5000 кВт была построена в 1954 г. в Обнинске. С 1971 г. в Казахстане (Ақтау) работают атомная электростанция с реактором на быстрых нейтронах и опреснитель морской воды. В развитых странах в связи с трудностями строительства гидроэлектростанций и уменьшением запаса органических источников топлива быстрыми темпами развиваются отрасли ядерной энергетики. По сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе, атомные имеют преимущества — они не загрязняют окружающую среду.

Однако ядерная энергетика оказывает вредное влияние на окружающую среду. Защита персонала АЭС от γ -излучений и потоков ней-

тронов требует особого внимания. Радиоактивное загрязнение крайне опасно. Существуют также проблемы радиоактивных отходов, возникающих при делении ядер, отработанных ТЭ, и т. д. Срок работы АЭС порядка 20 лет, после этого блоки, детали и все материалы, которые долгое время подвергались радиации, восстановить невозможно. Авария на Чернобыльской АЭС показала огромную опасность радиоактивных излучений. Все люди должны иметь представление об этой опасности и мерах защиты от нее.

Но, несмотря на все это, значение ядерной энергетики для человечества невозможно перечеркнуть. В настоящее время по повышению безопасности ядерных реакторов ведутся усиленные исследовательские изыскания.



1. Назовите основные части ядерного реактора и опишите их работу.
2. В каких целях в реакторах с тепловыми нейтронами используют замедлители нейтронов?
3. Как управляют цепными реакциями?
4. Что используют в качестве ядерного топлива в реакторах с тепловыми и быстрыми нейтронами?
5. Можно ли уменьшить критическую массу урана в реакторах?

Пример решения задачи

Мощность атомной электростанции с КПД 25% равна 1 млн. кВт. Определите массу изотопа урана-235, расходуемого за один год. При расщеплении одного ядра урана выделяется 200 МэВ энергии.

Дано:

$$P = 10^6 \text{ Вт}$$

$$t = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$$

$$E_0 = 3,2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Дж}}{\text{ядро}}$$

$$\eta = 0,25$$

$$M = 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

m — ?

Решение. Количество ядер находим по формуле определения количества молекул:

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где m — масса изотопа урана-235, расходуемого за один год; M — молярная масса изотопа. N_A — число Авогадро. Энергия, выделяемая при расщеплении:

$$E = E_0 \cdot N = E_0 \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A.$$

Энергия, подаваемая потребителю:

$$W = P \cdot t.$$

$$\eta E = W,$$

ИЛИ

$$\eta E_0 \frac{m}{M} N_A = P \cdot t,$$

$$\text{отсюда: } m = \frac{P t M}{\eta E_0 N_A} = \frac{10^9 \text{ Вт} \cdot 3,16 \cdot 10^7 \text{ с} \cdot 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{0,25 \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Дж}}{\text{ядро}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 1650 \text{ кг.}$$



Упражнение 20

1. Мощность атомной электростанции с КПД 20% 1000 МВт. Определите суточный расход массы изотопа урана-235.

Ответ: 5,3 кг.

2. Мощность атомной подводной лодки США “Наутилиус” 14,7 МВт, КПД — 25%. В качестве топлива используют обогащенный уран. При делении ядер 1 кг урана выделяется $6,9 \cdot 10^{13}$ Дж энергии. Какой запас топлива необходим для плавания атомной подводной лодки в течение года?

Ответ: 26,9 кг.

3. Вычислите КПД двигателей атомного ледокола, если его мощность $3,2 \cdot 10^4$ кВт, а атомный реактор расходует 200 г урана-235 в сутки. Вследствие деления одного ядра атома урана выделяется энергия 200 МэВ.

Ответ: $\eta = 17\%$.

Самое важное в главе 8

- В ядерной физике изучают *структуру атомного ядра*, его преобразования, рассматривают явления, происходящие в микромире.

- Э. Резерфорд, основываясь на экспериментальных данных, предложил *ядерную модель атома*. Размеры ядра оказались порядка 10^{-15} м.

- Резерфорд, бомбардируя α -частицами атомные ядра, впервые осуществил *искусственные превращения ядер*. В 1919 г. он открыл *протон*, а в 1932 г. Дж. Чедвик открыл вторую частицу, входящую в состав ядра, — *нейтрон*.

- В. Гейзенберг и Д. Иваненко предложили *протон-нейтронную модель ядра*. По этой модели ядро состоит из протонов и нейтронов, т. е. нуклонов: $A = Z + N$.

- *Короткодействующие ядерные силы удерживают в ядре нуклоны*.

- Энергия связи нуклонов в ядре является важнейшей характеристикой в ядерной физике. *Энергия связи равна энергии, которая необходима для разделения ядра на отдельные нуклоны*.

- В 1896 г. А. Беккерель открыл *явление естественной радиоактивности*. Радиоактивные элементы самопроизвольно испускают

α -, β - и γ -лучи. Природа этих лучей известна: *альфа-лучи* — это ядра атомов гелия; *бета-лучи* — поток электронов; *гамма-лучи* — очень коротковолновые электромагнитные излучения.

• *Закон самопроизвольного распада атомных ядер и закон радиоактивного распада* установил Резерфорд:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

Изменения ядер при взаимодействии друг с другом или с элементарными частицами называются *ядерными реакциями*. В процессе ядерных реакций происходит испускание или поглощение энергии.

Радиоактивные лучи при превышении определенной дозы представляют большую угрозу для живых организмов.

Раздел V. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Глава 9. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

§ 45. Основные достижения нанотехнологии, проблемы и перспективы разработки наноматериалов



Ключевые понятия:

- ✓ наноматериалы
- ✓ наноробот

На этом уроке вы:

- узнаете физические свойства наноматериалов и способы их получения;
- обсудите сферы применения нанотехнологии.



Нанотехнология — область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов разработки материалов (веществ) на атомном, молекулярном и супрамолекулярном (на уровне нескольких молекул) уровнях с целью получения особых и новых свойств. Как правило, для этого проводятся действия со структурами в пределах 1—100 нанометров, по крайней мере, в одном измерении. Например, известный **графен** представляет собой плоский наноматериал: два его измерения очень

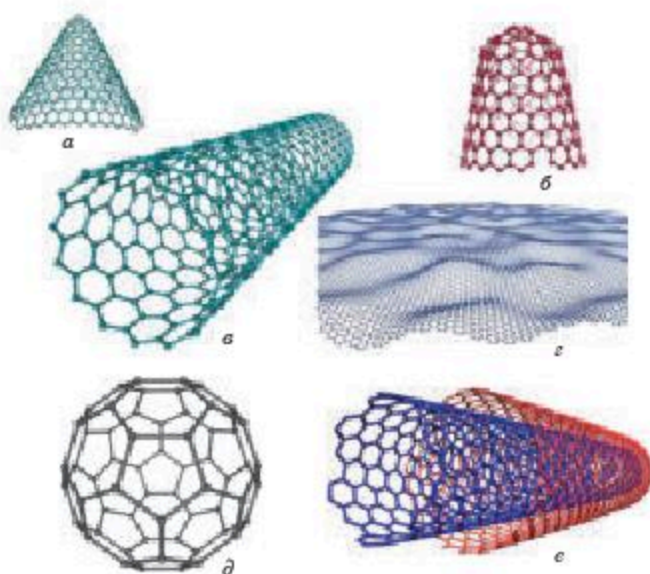


Рис. 45.1. а — нанокон, б — нанохорн, в — нанотрубка, г — графен, д — фуллерен, е — двухслойные нанотрубки

велики, а третье измерение одноатомное, то есть только одно измерение материала имеет наноразмеры, углеродные нанотрубки представляют собой линейные наноматериалы (два измерения имеют наноразмеры), а фуллерен — точечный наноматериал (все три измерения имеют наноразмер) (рис. 45.1). **Наноматериал** — это макроскопическое вещество, состоящее из наночастиц или изготовленное на основе нанотехнологий. Наночастица сильно отличается от макроскопического тела с одинаковым химическим составом основными физическим, химическим, оптическим и биологическим свойствами.

Приставка “нано”, в переводе с греческого означает карликовый, и в физике обозначает миллиардную долю ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Следует отметить, что в некоторых случаях добавление “нано” используется в значении “относительно малое, карликовое”: например, наноспутник — спутник, масса которого составляет несколько килограммов, а нанотираннус — карликовый тиранозавр, рост которого составляет один-два метра.

На рисунке 45.2 можно посмотреть различие предметов на наноуровне от предметов других размеров.

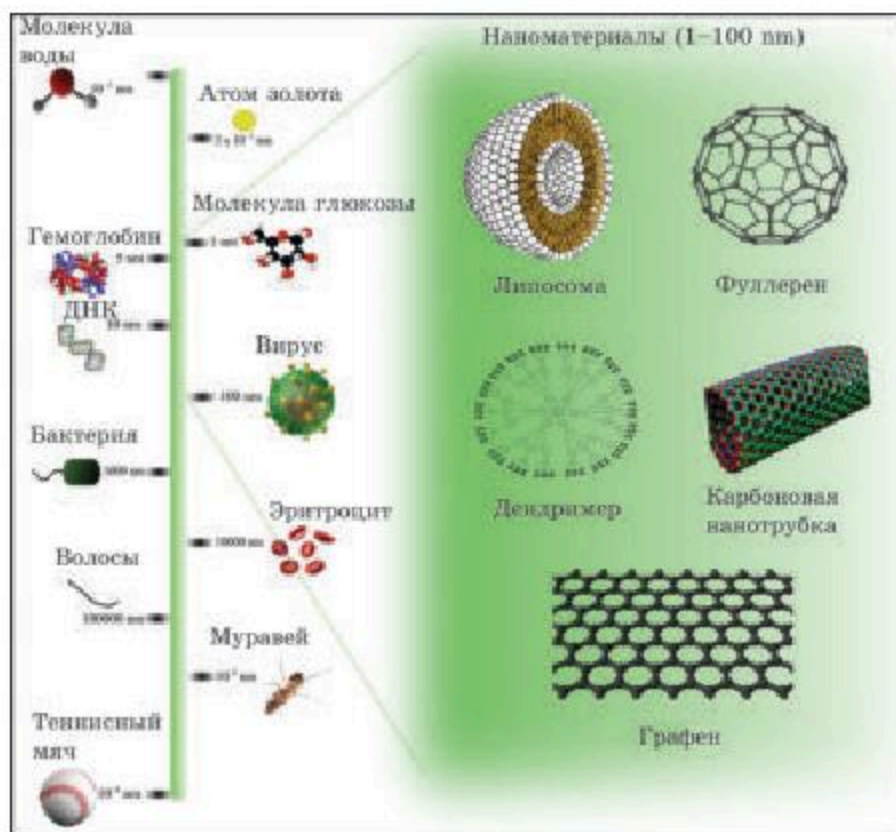


Рис. 45.2. Соотношение наноуровня к другим параметрам

Впервые о нанотехнологиях научно рассказал американский ученый Ричард Фейнман в своей лекции “There’s Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics” (Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики) 29 декабря 1959 года на собрании Американского Физического Общества в Калтехе. Но тогда не было термина нанотехнологии. Термин “нанотехнология” был впервые введен в 1974 году японским ученым Норио Танигучи. А понятие нанотехнологии в области науки стало формироваться с 1980 года. В 1981 году немецкий ученый Герд Карл Бинниг и швейцарский ученый Генрих Рорер разработали сканирующий туннельный микроскоп (рис. 45.3), позволяющий не только изображать атомы, но и производить с ними действия, что дало реальное средство для получения наноструктур. С этого времени началась эпоха нанотехнологии. Человечество начало ощущать применение нанотехнологий с начала 21 века. С тех пор развитые страны выделяют большое количество средств на исследования по разработкам в области нанотехнологий. Нанотехнология получила широкое применение в области физики, химии, биологии, медицины, электроники и сельского хозяйства, наноматериалы и наночастицы вошли в состав предметов повседневного потребления. В настоящее время передовой компанией по нанотехнологиям является корпорация Samsung с наибольшим количеством патентов в этой области. Эта ком-



Ричард Фейнман
(1918—1988)

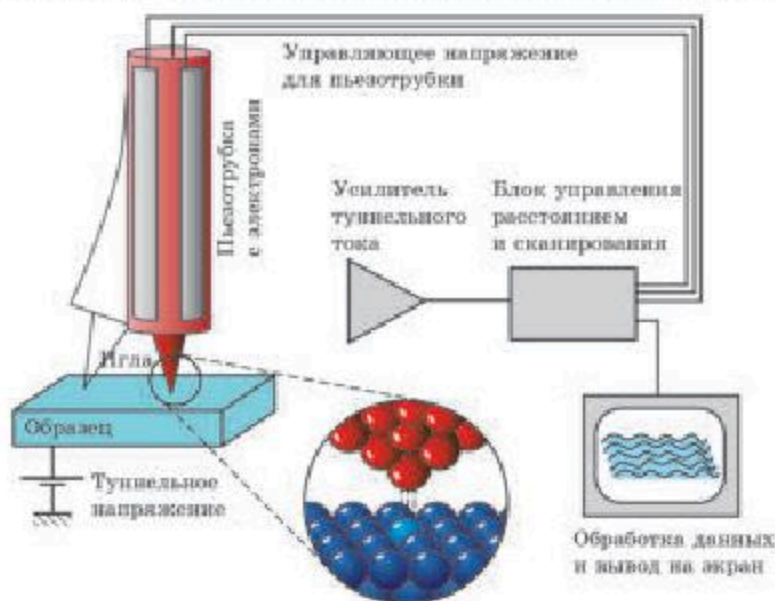


Рис. 45.3. Сканирующий туннельный микроскоп

пания объявила, что в 2021 году компания запустит в коммерческое применение новейшую на сегодняшний день (2019 г.) технологию производства процессора в 3 нм. Также в этой области лидируют компании (Корея), IBM (США) и Toshiba (Япония), научно-исследовательские организации США, Европейского союза, Китая, Японии, России.

Кроме пользы применения нанотехнологий, также возникает и опасность. Влияние наночастиц на живой организм разнообразно. Необходимо помнить, что при применении нанотехнологий может возникнуть опасность для здоровья человека. Наночастица оказывает различное действие в зависимости от размера, формы, концентрации и формы действия: с одной стороны — лечебные свойства, с другой — токсичные. Например, если фуллерен полезен для здоровья при смешивании с определенными маслами, то коллоид в очень малой концентрации воды будет токсичен для кожи и клеток почек. А большинство наночастиц из углеродных нанотрубок подвергают мутации живые организмы и вызывают апоптоз клеток. Поэтому при производстве наноматериалов разработаны правила предотвращения загрязнения окружающей среды, особое внимание уделяется разработке мер безопасности в отношении нанотехнологий со стороны международных организаций и государств. Нанотехнологические исследования в Казахстане ведутся практически во всех технических и исследовательских университетах. Например, Назарбаев университет, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, нанолaborатории при Карагандинском государственном университете им. Букетова проводят всесторонние научные исследования.



1. На каких свойствах вещества основана нанотехнология?
2. Чем отличаются методы нанотехнологий?
3. Могут ли наноматериалы быть большими?
4. Как наночастицы влияют на организм?
5. В каких областях может применяться производство нанороботов?

Самое важное в главе 9

Нанотехнология — область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов разработки материалов (веществ) на атомном, молекулярном и супрамолекулярном (на уровне нескольких молекул) уровнях с целью получения особых и новых свойств.

Наноматериал — это макроскопическое вещество, состоящее из наночастиц или изготовленное на основе нанотехнологий. Наночастица сильно отличается от макроскопического тела с одинаковым химическим составом основными физическим, химическим, оптическим и биологическим свойствами.

Раздел VI. КОСМОЛОГИЯ

Глава 10. КОСМОЛОГИЯ

§ 46. Астрономия, астрофизика и космология



Ключевые понятия:

- ✓ астрономия
- ✓ космология

На этом уроке вы:

- познакомитесь с основами науки, изучающей космос — круг изучения астрономии и взаимосвязи ее частей.



Современные достижения в исследовании законов природы привели к тому, что человек значительно углубил понимание природы и уже приблизительно определяет границы между многими науками. Основываясь на последних достижениях астрономии, его исследовательские объекты могут варьироваться от невидимой материи до живых организмов в космосе. Если физика — это наука, которая изучает самые основные наиболее общие и фундаментальные закономерности природы, то астрономию можно назвать наукой, изучающей Вселенную с использованием методов физики.

Слово Астрономия происходит от греческого слова “*астрон*” — звезда и “*номос*” — название, закон. В соответствии с рамками рассмотрения настоящей главы *астрономия* — наука, изучающая физическое строение, возникновение, движение и развитие небесных тел, их систем и всей Вселенной. Основные исследуемые объекты астрономии — Солнце, планеты и их спутники, метеорные тела, туманности, звезды, звездные скопления, галактики и другие космические объекты. Если рассматривать Землю как планету Солнечной системы, как небесное тело, то она также является объектом исследования астрономии. Одна из особенных задач исследования астрономии — поиск внеземной жизни и связь с внеземными цивилизациями. Этот вопрос является одним из самых актуальных, стоящих перед человечеством.

Основной метод исследования астрономии — наблюдение. Наблюдения проводятся в основном с помощью различных телескопов. В настоящее время в связи с развитием технологий, появлением мощных компьютеров значительно расширились возможности мониторинга и анализа электромагнитного излучения, спектрального анализа, фотосъемки и видеосъемки, детектирования электромагнитного излучения вне оптического диапазона. В связи с развитием космонавтики в астрономии появилась возможность экспериментировать. С помощью космических кораблей и искусственных спутников астрономы поднялись на новый уровень исследования космоса. Использование меж-

планетных космических кораблей в исследовании Солнечной системы позволило сделать в астрономии множество открытий. Еще один способ исследования небесных тел — это исследование космических лучей и метеоритов, попадающих на Землю.

Астрофизика занимается практически всеми проблемами, оставшимися от двух предыдущих частей.

В рамках астрономии очень динамично развивается Космология, которая имеет особое место, и в последнее время рассматривается как отдельное направление. Современная космология была основана после создания общей теории относительности Эйнштейна. *Космология изучает Вселенную в целом, его возникновение и развитие, геометрическую структуру, как возникло в нем вещество, природу темной энергии и темной материи и их место в развитии Вселенной.*

Научные исследования в области астрономии в нашей стране начались с наблюдений за полным затмением Солнца в сентябре 1940 года. В Алматы прибыли астрономы со всех уголков Советского Союза, чтобы наблюдать за полным затмением Солнца. При поддержке Первого Президента Казахской академии наук академика Каныша Имантаевича Сатпаева при Академии был создан Научный институт астрономии и астрофизики (позже переименован в институт астрофизики им. Фесенкова). Этот институт работает до настоящего времени и является основным учреждением страны, ведущим исследования по астрономии.

Астрофизический институт им. Фесенкова является основным научным учреждением в Казахстане, проводящим фундаментальные исследования в области астрономии и астрофизики. К научной работе АФИ относятся астрономические наблюдения, теоретические исследования и компьютерное моделирование. Основными областями теоретических исследований являются изучение активных ядер галактик на основе динамики звезд и астрофизических вычислений, небесной механики, численного моделирования, развитие космологической модели мира в молодом возрасте, изучение эволюции и возникновения структур во Вселенной, изучение природы черных материй и черной энергии.

Среди астрономических обсерваторий в Мире известны две наблюдательные обсерватории, расположенные в высокогорных горах вблизи Алматы (рис. 46.1, 46.2). Исследования в этих обсерваториях проводятся на телескопах, оснащенных новейшим оборудованием, называемым ПЗС-камерой с матрицей, состоящей из нескольких десятков тысяч светочувствительных элементов, являющейся панорамным приемником изображений.

Главная работа направлена на изучение процессов, происходящих в атмосфере Солнца и гигантских планет, комет и межзвездных сред и туманностей, спектрофотометрии активных галактик.



Рис. 46.1. Асы-Тургеньская обсерватория АФИ



Рис. 46.2. Тянь-Шаньская обсерватория АФИ



1. В чем заключается особенность исследования астрономии?
2. Что изучает космология?
3. Какими исследованиями занимаются институты астрофизики в Казахстане?
4. Подготовьте презентацию о казахстанских космонавтах.

§ 47. Звездное небо. Мир звезд. Расстояние до звезд. Переменные звезды.



Ключевые понятия:

- ✓ созвездия
- ✓ светимость
- ✓ параллакс
- ✓ световой год
- ✓ парсек
- ✓ законы Вина и Стефана-Больцмана
- ✓ формула Погсона
- ✓ диаграмма Герцшпрунга-Рассела
- ✓ протозвезда
- ✓ белый карлик
- ✓ нейтронная звезда
- ✓ черная дыра

На этом уроке вы:

- узнаете, как определяют расстояние до звезд, как идет становление и развитие звезд и чем оно заканчивается.



Звезда — это шаровидное небесное тело в состоянии плазмы с большой массой, в основном состоящее из водорода и гелия, постоянно выделяющее энергию в виде электромагнитного излучения и потока частиц благодаря протеканию термоядерных реакций в ее ядре. К звездам относятся также белые карлики и нейтронные звезды, которые являются конечным этапом их эволюции.

Основные характеристики звезд: светимость, температура поверхности, радиус, химический состав и масса. Многие из них измеряются в единицах характеристик Солнца (табл. 47.1):

Таблица 47.1

Основные характеристики Солнца

Название	Обозначение	Значение
Масса Солнца	M_{\odot}	$1,989 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Солнца	R_{\odot}	$6,957 \cdot 10^8$ м
Светимость Солнца	L_{\odot}	$3,827 \cdot 10^{26}$ Вт

Кроме того, размер гигантских звезд измеряется астрономическими единицами (1 а.е. = 149597870700 м). Расстояние до звезд — расстоянием, пройденным светом в год (Юлианский год — 365,25 суток) $1 \text{ св.год} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м} = 63241,1 \text{ а.е.} = 0,306 \text{ пк}$

$$1 \text{ св.год} = 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} \cdot 2,99 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 9 \ 460 \ 730 \ 472 \ 580 \ 800 \ \text{м},$$

либо измеряется парсеком (расстояние по горизонтали 1 а.е., под видимое углом 1 секунды — $1 \text{ пк} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м} = 206264,8 \text{ а.е.} = 3,262 \text{ св.год}$):

$$1 \text{ пк} = \frac{1 \text{ радиан}}{1''} \text{ а.е.} = \frac{360 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi} \text{ а.е.} = 3,0856776 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

Звезды в основном располагаются внутри галактики и передвигаются вокруг ее центра. Начиная с образования в межзвездной среде из газопылевых туманностей внутри галактики, звезда проходит через различные эволюционные стадии.

Расстояние до звезд. Солнце является самой близкой к нам звездой. Самая близкая к Солнцу звезда — это звезда Проксима в созвездии Центавр. Расстояние до нее 4,244 световых года.

Это вы знаете

Свет летит от Солнца около 8 минут.

Расстояние до ближайших к нам звезд определяется методом параллакса (рис. 47.1). Современные оптические телескопы могут измерять параллакс с относительной погрешностью $\sim 0,001\%$. Можно измерить расстояние с помощью орбитального телескопа на спутнике Земли в 1000 пк. В зависимости от атмосферных возмущений с поверхности Земли можно измерить расстояние до 100 пк. С помощью радиотелескопов проводятся измерения расстояния до 10 Мпк.

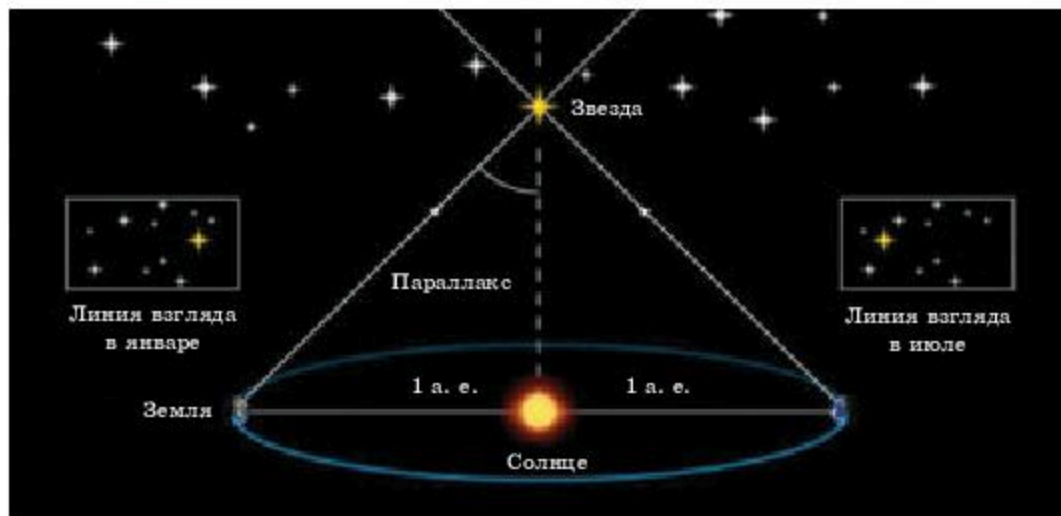


Рис. 47.1. Годовой параллакс звезды

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Фотон, излученный внутри ядра Солнца, идет до его поверхности больше сотни тысяч лет.

Для исследования звезд используются специальные телескопы, оснащенные фотокамерой, спектрографом, магнитографом и многими другими приборами. Ученые получают информацию о звездах, классифицируя их спектр света. Спектр определяет температуру и химический состав поверхности звезды (фотосферы звезды).

После определения расстояния до звезды можно найти другие его характеристики.

Видимая звездная величина была введена греческим астрономом Гиппархом во II веке до н.э. Видимая звездная величина показывает величину яркости звезды (световой энергии, генерируемой звездой в единичное время). Если видимые звездные величины двух звезд m и их яркость L , то их соотношение выражается через формулу Погсона:

$$m_1 - m_2 = -2.5Lg \frac{L_2}{L_1}.$$

Мы видим, что яркость звезды 1^m в 100 раз превышает яркость звезды 6^m . Расстояние до звезд, у которых известны светимость и блеск, можно найти по закону обратного квадрата. Источники света, у которых известна светимость, в астрономии называются **стандартными свечами**.

Звезды расположены на разных расстояниях от нас, поэтому их видимые звездные величины не могут прямо определить мощность излучения звезды (ее истинную светимость). Для того, чтобы определить

истинную светимость звезды (в астрономии принято говорить “абсолютная”), необходимо найти расстояние до нее.

Если видимая звездная величина и расстояние до нее дается парсеком, то с помощью следующей формулы можно вычислить абсолютную звездную величину звезды:

$$M = m + 5 - 5Lgr$$

Образование звезд. Во второй половине XX века астрономы, опираясь на результаты наблюдений, открыли образование звезд в межзвездной среде из молекулярных облаков, в основном содержащих водород и гелий.

От действия случайных сил (например, от колебания гравитационного поля, от внешней ударной волны и т. д.) это облако начинает сжиматься к центру благодаря собственной гравитации. При значительном увеличении плотности сжатая область превращается в глобулу (темная газопылевая туманность) (рис. 47.2). В глобуле образуется сферообразная область и, когда вещество начинает падать на центр, образуется протозвезда.

Гравитационная энергия сжимающейся протозвезды нагревает ее внутренние слои. При повышении температуры пыль превращается в газ, газ ионизируется, молекулы диссоциируются. Температура центра протозвезды достигает 16—20 млн Кельвина, когда начинается термоядерная реакция синтеза водорода в гелий, давление становится большим и сжатие прекращается. Протозвезда становится звездой.



Рис. 47.2. Глобулы Тэкер в туманности λ Центавра

Этот процесс занимает примерно 50 миллионов лет для звезды, подобной Солнцу. Чем больше область сжатия, тем больше результирующая масса звезды. Дальнейшую судьбу звезды определяют ее масса и состав, так как в звездной среде могут быть другие элементы, кроме водорода и гелия, а они могут ускорять ход термоядерной реакции и влияют на эволюцию звезды.

Давление, возникающее из-за распределенной энергии в ядре звезды, достигает поверхности, звезда увеличивается, от увеличения снижается температура и давление, под влиянием гравитационной силы звезда вновь сжимается: продолжительность периода вновь возникшей переменной звезды может длиться миллионы лет. Наконец, колебания затухают, звезда переходит в равновесное состояние и превращается в нормальную звезду.

Структура звезды в нормальной стадии жизни (период горения водорода) состоит из трех зон: территория термоядерной реакции (ядро); зона передачи энергии через излучение (радиационная зона) и конвективная зона. Массы этих звезд примерно равны массе Солнца (рис. 47.3).

Чем больше масса звезды, тем больше ее светимость. При более высокой температуре ее поверхности конвективная зона будет меньше.

Спектральные классы звезд. После получения спектров звезд была разработана их спектральная классификация. В начале XX века Герцшпрунг и Рассел создали диаграмму, классифицируя звезду по шкале “абсолютная звездная величина” — “спектральный класс” (рис. 47.4). В астрономии принято спектральные классы обозначать буквами: О — голубой, В — белый, А, F, О — зеленовато-желтый, К, М — оранжевый). Яркость звезд выражается абсолютными звездными величинами.

На этой диаграмме звезды располагаются вдоль определенных линий. Большинство из них (70%) лежат вдоль линии, называемой главной

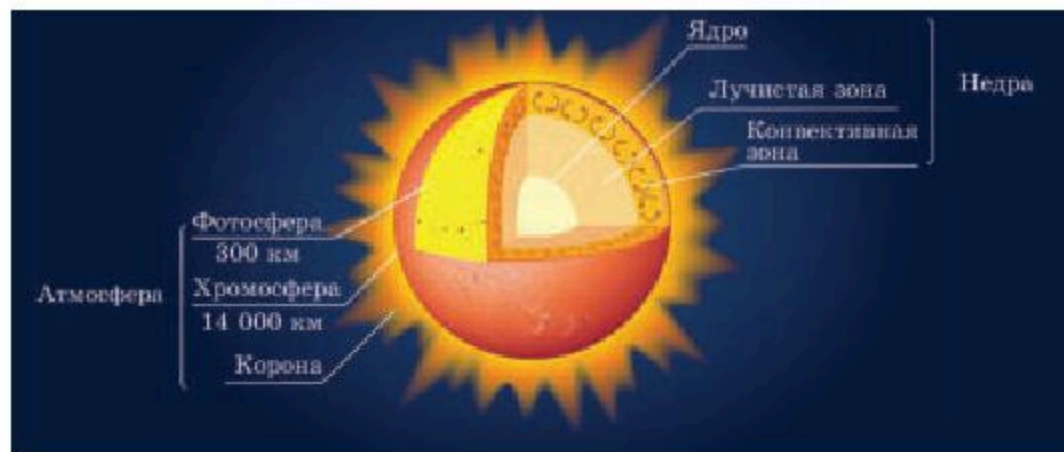


Рис. 47.3. Строение Солнца

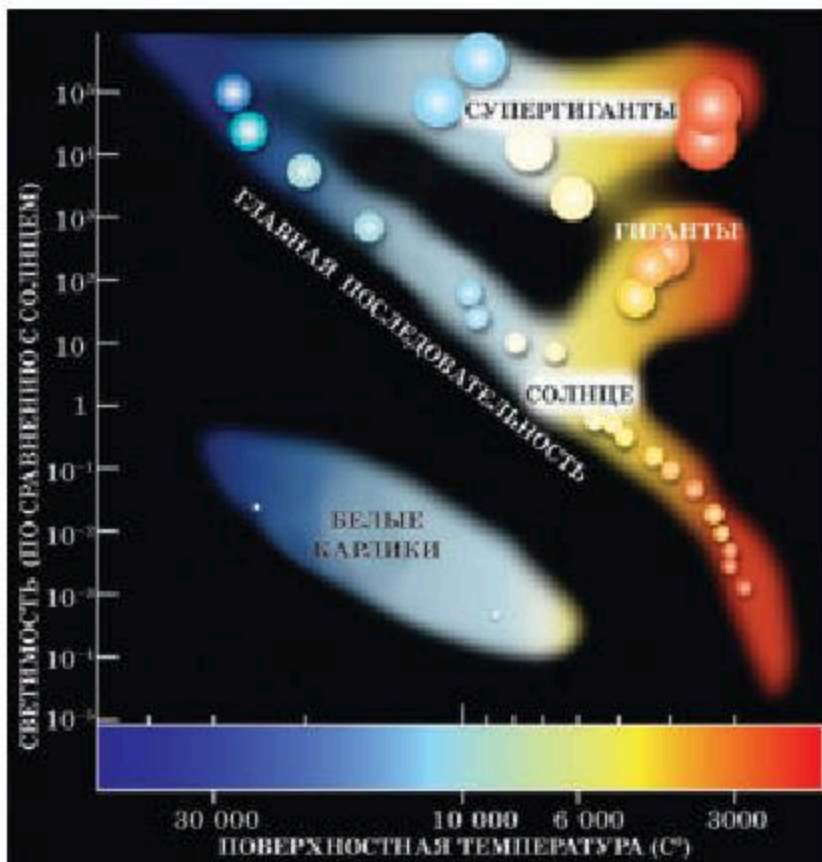


Рис. 47.4. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

последовательностью. В этих звездах происходит горение водорода. Со временем эти звезды превращаются в красные гиганты и переходят к другим линиям. Общая диаграмма Герцшпрунга-Рассела описывает эволюцию звезд.

Глядя на диаграмму, можно наблюдать другую закономерность, связанную с эволюцией звезд. Три региона представляют три стадии жизни звезд: *главная последовательность* — нормальная стадия жизни звезд, *зона гигантов и сверхгигантов* — “стареющая пора” звезд и *зона белых карликов* — “могила звезд” (потухшие звезды). Эта диаграмма еще раз показывает закономерность: чем крупнее звезда, тем больше она располагается в верхней части главной цепи.

Нормальный период звезд зависит от их массы. Жизнь звезд может длиться от миллионов до миллиардов лет. Чем больше масса звезды, тем меньше ее продолжительность жизни. Звезды, масса которых в десять раз превышает Солнце, выпускают в миллионы раз больше света, чем Солнце. В результате запасов водорода в них хватает всего на несколько десятков миллионов лет. А звезды, массы которых приблизительно

равны массе Солнца, тратят свое водородное топливо гораздо медленнее, и на протяжении миллиардов лет производят постоянный свет.

Финальная стадия. Звезды, как и во время образования, дестабилизируются, когда гаснут.

В ядре звезды водород сгорает и превращается в гелий. Когда зона горения приближается к поверхности звезды, давление преобладает над гравитацией, заставляя вещество звезды двигаться наружу, размер звезды увеличивается, а температура поверхности уменьшается. Она меняет цвет и становится **красным гигантом**. *Красный гигант* — это гигантская звезда, ядро которой окружено тонкими слоями, выделяющими энергию, а остальная часть является конвективной зоной размером от 100 до 800 Солнечных радиусов.

Гелий начинает гореть, когда внутренняя температура ядра растет, и массы звезды достаточно, чтобы температура ядра поднялась до 100 миллионов градусов (вспышка гелия встречается в звездах с массой $\sim 2,25 M_{\odot}$).

Белый карлик — это небесное тело, образованное из вещества, состоящего в равновесии с вырожденным электронным давлением газа (свойства соответствуют металлам), размеры которого равны Земле, массой $0,1\text{—}1,44 M_{\odot}$. Белые карлики из-за отсутствия источника энергии при начальной температуре $\sim 10^4$ К на протяжении десятков миллиардов лет охлаждаются и переходят из горячего белого карлика в фазу коричневого состояния, а затем переходят в невидимый темный карлик. Плотность белого карлика составляет около $10^5\text{—}10^9$ г/см³, то есть от 100 кг на один сантиметр куб (если состоит из гелия) до миллиона тонн (железа). Может иметь магнитное поле до 10^5 Тл.

Это вы знаете

В центре Галактики находится сверхмассивная черная дыра.

Нейтронная звезда — небесное тело, состоящее в основном из нейтронов, размером около 10 км, с массой (в теории $0,1\text{—}2,8$) в пределах $1,3\text{—}1,6 M_{\odot}$, плотность которого равна плотности атомного ядра ($2,8 \cdot 10^{17}$ кг/м³). Масса его вещества на один кубический сантиметр составляет около 10 млрд. т. Магнитное поле до 10^{11} Тл.

Ядро гигантских звезд массой более $30 M_{\odot}$ превращается в **Черную дыру** в конце его жизни.

Радиус черной дыры определяется следующим выражением:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где r_g — “гравитационный радиус”, а сфера с радиусом r_g называется “Сферой Шварцшильда”. M — масса звезды, G — гравитационная по-

стоянная, а c — скорость света. Радиусы нейтронных звезд в несколько раз больше их гравитационных радиусов.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Радиус черной дыры прямо пропорционален его массе. То есть если его масса увеличится вдвое, то ее радиус тоже удваивается. А радиусы белых карликов обратно пропорциональны массе. То есть, когда их масса растёт, радиус уменьшается.

Любое вещество, вошедшее в сферу Шварцшильда (даже световой луч), не может возвратиться обратно, поэтому его назвали “Черной дырой”.



1. Из-за чего происходит изменение блеска самых новых звезд?
2. Можно ли через Цефеи определить массу звезд?
3. К какому типу переменных звезд относятся пульсары?

Пример решения задач

Рассчитайте расстояние до астрономической единицы, если годовой параллакс звезды равен $1''$.

Решение. Используем формулу $r = 206265''$ а/р, где $p = 1''$, $a = 150\,000\,000$ км = 1 а.е. Поставив эти данные в формулу, получим

$$r = 206265'' * 1 \text{ а.е.} / 1'' = 206\,265 \text{ а.е.}$$



Упражнение 21

1. Годовой параллакс Веги равен $0,12''$. Каково расстояние, если мы измерим его парсеком, световым годом, астрономической единицей, километром?

Ответ: 8,3 лет; 27,17 св.год; 1718 875 а.е.; $2,58 \cdot 10$ км.

2. Звезда движется со скоростью 30 км/ч. Определите, какое расстояние будет проходить в течение 300 000 лет при подсчете в парсеках.

Ответ: 9,2 пс.

3. Определите расстояние до Цефея звездной величины 15, период колебаний блеска — 5 дней.

Ответ: 41 687 пс.

4. Оцените абсолютную звездную величину самой новой звезды, загоревшей в Большом Магеллане в 1987 году, и сравните ее с абсолютной величиной типичной новой звезды. Видимая звездная величина при максимальном блеске равна 3.

Ответ: -18 .

5. На расстоянии 10 пк от Солнца появилась новая звезда, рассеянная со скоростью 10000 км/ч. Что будет наблюдаться через 50 лет?

Ответ: В небе будет светлая туманность размером 20° .

6. Если расстояние до Солнца составляет 150 млн. км, какова абсолютная величина звезды?

Ответ: +4,8.

7. В результате воспламенения в Солнце плазма выбросилась наружу. Сброшенная солнечная плазма достигла Земли через 3 суток и вызвала сильное отклонение в магнитосфере. Определите, с какой скоростью двигалась плазма $1 \text{ а.е.} = 150 \text{ млн. км}$.

Ответ: 578 км/с.

§ 48. Наша Галактика. Открытие других галактик. Квазары



Ключевые понятия:

- ✓ Галактика
- ✓ Звездное скопление
- ✓ квазары

На этом уроке вы:

- узнаете строение и состав галактики, виды, формы и размеры Галактик, что такое квазары.



Солнечная система входит в состав галактики “Млечный Путь” (рис. 48.1). В центре шарообразного ядра (балдж) Млечного пути находится гигантская черная дыра, остальная часть дискообразна, состоит из около 200 млрд. звезд, газопылевых туманностей и темной материи. Диаметр галактики составляет около 100 тысяч световых лет. Двигаясь вокруг центра Галактики, Солнечная система примерно за 200 млн. лет совершает один оборот. С момента образования Земли солнечная система сделала уже 23 оборота вокруг центра галактики.

Формы и размеры галактик разные. Диаметр самой маленькой наблюдаемой галактики — 5 кпк, а самой большой — около 600 кпк.

Существует четыре основных вида галактик (рис. 48.2):

1. *Эллиптические галактики (E)* — галактики без диска.
2. *Спиральные галактики (S)* — дисковые галактики со спиральными рукавами.

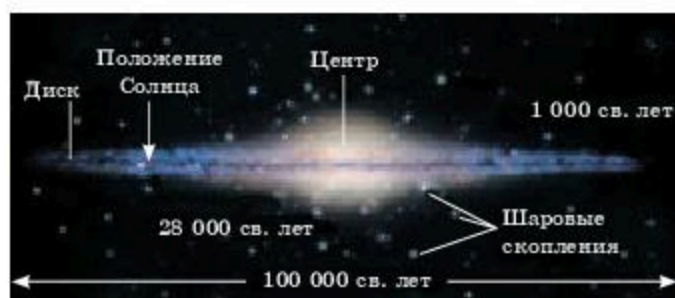


Рис. 48.1. Место Солнечной системы в галактике

3. *Линзовидные галактики (S0)* — дисковые галактики без спиральных рукавов.

4. *Неправильные галактики (Irr)* — галактики, состоящие из 50% межзвездного газа, с неправильными конструкциями, имеют хаотичную форму без ярко выраженного ядра и спиральных ветвей.

Есть только четыре видимых галактик: Андромеда М31; Галактика Треугольника М33 (очень трудно увидеть); большое Магелланово облако и малое Магелланово облако.

Газы в галактике, в основном, сосредоточены близко к его плоскости. Они распределены неравномерно. Кроме гигантских облаков, имеющих неоднородную структуру длиной несколько тысяч световых лет, в этот состав также входят небольшие облака, величина которых не превышает одного парсека. Химический состав нашей галактики состоит в основном из водорода и гелия. По сравнению с этими двумя элементами остальные элементы встречаются в небольших количествах.

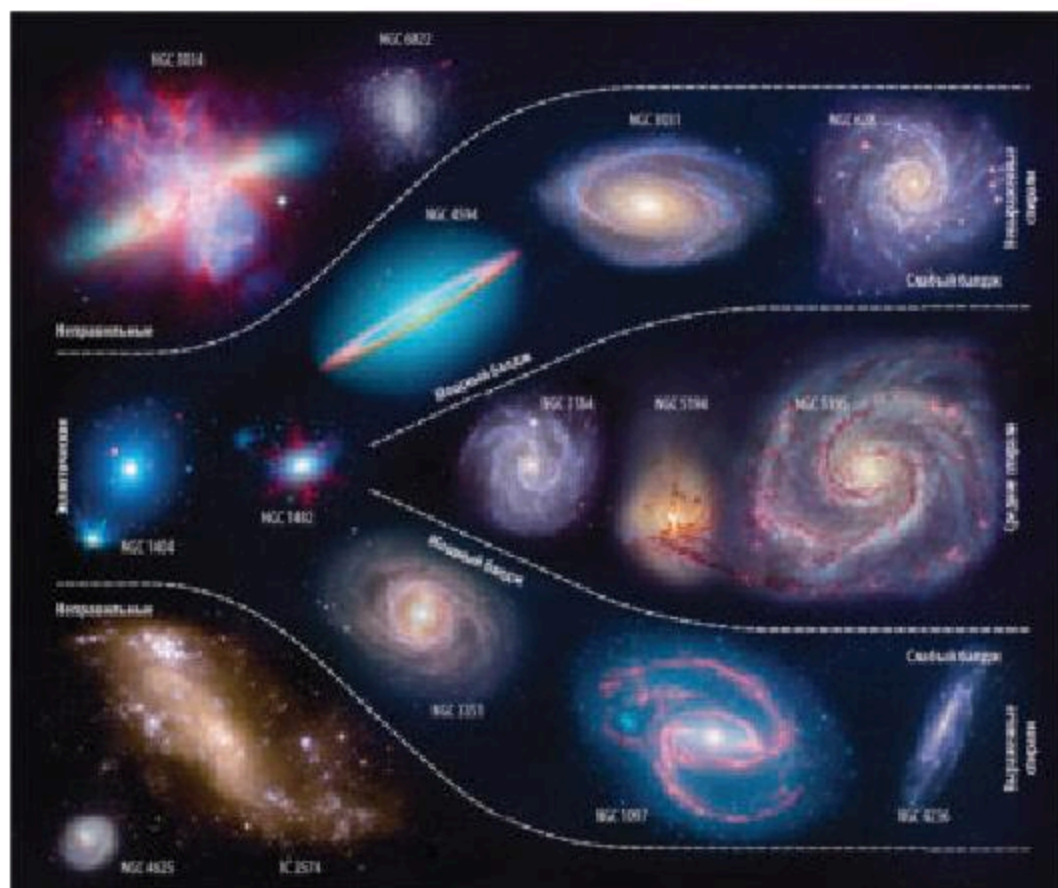


Рис. 48.2. Виды галактик

В нашей Галактике встречаются лишь 30% одиночных звезд, таких как Солнце. В основном звезды являются частью двух или нескольких звездных систем. В галактике рассеянные звезды (состоящие из десятков звезд) и шаровидных (состоящие из ста тысяч звезд) звездных скоплений.

Шаровые звездные скопления расположены недалеко от центра галактики. В регионах, наиболее близких к центру галактики, количество звезд в каждом кубе парсека достигает нескольких тысяч. Если бы мы жили на планете, близкой к ядру галактики, то в небе было бы несколько тысяч звезд ярче даже самой яркой звезды нашего современного неба.

Количество рассеянных звездных скоплений значительно больше, чем шаровых скоплений звезд, они в основном расположены на ветке спирали галактики (речь идет о спиральной галактике).

Ядро Галактики находится в направлении созвездия Стрельца. Скорость вращения галактики в центре начинается с нуля и увеличивается до 200-240 км/ч на расстоянии более 2 тысяч световых лет и остается стабильной. Возраст галактики превышает 12 млрд лет.

Открытие других галактик. Примерно сто лет назад считалось, что все видимые туманности относятся к нашей Галактике. Это было связано с трудностями определения расстояний до них. Благодаря новым методам измерения выяснилось, что видимая Вселенная полна галактик. В настоящее время в наблюдаемом мире существует около 2 трлн. галактик. Они расположены в группе. Галактики распределяются между собой и удаляются друг от друга на расстоянии, определяемом с помощью наиболее чувствительных средств. В местном скоплении галактик наряду с вышеуказанными галактиками есть еще более 60 членов. С ночного неба южного полушария мы можем наблюдать за ближайшими к нам галактиками — “Магеллановы Облаками”. “Магеллановы облака” намного меньше Млечного пути. Они являются спутниками нашей Галактики.

На расстоянии 2,62 млн световых лет от нас находится Андромеда. Это самая крупная галактика в нашей группе — ее размер в два раза больше нашей галактики (около 1 трлн звезд). Размер галактики Треугольника в 2 раза меньше нашей галактики. Она находится на расстоянии 2,8 млн световых лет от нас.

К крупнейшим в мире галактикам относятся эллиптические галактики. Некоторые из них являются шарообразными, а некоторые — растянутыми. Согласно каталогу, состоящему из 800 тысяч галактик, около 80% от общего числа галактик спиральные, 17% эллипсные и 3% неправильные галактики. Расстояние до галактик определяют различными методами: методом цефеид, также с помощью новых и сверхновых звезд.

Квезары. Квезар (от англ. *quasar, quasistellar radiosourse* — квазизвездный источник радиоизлучения) — самый мощный источник излучения в мире. Эти небесные тела производят в минуту огромную энергию, больше чем энергия, выработанная за 10 млн. лет Солнцем. Их яркость может быть в сто раз больше, чем яркость целой галактики. Многие квазары — мощные источники рентгеновского излучения. Квазары являются самыми дальними телами в космосе (расстояние до них составляет миллиарды световых лет), их спектр красного смещения достигает до величины $Z = 7,5$. Квазары считаются юными, активными ядрами очень далеких галактик.



1. В каком месте нашей планеты расположены шарообразные скопления звезд?
2. Чем отличаются квазары от обычных галактик?
3. Можно ли контролировать галактику Магелланового Облака в открытую ночь в Алматы?
4. Можно ли определить расстояние до квазара путем изменения периода мерцания?



Упражнение 22

1. Звезда расположена на расстоянии 5,5 кпк от центра галактики и движется со скоростью 200 км/ч. Найдите время, когда звезда совершит полный круг во время кругового движения центра галактики.

Ответ: 10⁷ л.

2. В ночь с 23 по 24 февраля 1987 года астрономы зафиксировали вспышку новейшей звезды на большом Магеллановом облаке на расстоянии 55 кпк. Определите год истинного появления этого явления.

Ответ: 179 300 лет назад

§ 49. Теория Большого взрыва. Красное смещение. Определение расстояния до галактик



Ключевые понятия:

- ✓ **общая теория относительности**
- ✓ **гравитационные волны**
- ✓ **Большой взрыв**
- ✓ **темная энергия, темная материя**

На этом уроке вы:

- познакомитесь с теорией Большого взрыва, понятиями темной энергии и темной материи, узнаете о законе Хаббла и о модели Вселенной.



Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) — современная теория гравитации. Общая теория относительности важна только в больших масштабах. Данная теория утверждает, что пространство-время и материя влияют друг на друга. Материя влияет на размеры, кривизну пространства и на ход времени, а пространство-время задает закономерности движения тел. Пространство вокруг предмета растягивается, а время замедляется. Например, истинный объем в районе нейтронной звезды больше видимого объема. А время замедляется ближе к поверхности звезды. Теория относительности также предполагает гравитационные волны (рис. 49.1). В 2017 году Нобелевская премия по физике была присуждена за открытие гравитационных волн.

Гравитационная волна является распространением пространственно-временных искривлений. Возможность их регистрации поможет получить новые данные о Вселенной.

В рамках этой теории (ОТО) работает космология, изучающая Вселенную в целом. По существующим понятиям, Вселенная возникла после Большого взрыва и прошла очень быстрый этап расширения,

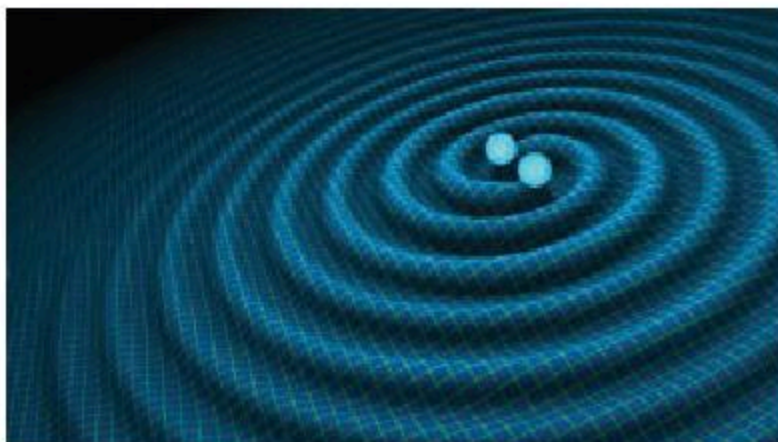


Рис. 49.1. Гравитационное волновое излучение двойных звезд



Рис. 49.2. Эволюция Вселенной

называемый *инфляцией* (рис. 49.2). Лишь спустя 13,7 млрд. лет быстрое расширение сочетается с нынешним периодом медленного расширения. Поскольку мир плоский, он не имеет пределов, то расстояние, которое мы можем контролировать, связано с возрастом мира, так как наличие предельной скорости света ограничивает нашу зону наблюдения.

Здесь следует также отметить понятия темной энергии и темной материи. *Темная энергия* — поле, равномерно заполняющее пространство Вселенной. Именно она способствует ускоренному расширению Вселенной, но ее природа пока неизвестна. *Темная материя* — неизвестный вид материи, сосредоточенный в окрестностях галактик, который не участвует в электромагнитном и сильном взаимодействии. На сегодняшний день установлено, что 68,3% вещества во всем мире состоит из темной энергии; 26,8% — из темной материи; лишь 4,9% — из известного нам вещества. Сейчас большое внимание уделяется исследованиям именно в этом направлении, потому что действительно удивительно, что известное нам вещество меньше незначительных пяти процентов!

После большого взрыва Вселенная начала расширяться и остывать. Когда возраст Вселенной составлял 400 тысяч лет, за исключением темной энергии и темной материи, вещество состояло из электронов, протонов, нейтронов и электромагнитного излучения. Далее в процессе расширения Вселенной температура упала до 4000 К, материя перешла в прозрачное для света состояние и появилось свободное электромагнитное излучение, называемое *реликтовым микроволновым фоновым излучением*. Спустя миллионы лет с начала расширения Вселенной сформировались устойчивые атомы. Далее атомы объединились в молекулы. Гравитация на протяжении сотен миллионов лет, собрав материю в огромный сгусток вещества, в большие облака водорода и гелия, образовала современные галактики.

Наша Галактика и другие галактики объединились и образовали большие группы галактик, размеры которых составляют сотни миллионов световых лет. Они последовательно соединены через все Метагалактическое пространство. Метагалактика — это часть Вселенной, доступная современным астрономическим методам исследования. Объем Метагалактики имеет пористую структуру, в больших масштабах она объединяется в филаменты (волокна длиной 60—80 Мпк) (рис. 49.3).

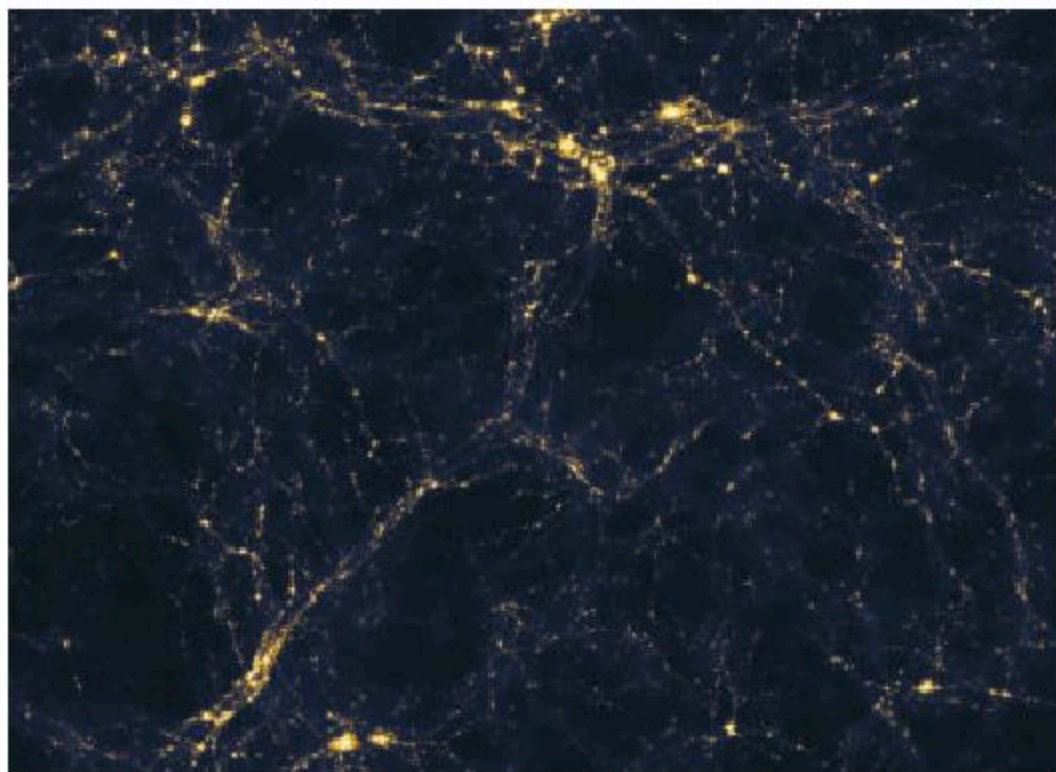


Рис. 49.3. Самая крупномасштабная структура Вселенной — филаменты

Такова структура однородной и изотропной Метагалактики, которая образовалась в огромном масштабе.

Гравитационные поля внутри галактик превращают эту материю в горячие звезды. Здесь появляются и гаснут звезды. На последней стадии своей жизни гигантские звезды образуют взрыв сверхновых звезд и отправляют в космическое пространство элементы, являющиеся основой жизни, в частности, кислород для дыхания, необходимый для организма углерод, железо для крови и т. д. При появлении облаков, содержащих газ и пыль, после взрыва, эти элементы были собраны под влиянием гравитационной силы и появилась новая звезда, то есть Солнце. Рядом с ним стали образовываться планеты. Это событие произошло около 4,6 млрд. лет назад. На одной из этих планет развивались живые существа и теперь их сознательный разум пытается понять, как появилась жизнь. С момента Большого Взрыва прошло около 13,7 млрд. лет. Появился современный вид мира.

Данные, свидетельствующие о взрывном характере возникновения мира, ученые находят и в настоящее время. Это:

- наличие в космосе реликтового микроволнового фонового излучения с момента возникновения мира;
- красное смещение в спектрах галактики, вызванное расширением мира;
- из-за начального нуклеосинтеза на один атом гелия приходится 12 атомов водорода.

Тогда как мы знаем, что на сегодняшний день возраст Вселенной 13,7 млрд. лет, 10^{18} с, размеры обозримого пространства 93 миллиарда световых лет, 10^{27} м. Согласно гипотезам ученых, помимо этой Вселенной могут быть другие параллельные миры (гипотеза мульти-миров). В этих Вселенных фундаментальные стабильные константы могут быть совсем другими и даже внешние виды Вселенных могут отличаться. На самом деле, при незначительном изменении констант мир не был бы таким, каким мы его знаем и вряд ли человек мог бы жить там. Это обстоятельство объясняется антропным принципом. Количество миров бесконечно, но из-за уникальных особенностей Вселенной, которую мы наблюдаем, ее фундаментальные константы приводят нас к формированию жизни нынешних представлений о мире. Мы надеемся, что будущие исследования прояснят эту ситуацию (рис. 49.4).

Закон Хаббла. В 1929 году американский астроном Эдвин Хаббл обнаружил, что чем дальше галактика, тем она быстрее удаляется, и тем больше ее спектр смещается в красную область:

$$v = HR,$$

где v — скорость удаления галактики, R — расстояние до нее, H — постоянная Хаббла ($67,80 \pm 0,77$ (км/с)/Мпк). Закон Хаббла применяется

только для дальних галактик. Закон Хаббла подтверждает увеличение Вселенной, то есть ее появление в результате Большого взрыва.

Величина красного смещения:

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda},$$

где λ_0 — измеренная длина волны, λ — начальная длина в спектре. В настоящее время наибольшая величина красного смещения составляет 11,09, что является характерной для галактики GN-z11 на расстоянии 13,39 млрд. светового года.

Модель Вселенной. Современная модель нашей Вселенной называется Λ CDM (Lambda-Cold Dark Matter). Модель Λ CDM стала стандартной моделью после открытия в 1998 году ускоренного расширения Вселенной, так как противоречия бывших моделей решались здесь простым и естественным образом. Эта модель предполагает, что Вселенная, помимо барионной материи, состоит из лямбда члена — темной энергии и холодной темной материи. Расширение Вселенной по некоторым альтернативным моделям, обобщающим Λ CDM, сменится ее сжатием, и мир исчезнет. По прогнозам другой модели сжатие Метамира приводит к повторному увеличению. По третьей гипотезе увеличение мира будет продолжаться всегда. Свет всех звезд с течением времени рассеется, а галактики растворятся в темноте.



Рис. 49.4. Масштаб контролируемого мира (в логарифмическом масштабе)



1. Каковы размеры Метагалактики?
2. Какие доказательства существуют в настоящее время в теории Большого взрыва?
3. Сколько лет нашему Солнцу?
4. Сколько лет нашей Галактике?
5. Какова структура метагалактики?
6. Что показывает красное смещение в спектре Вселенной?
7. Почему фон излучения с температурой 3000K называется реликтивным?
8. Если скорость удаленности галактики составляет 1000 км/ч, найдите расстояние от этой галактики до мира?
9. Что подтверждает закон Хаббла?

Лабораторная работа №1

Определение числа витков в обмотках трансформатора

Оборудование: трансформатор, источник регулируемого переменного напряжения, вольтметр переменного напряжения, длинный изолированный провод, соединительные провода.

Теория работы. На холостом ходу отношение напряжений на обмотках трансформатора равно отношению числа витков в них:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Напряжения можно измерить вольтметром. Чтобы определить число витков в обмотках, нужно использовать третью обмотку с известным числом витков в ней. Для этого наматывают на сердечник трансформатора третью обмотку с известным числом витков, для чего нужен длинный изолированный провод.

Тогда справедливы соотношения:

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{n_1}{n_3}; \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{n_2}{n_3}.$$

Ход работы:

1. Намотайте на сердечник третью обмотку из длинного провода ($n_3 \approx 10 - 20$ витков) (рис. 1).
2. Подключите к первичной обмотке источник переменного напряжения.

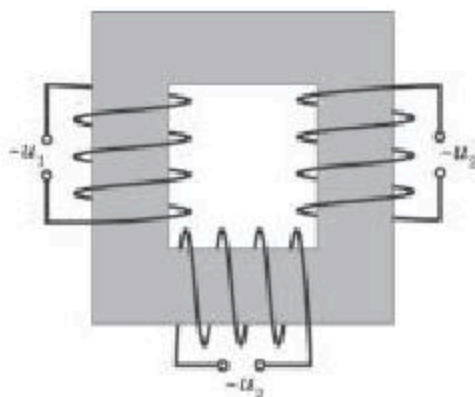


Рис. 1

3. Измерьте вольтметром напряжения на всех обмотках.
4. Определите число витков в обмотках трансформатора по формулам:

$$n_1 = \frac{U_1 \cdot n_3}{U_3}; \quad n_2 = \frac{U_2 \cdot n_3}{U_3}.$$

5. Заполните таблицу

Таблица 1

n_3	U_1	U_2	U_3	n_1	n_2

Лабораторная работа №2**Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки**

Оборудование: 1) прибор для определения длины световой волны; 2) дифракционная решетка; 3) источник света.

Теория работы. Дифракция света наиболее отчетливо наблюдается при помощи дифракционной решетки. Согласно формуле дифракционной решетки $d \sin \varphi = k\lambda$, (1) максимумы для волн разной длины наблюдаются под разными углами. Так как угол φ мал (расстояние между решеткой и экраном a много больше, чем расстояние b от щели до места, где наблюдается максимум волны определенной длины), $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$. Отсюда следует, что длина волны равна:

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

Ход работы:

1. Поместите дифракционную решетку в рамку прибора и укрепите ее на подставке подъемного столика.

2. Поместите ползунок (подвижный экран) на расстоянии 50 см от дифракционной решетки.

3. Наблюдая сквозь дифракционную решетку, направьте прибор так, чтобы последний был виден сквозь узкую прицельную щель щитка. При этом по обе стороны подвижного экрана на его черном фоне заметны дифракционные спектры нескольких порядков. В случае наклонного положения спектров поверните решетку на некоторый угол до устранения перекоса.

4. По шкале на экране определите красную и фиолетовую границы спектров первого порядка, а также отметьте положение зеленой линии спектра (рис. 2).



Рис. 2

5. Результаты измерений занесите в таблицу. 1.

6. Установите ползунок с экраном на другом расстоянии от решетки и повторите измерения. Прodelайте это при трех разных положениях экрана.

7. Определите длину световой волны для красных, зеленых и фиолетовых лучей по расчетной формуле.

Таблица 1

Порядок спектра	Период решетки, $d(\text{м})$	Расстояние a от решетки до экрана-шкалы, м	Границы и части спектра, м			Длина волны, м		
			красная	зеленая	фиолетовая	красная	зеленая	фиолетовая

8. Определите среднее значение длины волны для красных, зеленых и фиолетовых лучей.

9. Определите погрешность измерения.

Лабораторная работа №3 Наблюдение явления поляризации света

Теоретический материал. Опыт показывает, что интенсивность светового пучка, происходящего через некоторые прозрачные кристаллы, например кристаллы исландского шпата, зависит от взаимной ориентации двух кристаллов. При одинаковой ориентации кристаллов свет проходит через второй кристалл без ослабления. Если же второй кристалл повернут на угол 90° от первоначального, то свет через него проходит.

Это явление получает объяснение, если принять, что свет представляет собой поперечные волны. При прохождении через первый кристалл происходит поляризация света, т. е. кристалл пропускает только такие волны, в которых колебание вектора \vec{E} напряженности электрического поля совершается в одной плоскости. Эту плоскость называют плоскостью поляризации. Если, плоскость в которой пропускаются колебания вторым кристаллом, совпадает с плоскостью поляризации, поляризованный свет проходит через второй кристалл без ослабления. При повороте второго кристалла на угол 90° поляризованный свет не проходит через кристалл.

Явление поляризации света доказывает волновую природу свету и поперечность световых волн.

Цель работы: экспериментально исследовать явление поляризации света.

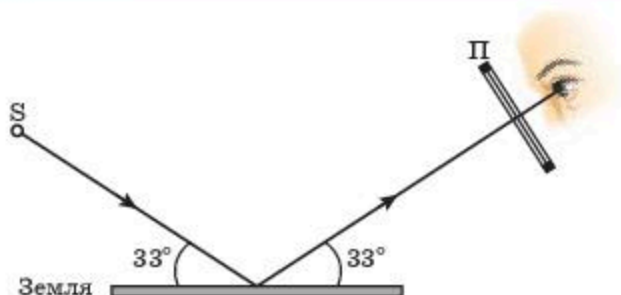


Рис. 3

Приборы и материалы: поляроид в оправе, стеклянная пластинка размером 60 x 90 мм, окрашенная с одной стороны в черный цвет, автомобильная ламп прямой нитью накала, адаптер.

Указания к работе

1. Глядя на зажженную лампу через поляроид (анализатор), медленно поворачивайте его вокруг оси, совпадающий с лучом зрения. Постоянство яркости горения лампы дает основание для заключения: свет от лампы не поляризован.

2. Положите стеклянную пластинку окрашенной стороной вниз на поверхность стола и, рассматривая в ней изображение лампы, исследуйте отраженный от пластинки свет (рис. 3). Медленно вращая анализатор вокруг отраженного луча, как вокруг оси, наблюдайте за попеременным увеличением и уменьшением яркости изображения лампы. За один полный оборот анализатор яркость изображения лампы дважды бывает наибольшей и наименьшей. При этом максимумы и минимумы света чередуются через каждые 90° . Это значит, что свет, отраженный пластинкой, поляризован.

3. В данном опыте устанавливается совпадение плоскости поляризации (она отмечена рисками на оправе поляроида) с плоскостью поляризации пучка света, отраженного от стеклянной пластинки.

Лабораторная работа №4

Определение показателя преломления стекла с помощью плоскопараллельных пластин

Оборудование: 1) стеклянная плоскопараллельная пластинка; 2) английская булавка — 4 шт.; 3) линейка измерительная; 4) белая бумага; 5) лампочка на подставке; 6) батарея аккумуляторов; 7) ключ; 8) соединительные провода; 9) экран с щелью; 10) транспортир.

Теория работы. Явление преломления света наблюдается при переходе света из одной среды в другую. Происходит это потому, что в разных средах скорость света разная. Согласно закону преломления,

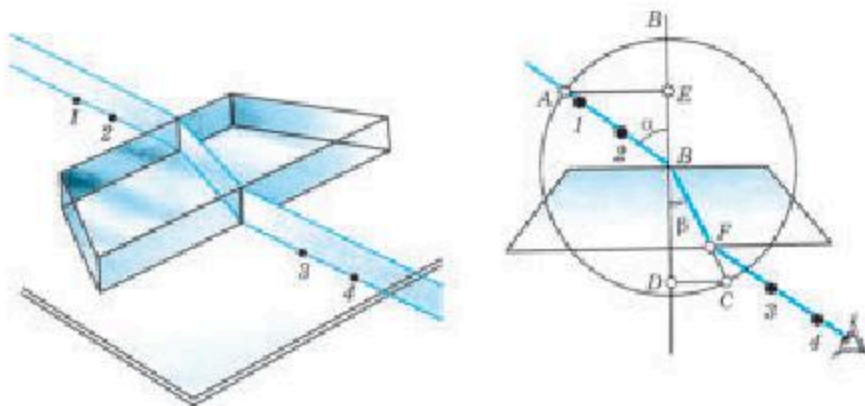


Рис. 4

имеем: $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, где n — относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Если первой средой является воздух, для которого абсолютный показатель преломления равен 1, то относительный показатель преломления второй среды будет равен абсолютному показателю.

Ход работы:

1. Соберите электрическую цепь, присоединив электрическую лампочку к батарее через ключ.
2. Установите перед лампочкой экран с щелью, а за ним положите лист белой бумаги.
3. Замкните цепь с помощью ключа и получите тонкую полоску света на бумаге.
4. Положите поперек полоски света стеклянную пластинку под произвольным углом.
5. Очертите контур пластинки и отметьте начало A и конец B падающего луча и точку F — точку выхода луча света из пластинки (рис. 4).
6. Разомкните цепь и снимите с листа бумаги стеклянную пластинку.
7. Проведите окружность радиусом AB с центром в точке B . Проведите прямую через точку B и F (преломленный луч) и продлите ее до точки C , лежащей на радиусе AB . Восстановите перпендикуляр к пластинке в точке B .

8. Из точек A и C опустите перпендикуляры на перпендикуляр к пластинке. Измерьте длины перпендикуляров AE и DC . По формуле

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\frac{AE}{AB}}{\frac{DC}{AB}} = \frac{AE}{DC} \text{ рассчитайте показатель преломления стекла.}$$

9. Вычислите показатель преломления стекла по формуле.
10. Повторите опыт при других углах падения и сопоставьте результаты (три опыта).

11. Попробуйте провести опыты без источников света, используя английские булавки.

12. Попробуйте определить показатель преломления стекла, пользуясь не транспортиром, а измерительной линейкой.

Лабораторная работа №5 **Определение периода полураспада**

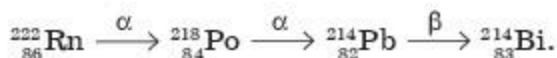
Цель работы: уметь рассчитывать период полураспада графическим методом.

Приборы и материалы: дозиметр Анри-01-02 “Сосна”, фильтр, фен.

Теоретический материал. Период полураспада короткоживущего радиоактивного изотопа определяют по кривой распада. Для ее построения радиоактивный препарат кладут в кювету, на которую ставят дозиметр. Через промежутки времени, отсчитываемые таймером прибора, записывают показания дозиметра. После убывания скорости счета более чем в два раза измерения прекращают и строят кривую распада.

Радиоактивные изотопы с коротким периодом полураспада, необходимые для опыта, содержатся в небольшом количестве в атмосферном воздухе.

В составе земной коры, в любой почве, содержится естественный радиоактивный элемент радий (около 10^{-12} г на 1 г почвы). Вот почему в каждом грамме почвы в среднем за время, равное 1 мин, происходит распад двух ядер радия с испусканием α -частиц: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\alpha$ образованием ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ – радона (инертный газ). Он постоянно накапливается в почве и выходит в атмосферу. Ядра атомов радона в результате α -распада превращаются в ядра атомов полония ${}^{218}_{84}\text{Po}$ в процессе следующей реакции:



В результате распада число радиоактивных ядер убывает со временем по закону $N_t = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$, где N_0 – число радиоактивных ядер в момент начала измерения ($t = 0$); N_t – число радиоактивных ядер, не испытавших распада к моменту времени t ; T – период полураспада.

Эти радиоактивные изотопы имеют небольшой период полураспада. Для определения периода полураспада изготавливают фильтр (тонкий слой ваты, завернутый в марлю), размеры которого должны соответствовать размерам кюветы дозиметра.

Указания к работе:

1. На дозиметре переключатель установите в положение “Т”, нажмите на кнопку “Пуск”. Через время 10 мин нажмите на кнопку “Стоп”.

Снимите показания N_{ϕ} (число импульсов фона) с дисплея и определите фон установки $A_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{t}$.

2. На входном отверстии фена с выключенным подогревателем установите самодельный фильтр и закрепите его резиновым колечком. Включите фен и продувайте воздух в течение 5 мин.

3. Снимите с фена фильтр, поместите его в кювету. Поставьте на кювету дозиметр с открытой задней крышкой и фиксируйте показания прибора через каждые 3 мин. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 4.

Таблица 4

Время t , мин	0	3	6	9	12	15
Число импульсов N_i						
Скорость счета $A_i = \frac{N_i}{t}$						

4. По результатам измерений постройте кривую распада. По горизонтальной оси откладываете время, истекшее от момента начала измерений, а по вертикальной оси — скорость счета (за вычетом фона). По полученной кривой определите время, за которое активность фильтра убывает наполовину.

5. Результаты опытов и их объяснение на основе теории учебника оформите в виде письменного отчета.

Задания для проектной деятельности

Учебный проект — вид самостоятельной творческой деятельности, направленный на решение конкретной учебно-познавательной проблемы. Работу над ним можно условно разбить на следующие этапы.

Подготовительный этап

- Постановка учебно-познавательной проблемы.
- Определение темы проекта, ее обсуждение в классе.
- Формулировка цели и задач проекта.
- Определение типа проекта (индивидуальный, парный, групповой).
- Составление планов и графиков работы.
- Поиск и отбор информации.
- Систематизация и анализ собранного материала.

Основной этап

- Разработка проекта.
- Обсуждение полученных результатов.
- Оформление проекта.
- Подготовка его к презентации на различных школьных мероприятиях.

- Презентация проекта.

Заключительный этап

- Обсуждение и оценка выступлений.
- Подведение итогов.
- Составление отчетов о проделанной работе.
- Определение перспектив дальнейшего изучения темы.
- Проект может быть оформлен в виде доклада, реферата, компьютерной презентации. Примерный объем работы составляет 10—15 страниц (5—10 слайдов).

Учебные проекты по физике можно распределить по трем группам: “История развития физики”, “Эксперимент и моделирование — основные физические методы исследования природы”, “Практические приложения физических знаний”.

Ниже приведены примерные темы учебных проектов к курсу физики 11 класса.

История развития физики

- История открытия законов постоянного тока.
- История обнаружения электромагнитных волн.
- Из истории измерения скорости света.
- Из истории зарождения и развития радиосвязи.
- Фундаментальные опыты в волновой оптике.
- Из истории открытия и исследования внешнего фотоэффекта.
- Элементарные частицы.

Эксперимент и моделирование — основные физические методы исследования природы

- Наблюдение и исследование свойств электромагнитных свойств.
- Построение изображений в тонких линзах с помощью компьютера.
- Наблюдение и изучение интерференции световых волн, дифракции лазерного излучения на компакт-диске.
 - Исследование закономерностей внешнего фотоэффекта с помощью компьютера.
 - Исследование линейчатых спектров излучения с помощью компьютера.
 - Исследование ядерных превращений с помощью компьютера.
 - Наблюдение за фазами Луны.

Практические приложения физических знаний

- Виды самостоятельного разряда и их применение в технике.
- Различные виды электромагнитных излучений и их применение в науке и технике.
 - Оптические явления в природе.
 - Области применения лазерных технологий.
 - Экологические проблемы работы атомных электростанций.
 - Методы регистрации ионизирующих излучений.
 - Семипалатинский полигон и движения Семей-Невада.
 - Большой адронный коллайдер.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютно черное тело — идеализированное тело, поглощающее падающее на его поверхность электромагнитное излучение во всех диапазонах.

Абсолютный показатель преломления — физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в вакууме больше скорости распространения света в данной среде.

Автоколебания — незатухающие колебания с нелинейной обратной связью в колебательной системе с потерей энергии, где колебания поддерживаются за счет энергии постоянного, то есть непериодического внешнего воздействия.

Активность радиоактивного вещества — величина, определяемая числом ядер распавшихся за единицу времени.

Амплитуда колебаний — максимальное значение отклонения от состояния равновесия, которое может принять колеблющаяся физическая величина.

Амплитудная модуляция — вид модуляции, при которой изменяемым параметром несущего сигнала является его амплитуда.

Аналоговый сигнал — сигнал данных, у которого каждый из представляемых параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений.

Астрономия — наука, изучающая физическое строение, возникновение, движение и развитие небесных тел, их систем и всего Мира.

Атомное ядро (нуклид) — центральная часть атома размером порядка 10^{-15} м, в котором сосредоточены его основная масса и положительный заряд, состоящее из протонов и нейтронов.

Байт — единица измерения информации, равная 8 битам.

Бегающая волна — волновое движение, при котором поверхность равных фаз перемещается с конечной скоростью.

Бит — единица измерения количества информации в двоичном коде, он равен информации об одном из двух равновероятных положений.

Волновая поверхность — геометрическое место точек, имеющих одинаковую фазу колебаний.

Волновой фронт — поверхность, отделяющая часть среды, охваченную колебательным процессом, от той, что не охвачена колебаниями.

Волновое движение — процесс распространения колебаний в среде.

Гармонические колебания — периодические изменения физической величины во времени, происходящие по закону синуса или косинуса.

Генератор — устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

Геометрическая оптика — раздел оптики, изучающий распространение света, не рассматривая его волновую природу.

Голография — способ получения объемных изображений предметов на фотопластинке (голограмме) при помощи когерентного излучения лазера, основанный на явлении интерференции световых волн.

Действующее (эффективное) значение силы переменного тока — сила такого постоянного тока, который за одинаковое время выделяет в проводнике такое же количество теплоты, как и определяемый переменный ток.

Дисперсия света — разложение белого цвета в спектр или зависимость показателя преломления вещества от длины волны падающего света.

Дифракция света — отклонение света от прямолинейного распространения или огибание светом препятствий.

Дифракционная картина — ряд светлых полос, разделенных темными промежутками.

Дифракционная решетка — совокупность большого числа препятствий или отверстий на одинаковых расстояниях, на которых происходит дифракция света.

Длина волны — физическая величина, определяемая расстоянием между двумя ближайшими точками волны, совершающими колебания в одинаковых фазах.

Закон Кирхгофа — отношение лучеиспускательной способности тела к его поглощательной не зависит от материала тела и является универсальной функцией частоты и температуры для всех тел.

Закон смещения Вина — частота, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Закон Стефана-Больцмана — энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Интерференция — явление наложения друг на друга двух или нескольких когерентных волн (в том числе и световых), при котором в пространстве образуется устойчивая, не изменяющаяся со временем картина распределения амплитуды результирующих колебаний (чередуются их минимумы и максимумы) в различных точках пространства.

Испускательная способность тела — мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины.

Когерентные источники волн — это источники волн, которые колеблются с одинаковой частотой и постоянным сдвигом фаз.

Колебания — движения или процессы, которые регулярно повторяются через более или менее равные промежутки времени.

Колебательный контур — цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора.

Космология — раздел астрономии, который изучает Вселенную в целом, ее возникновение и развитие, геометрическую структуру, как возникло в ней вещество, природу темной энергии и темной материи и их место в развитии Вселенной.

Лазеры (от первых букв англ. фразы *Light amplification by stimulated emission of radiation*) — квантовые генераторы света, принцип действия которых основан на явлении вынужденного (стимулированного) излучения.

Линзы — прозрачные тела, ограниченные одним или двумя сферическими поверхностями. Линзы делятся на собирающие и рассеивающие. Первые собирают проходящий сквозь них свет в одну точку, а вторые рассеивают его.

Лупа — инструмент с короткофокусной линзой, предназначенный для рассматривания мелких предметов.

Математический маятник — это механическая колебательная система, состоящая из материальной точки, подвешенной на тонкой, невесомой и нерастяжимой нити или стержне в поле сил тяжести.

Механические колебания — периодические (или почти периодические) изменения физической величины, описывающей механическое движение (скорость, перемещение, кинетическая и потенциальная энергия и т. п.)

Наноматериал — это макроскопическое вещество, состоящее из наночастиц или изготовленное на основе нанотехнологий. появилось много новых отраслей промышленности.

Нанороботы — машины наноразмера со способностями двигаться, делать операции, программировать, обмениваться информацией и обрабатывать ее.

Нанотехнология — область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов разработки материалов (веществ) на атомном, молекулярном и супрамолекулярном (на уровне нескольких молекул) уровнях с целью получения особых или новых свойств.

Нуклоны — частицы внутри ядра — протоны и нейтроны.

Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) — современная теория гравитации.

Оптикой называется раздел физики, изучающий закономерности распространения света, процессы взаимодействия света с веществом, природу света.

Опыт Резерфорда — опыт по рассеянию альфа-частиц тонкой золотой фольгой (1911), позволивший подтвердить ядерную модель атома.

Относительный показатель преломления — физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость распространения света в первой среде больше скорости распространения света во второй среде.

Отражение света — явление изменения направления распространения светового луча, наблюдаемое на границе двух сред. При этом луч света возвращается в исходную среду.

Переменный ток — электрический ток, который с течением времени периодически изменяется как по величине, так и по направлению.

Период колебаний — минимальный промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание. Измеряется в секундах.

Период полураспада — промежуток времени, необходимый для распада половины радиоактивных ядер.

Плоское зеркало — гладкая отполированная поверхность, покрытая отражающим слоем, с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности.

Поляризация волн — характеристика поперечных волн, описывающая направление вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Поляризация света — выделение из световых колебаний в естественном свете поляризованного в определенной плоскости составляющего света.

Поперечные волны — волны, в которых частицы среды совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с) — одна из фундаментальных физических констант, введенная М.Планком в 1900 году для объяснения законов теплового излучения.

Правильное, или зеркальное, отражение — это отражение, которое происходит от идеально гладкой, отполированной поверхности (неровности этой поверхности малы по сравнению с длиной волны света).

Преломление света — явление изменения направления распространения световых лучей на границе двух сред, когда лучи проходят из одной среды в другую.

Спектральные приборы — приборы, с помощью которых исследуются спектры излучения источников.

Продольные волны — это волны, в которых частицы совершают колебания по направлению распространения волны.

Радиоактивность — способность атомного ядра самопроизвольно распадаться с испусканием частиц.

Радиоактивный распад — спонтанное изменение состава (заряда Z , массового числа A) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов или ядерных фрагментов.

Радиолокация — обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн.

Радиотелеграфная связь — электрическая связь, при которой посредством радиоволн осуществляется передача дискретных (буквенных, цифровых или знаковых) сообщений.

Радиотелефонная связь — электрическая связь, при которой возможно с помощью электромагнитных волн разговаривать на дальних расстояниях.

Рассеянное, или диффузное, отражение — отражение, происходящее от шероховатой поверхности (у такой поверхности неровности велики).

Реактивное сопротивление — сопротивление прохождению электрического тока в цепи переменного тока, обусловленное наличием в ней индуктивности и (или) емкости.

Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы и частоты собственных колебаний колебательной системы.

Рентгеновское излучение — электромагнитное излучение очень высокой частоты (или очень короткой длины волны, $\lambda = 10^{-8} - 10^{-12}$ м. Открыто немецким физиком В.Рентгеном.

Световой луч — это линия, вдоль которой распространяется световая энергия, или линия, проведенная перпендикулярно волновому фронту и показывающая направление распространения волны.

Сигнал — физический процесс (волна), переносящий данную информацию.

Стоячие волны — волны, образующиеся в результате наложения двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.

Телескоп — оптический прибор для наблюдения небесных тел.

Темная энергия — поле, равномерно заполняющее пространство Вселенной. Именно она способствует поступательному увеличению мира, но ее природа пока неизвестна.

Тепловое излучение — электромагнитное излучение нагретых тел.

Ток смещения — величина, пропорциональная скорости изменения индукции электрического поля.

Трансформатор — устройство для преобразования переменного тока и напряжения. Принцип действия основан на *законе электромагнитной индукции*.

Удельная энергия связи — отношение энергии связи ядра к массовому числу A , т. е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

Фазовая скорость — это скорость точки волны с постоянной фазой.

Фотоаппарат — оптическое устройство с линзовой системой, с помощью которой получают изображение предмета на светочувствительной пленке или ПЗС матрице, сохраняющей изображение.

Фотон — частица, введенная для того, чтобы объяснить корпускулярные свойства электромагнитного излучения. Фотоны — кванты электромагнитного поля. Электромагнитное взаимодействие осуществляется путем обмена фотонами.

Фотоэлектроны — это электроны, вырванные светом из металла при внешнем фотоэффекте.

Фотоэффект — явление взаимодействия света или любого другого электромагнитного излучения с веществом, при котором энергия фотонов передается электронам вещества.

Внутренний фотоэффект — увеличение электропроводности полупроводника при облучении электромагнитным излучением.

Цепная ядерная реакция — процесс, в котором определенная ядерная реакция вызывает такие же последующие реакции.

Цифровой сигнал — сигнал, который передается в виде последовательности дискретных (цифровых) значений.

Частота колебаний — число колебаний в одну секунду, величина, обратная периоду. Измеряется в герцах (Гц).

Шкала электромагнитных волн — электромагнитные волны разных диапазонов, от радиоволн до гамма-лучей.

Электромагнитные колебания — периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, сопровождающиеся взаимными превращениями энергии электрического и магнитного полей.

Ядерные реакции — превращения, возникающие при взаимодействии атомного ядра с другими ядрами, элементарными частицами и γ -квантами.

Ядерные силы — силы, которые не дают разлететься нуклонам и обеспечивают их особо сильную связь.

Ядерный реактор — устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция.

Термины, используемые в курсе Физика 11 класса

На русском языке	На казахском языке	На английском языке
Абсолютно черное тело	Абсолют қара дене	Black body
Абсолютный показатель преломления	Абсолютті сыну көрсеткіші	Absolute refractive index
Автоколебания	Автотербелістер	Self-oscillations
Активность радиоактивного вещества	Радиоактивті заттың активтігі	Activity of a radioactive substance
Амплитуда колебаний	Тербеліс амплитудасы	Amplitude of the oscillations
Амплитудная модуляция	Амплитудалық модуляция	Amplitude modulation
Аналоговый сигнал	Аналогтық сигнал	Analog signal
Астрономия	Астрономия	Astronomy
Атомное ядро	Атом ядросы	Atomic nucleus
Байт	Байт	Byte
Бегущая волна	Қума толқын	Traveling wave
Бит	Бит	Bit
Бридеры	Бридер	Breeder reactor
Волновая поверхность	Толқындық бет	Wave surface
Волновой фронт	Толқындық шеп	Wave front
Волновое движение	Толқындық қозғалыс	Wave motion
Гармонические колебания	Гармоникалық тербелістер	Harmonic oscillations
Генератор	Генератор	Generator
Геометрическая оптика	Геометриялық оптика	Geometric optics
Голография	Голография	Holography
Дисперсия света	Жарық дисперсиясы	Light dispersion
Дифракцией света	Жарықтың дифракциясы	Diffraction of light
Дифракционная картина	Дифракциялық кескін	Diffraction pattern
Дифракционная решетка	Дифракциялық тор	Diffraction grating
Длина волны λ	Толқын ұзындығы λ	Wavelength
Закон Кирхгофа	Кирхгоф заңы	Kirchhoff's law
Закон смещения Вина	Виннің ығысу заңы	Wien's displacement law
Интерференция	Интерференция	Interference
Искусственная радиоактивность	Жасанды радиоактивтілік	Artificial radioactivity
Когерентные источники волн	Когерентті толқын көздері	Coherent wave sources
Колебания	Тербелістер	Oscillation
Колебательный контур	Тербелмелі тізбек	Oscillating circuit
Космология	Космология	Cosmology
Лазеры	Лазерлер	Laser
Линзы	Линзалар	Lenses

Лупа	Лупа	Magnifier
Математический маятник	Математикалық маятник	Mathematical pendulum
Механические колебания	Механикалық тербелістер	Mechanical oscillation
Наноматериал	Наноматериал	Nanomaterial
Нанороботы	Нанороботтар	Nanorobots
Нанотехнология	Нанотехнология	Nanotechnology
Оптика	Оптика	Optics
Опыт Резерфорда	Резерфорд тәжірибесі	Rutherford's experiment
Отражение света	Жарық шағылуы	Light reflection
Переменный ток	Айнымалы ток	Alternating current
Период колебаний	Тербеліс периоды	Oscillation period
Период полураспада	Жартылай ыдырау периоды	Half-life
Плоское зеркало	Жазық айна	Flat mirror
Поляризация света	Жарықтың поляризациясы	Polarization of light
Поперечные волны	Көлденең толқындар	Transverse waves
Постоянная Планка	Планк тұрақтысы	Planck constant
Спектральные приборы	Спектралды құрылғылар	Spectral instruments
Продольные волны	Бойлық толқындар	Longitudinal waves
Радиоактивность	Радиоактивтілік	Radioactivity
Радиоактивный распад	Радиоактивті ыдырау	Radioactive decay
Радиолокация	Радар	Radar
Радиотелеграфная связь	Радиотелеграф байланысы	Radio telegraphy
Радиотелефонная связь	Радиотелефон байланысы	Radiotelephone communication
Рассеянное, или диффузное, отражение	Диффузиялық немесе шашыраңқы шағылу	Diffuse reflection
Резонанс	Резонанс	Resonance
Рентгеновское излучение	Рентген сәулесі	Light ray
Сигнал	Сигнал	Signal
Стоячие волны	Тұрғын толқындар	Standing waves
Телескоп	Телескоп	Telescope
Темная энергия	Қараңғы энергия	Dark energy
Тепловое излучение	Жылулық сәуле шығару	Thermal radiation
Термоядерные реакции	Термоядролық реакциялар	Thermonuclear reactions
Ток смещения	Ығысу тоғы	Displacement current
Трансформатор	Трансформатор	Transformer
Удельная энергия связи	Меншікті байланыс энергиясы	Binding energy per nucleon
Фотоаппарат	Фотоаппарат	Camera

Фотон	Фотон	Photon
Фотоэлектроны	Фотоэлектрондар	Photoelectrons
Фотоэффект	Фотоэффект	Photoelectric effect
Внутренний фотоэффект	Ішкі фотоэффект	Internal photoelectric effect
Шкала электромагнитных волн	Электромагниттік толқындардың шкаласы	Scale of electromagnetic waves
Электромагнитные волны	Электромагниттік толқындар	Electromagnetic waves
Электромагнитные колебания	Электромагниттік тербелістер	Electromagnetic vibrations
Явление преломления света	Жарықтың сынуы	Refraction of light
Ядерные реакции	Ядролық реакциялар	Nuclear reactions
Ядерные силы	Ядролық күштер	Nuclear forces
Ядерный реактор	Ядролық реактор	Nuclear reactor

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касьянов В. А. Физика: 11 класс. М.: Дрофа, 2018.
2. Кокс Ф. Г., Парсондейдж М. Энциклопедия окружающего мира. Атомы и молекулы. М.: Росмэн, 1997.
3. Мухаметов М., Есжанов А. и др. Физика: Учебник для 11 классов общеобразовательных школ. Алматы, 2008.
4. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: Учебник для 11 классов общеобразовательных учреждений. М.: Просвещение, 2002.
5. Мякишев Г. Я., Синяков А. З. Физика: Колебания и волны. Учебник для 11 классов для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2001.
6. Мякишев Г. Я., Синяков А. З. Физика: Оптика и квантовая физика. Учебник для 11 классов для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2002.
7. Павленко Ю.Г. Начало физики. Учебник. М.: Экзамен, 2005 г.
8. Тарасов Л. В. Физика в природе: Книга для учащихся. М.: Просвещение, 1988.
9. Турчина Н.В. Физика в задачах для поступающих в вузы. 2500 задач. М.: Оникс. Мир и образование, 2009 г.
10. Универсальный справочник школьника / Сост. Г. П. Шалаева. М.: Филологическое общество "Слово". Олма-Пресс образование, 2005.
11. Факты. Люди. Даты. События. Малый энциклопедический справочник. М.: Астрель, 2002.
12. Физика. Учебник для 11 классов с углубленным изучением физики. Профильный уровень. / Под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2007.
13. Туякбаев С. Т., Насохова Ш. Б., и др. Физика: Учебник для 11 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Алматы, 2015.
14. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики под редакцией Ю.И. Дика, О.Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2002 г.
15. Шутов В.И., Сухов В.Г., Подлесный Д.В. Эксперимент в физике. Физический практикум.
16. Энциклопедический словарь юного физика / Сост. В. А. Чуянов. М.: Педагогика, 1991.
17. Элементарный учебник физики. Том I, II, III. Под редакцией академика Г.С. Ландсберга. М.: АОЗТ "Шрайк", 1995 г.
18. <https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics>

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Глава 1. Механические колебания

§1. Уравнения и графики механических гармонических колебаний.....	5
---	---

Глава 2. Электромагнитные колебания

§2. Свободные электромагнитные колебания	15
§3. Вынужденные электромагнитные колебания. Автоколебания	22
§4. Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями	28

Глава 3. Переменный ток

§5. Генератор переменного тока	33
§6. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток	40
§7. Резонанс напряжений в электрической цепи.....	45
§8. Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор	48
§9. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и в мире ...	54

Раздел II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 4. Электромагнитные волны

§10. Электромагнитное поле	61
§11. Электромагнитные волны	65
§12. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца	68
§13. Энергия электромагнитных волн.....	72
§14. Свойства электромагнитных волн.....	77
§15. Принцип радиосвязи	81
§16. Модуляция и детектирование	85
§17. Распространение радиоволн. Радиолокация.....	88
§18. Цифровые технологии.....	94
§19. Оптико-волоконные коммуникационные сети.....	97
§20. Развитие средств связи в Казахстане	99

Раздел III. ОПТИКА

Глава 5. Волновая оптика

§21. Интерференция света	103
§22. Дифракция света.....	106
§23. Дисперсия света. Поляризация света.....	109

Глава 6. Геометрическая оптика

§24. Прямолинейное распространение света	117
§25. Явление отражения света. Плоские и сферические зеркала.....	121
§26. Явление преломления света	125
§27. Линзы. Формула тонкой линзы	131
§28. Оптические приборы.....	138

Раздел IV. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**Глава 7. Атомная и квантовая физика**

§ 29. Единство корпускулярно-волновой природы света	147
§ 30. Спектры. Спектральный анализ, спектральные аппараты	150
§ 31. Шкала электромагнитных излучений	155
§ 32. Фотоэффект	160
§ 33. Химическое действие света	165
§ 34. Рентгеновское излучение	169

Глава 8. Физика атомного ядра

§ 35. Естественная радиоактивность	174
§ 36. Закон радиоактивного распада	182
§ 37. Атомное ядро	186
§ 38. Нуклонная модель ядра	188
§ 39. Энергия связи нуклонов в ядре	192
§ 40. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность	197
§ 41. Деление тяжелых ядер	201
§ 42. Цепные ядерные реакции	204
§ 43. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации	207
§ 44. Ядерный реактор. Ядерная энергетика	209

Раздел V. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ**Глава 9. Нанотехнология и наноматериалы**

§ 45. Основные достижения нанотехнологии, проблемы и перспективы разработки наноматериалов	215
--	-----

Раздел VI. КОСМОЛОГИЯ**Глава 10. Космология**

§ 46. Астрономия, астрофизика и космология	219
§ 47. Звездное небо. Мир звезд. Расстояние до звезд. Переменные звезды.	221
§ 48. Наша Галактика. Открытие других галактик. Квазары	229
§ 49. Теория Большого взрыва. Красное смещение. Определение расстояния до галактик	233
Задания для проектной деятельности	245
Глоссарий	247
Список литературы	255