

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
**«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф.
Горбачева» в г.Белово**

(филиал КузГТУ в г.Белово)

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКА»
(2 семестр)**

для студентов СПО специальности «09.02.07 Информационные системы и
программирование»

**Составитель
Белов С.В.**

Белово, 2021.

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Механические колебания. Упругие волны.	3
Лекция 2. Электромагнитные колебания. Колебательный контур.	25
Лекция 3. Электромагнитные волны, их свойства.	47
Лекция 4. Геометрическая оптика. Линзы.	76
Лекция 5. Волновые свойства света. Принцип относительности Эйнштейна.	90
Лекция 6. Предмет и задачи квантовой физики. Квантовая гипотеза Планка. Внешний фотоэлектрический эффект.	117
Лекция 7. Физика атома.	130
Лекция 8. Состав и строение атомного ядра. Изотопы. Ядерные силы. Дефект массы и энергия связи ядра.	146
Лекция 9. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Ядерные реакции, реакции деления и синтеза реакции	156
Лекция 10. Элементарные частицы. Способы наблюдения и регистрации элементарных частиц.	175
Лекция 11 . Строение и развитие Вселенной.	185
Лекция 12. Эволюция звезд. Гипотеза происхождения Солнечной системы	196
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	237

Лекция 1.

Механические колебания. Упругие волны.

Механические колебания

Колебаниями называются процессы, точно или приблизительно повторяющиеся через равные промежутки времени. Таким свойством повторяемости обладают, например, качания маятника часов, колебания струны или ножек камертона, напряжение между обкладками конденсатора в контуре радиоприемника и т. п.

В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания: механические, электромагнитные, электромеханические и т. д. Мы будем рассматривать механические колебания.

Вообще колебания можно классифицировать не только по характеру физических процессов, но и по способу возбуждения, а также по характеру зависимости от времени. По характеру зависимости от времени выделяют *периодические* колебания, характеризуемые такими функциями, что при любом t $f(t+T)=f(t)$, *непериодические*, если $f(t+T)\neq f(t)$ () и *гармонические колебания* (частный случай периодических колебаний).

По способу возбуждения: *свободные* (или *собственные*), *вынужденные*, *параметрические*, *автоколебания*.

Свободные колебания – колебания, происходящие за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему. Примером могут служить колебания шарика, подвешенного на нити (маятник). Для того чтобы вызвать колебания, можно либо толкнуть шарик, либо, отведя в сторону, отпустить его.

Вынужденные колебания – колебания, происходящие при периодическом внешнем воздействии. Примером могут служить колебания моста, возникающие при прохождении по нему людей, шагающих в ногу.

Параметрические колебания – колебания, происходящие при периодическом изменении за счет внешнего воздействия какого-то параметра колебательной системы.

Автоколебания – незатухающие колебания, возникающие и поддерживаемые в диссипативной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой.

Простейшими являются **гармонические колебания**, т. е. такие колебания, при которых колеблющаяся величина (например, отклонение маятника) изменяется со временем по закону синуса или косинуса.

Этот вид колебаний особенно важен по следующим причинам: во-первых, колебания в природе и в технике часто имеют характер, очень близкий к гармоническим, и, во-вторых, периодические процессы иной формы (с другой зависимостью от времени) могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний.

Гармонические колебания величины s описывается уравнениями типа

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Полезно знать, что $\cos \varphi = \sin(\varphi + \pi/2)$.

Данное выражение определяет гармонические колебания.

Величину A , равную максимальному смещению шара из положения равновесия, называют амплитудой колебаний. Выражение $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, стоящее под знаком косинуса, определяет смещение s в данный момент времени t . Его называют фазой колебания. В момент начала отсчета времени ($t = 0$) фаза колебания равна φ_0 . Поэтому величину φ_0 называют начальной фазой колебания. Фазу измеряют в радианах.

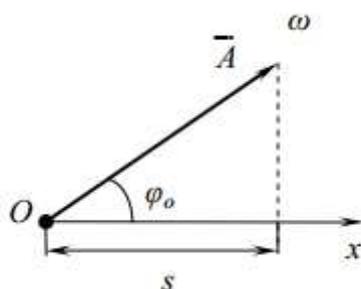
Величину ω_0 , входящую в выражение для фазы колебания, называют циклической (или круговой) частотой колебаний. Физический смысл циклической частоты связан с понятиями периода колебаний T и частоты колебаний ν . Периодом незатухающих колебаний называют тот наименьший промежуток времени T , по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебания. За время T совершается одно полное колебание.

Физические величины, описывающие колебания

Физическая величина	Обозначение	Определение	График или формула
Мгновенное значение величины	s	Мгновенное значение величины, колеблющейся по гармоническому закону (например, смещение или заряд на обкладках конденсатора)	
Амплитуда	A	Максимальное значение колеблющейся величины. Так как косинус изменяется в пределах от +1 до -1, то s может принимать значения от $+A$ до $-A$	
Круговая (циклическая) частота	ω	Число колебаний за 2π секунд	$\omega = 2\pi\nu$
Фаза колебаний	$\omega t + \varphi_0$	Величина, определяющая значение колеблющейся величины от времени, прошедшего от начала текущего периода колебаний	$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ Фаза – аргумент косинуса
Начальная фаза колебаний	φ	Величина, определяющая значение колеблющейся величины в начальный момент времени	При $t = 0$ $s = A \cos \varphi$
Период	T	Промежуток времени, в течение которого фаза колебания получает приращение 2π , т. е. $\omega(t+T) + \varphi_0 = (\omega t + T) + 2\pi$, откуда $T = \frac{2\pi}{\omega}$, или продолжительность одного полного колебания	
Частота колебаний	ν	Число полных колебаний, совершаемых в единицу времени	$\nu = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}$

Графически гармонические колебания можно изображать, используя метод вращающегося вектора амплитуды.

Идея метода следующая. Из произвольной точки O на оси x под углом φ_0 (начальная фаза колебания) откладывается вектор A , модуль которого равен амплитуде рассматриваемого колебания (рис.).



Приводя вектор A во вращение с угловой скоростью ω , равной циклической частоте колебания, получаем, что проекция конца вектора будет перемещаться по оси x и принимать значения от $-A$ до $+A$, а колеблющаяся величина изменяться со временем по закону $s = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.

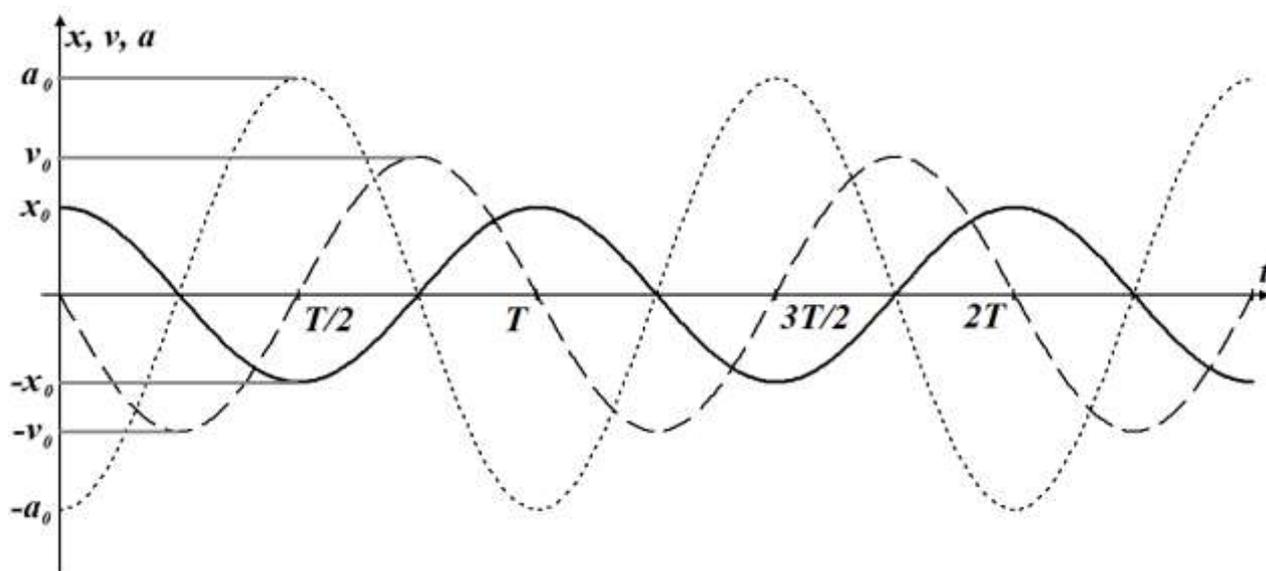
Колебания тела характеризуются не только его смещением, но также скоростью v и ускорением a . Тело движется прямолинейно вдоль оси Ox . Поэтому значения скорости v и ускорения a тела на положительное направление оси Ox можно получить, из уравнения гармонических колебаний:

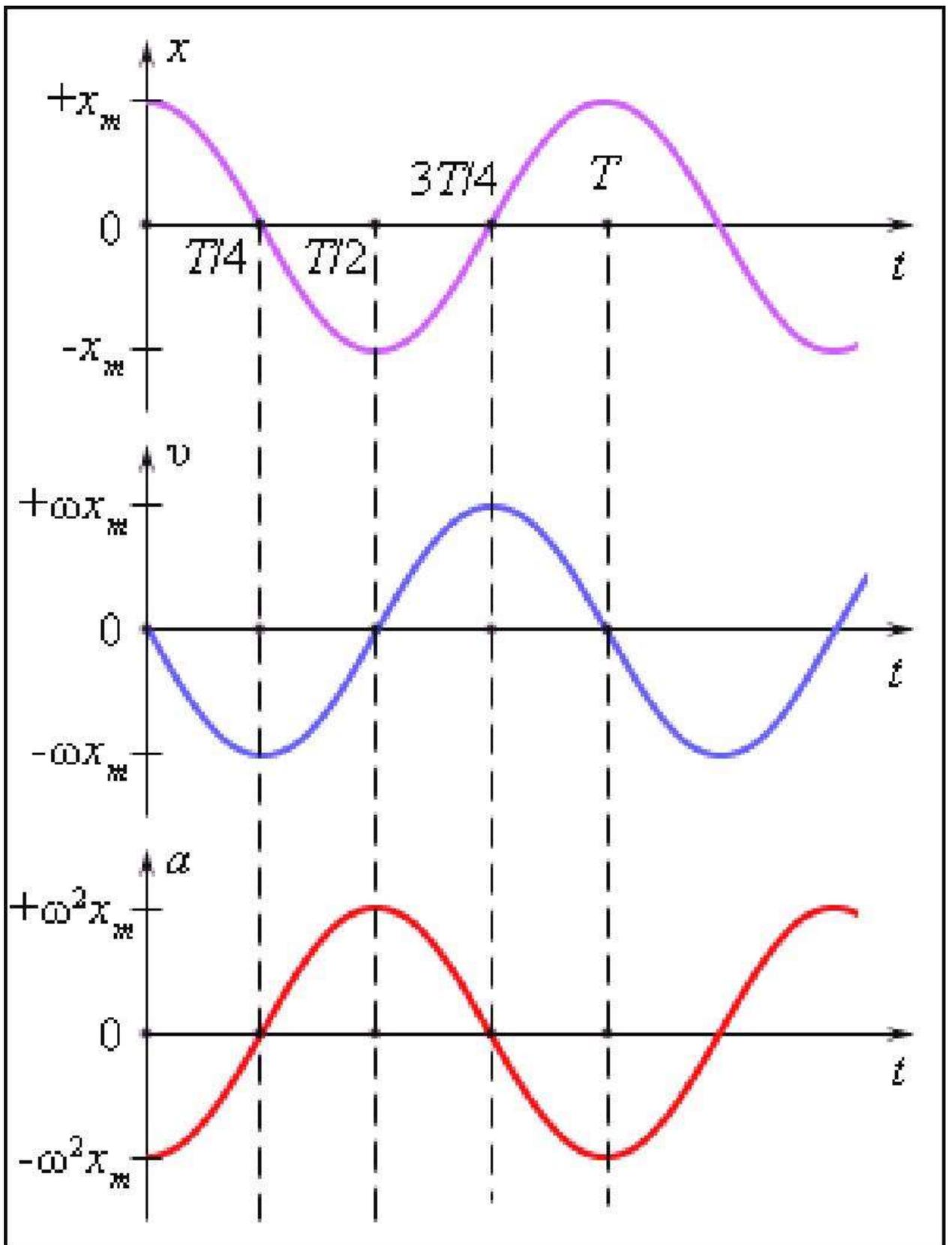
$$v = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$a = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 s.$$

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

Графики зависимости x , v и a от времени t показаны на рисунке, где введены обозначения $v_0 = x_0\omega_0$, $a_0 = x_0\omega_0^2$.





Графики координаты $x(t)$, скорости $v(t)$ и ускорения $a(t)$ тела, совершающего гармонические колебания

Сложение колебаний одного направления и одинаковой частоты

Пусть нужно сложить два колебания, которые определяются уравнениями $x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$; $x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$. Представим каждое колебание в виде вектора и найдем по правилам сложения векторов результирующий вектор (рис. 12), используя метод вращающегося вектора амплитуды.

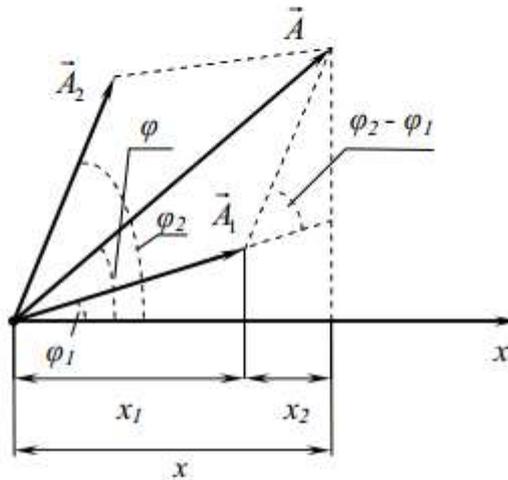


Рис. 12. Сложение колебаний одного направления и одинаковой частоты

Результирующее колебание равно сумме складываемых колебаний. Уравнение результирующего колебания

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega t + \varphi). \quad (33)$$

Результирующую амплитуду можно найти по теореме косинусов

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos[\pi - (\varphi_1 - \varphi_2)].$$

По формулам приведения в тригонометрии

$$\cos[\pi - (\varphi_1 - \varphi_2)] = -\cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

следовательно

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (34)$$

Результирующая амплитуда равна

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (35)$$

При $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm 2m\pi; (m = 0, 1, \dots)$ амплитуда результирующего колебания равна сумме амплитуд складываемых колебаний

$$A = A_1 + A_2.$$

При $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm(2m - 1)\pi; (m = 0, 1, 2, \dots)$ амплитуда результирующего колебания равна разности амплитуд складываемых колебаний

$$A = |A_1 - A_2|.$$

Следовательно, колебания в зависимости от разности фаз могут усиливать или ослаблять друг друга. Этот важный вывод используется при описании интерференции волн.

Начальная фаза

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}. \quad (36)$$

Биения

Биения – периодические изменения амплитуды колебания, возникающие при сложении двух гармонических колебаний с близкими частотами.

Складываемые колебания:

$$\begin{aligned} x_1 &= A \cos \omega t, \\ x_2 &= A \cos(\omega + \Delta\omega)t, \end{aligned} \quad (37)$$

$\Delta\omega \ll \omega$, начальные фазы равны нулю (рис. 13).

Результирующее колебание

$$x = \left(2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right) \cos \omega t, \quad \frac{\Delta\omega}{2} \ll \omega. \quad (38)$$

Амплитуда биений

$$A_0 = \left| 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right|. \quad (39)$$

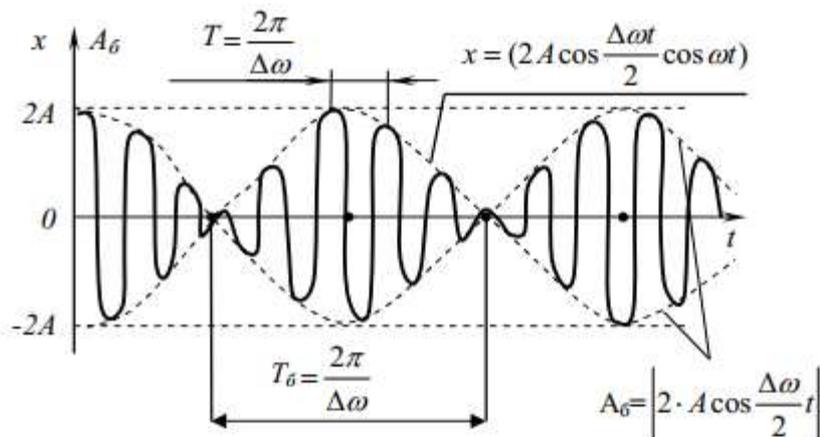


Рис. 13. Сложение двух колебаний с близкими частотами

Период биений

$$T_b = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \quad (40)$$

Частота биений равна разности частот складываемых колебаний.

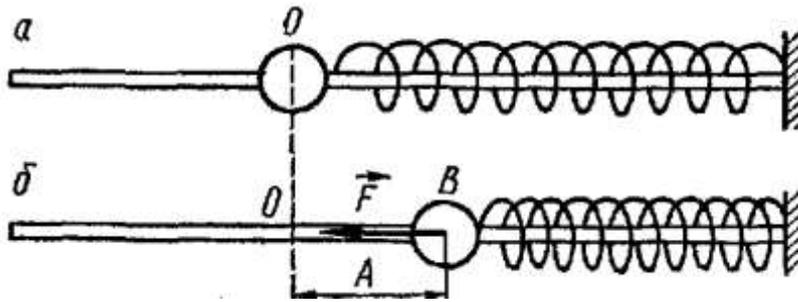
Свободные колебания. Пружинный маятник

Свободные колебания совершаются под действием внутренних сил системы после того, как система была выведена из положения равновесия. Для того чтобы свободные колебания совершались по гармоническому закону, необходимо, чтобы сила, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия, была пропорциональна смещению тела из положения равновесия и направлена в сторону, противоположную смещению:

Таким свойством обладает упругая сила в пределах применимости закона Гука:

$$F_{упр} = -kx.$$

Силы любой другой физической природы, удовлетворяющие этому условию, называются **квазиупругими**



Рассмотрим колебания, происходящие под действием упругой силы, например колебания пружинного маятника. Пружинный маятник

состоит из массивного шара, насаженного на горизонтальный стержень, вдоль которого он может скользить. На стержень надета стальная пружина, закрепленная на его конце и на шаре. Массой пружины по сравнению с массой шара можно пренебречь. Определим положение шара его смещением x из положения равновесия; в положении равновесия $x = 0$ (точка O на рис. а). Если его передвинуть в положение B (рис. б), сжав пружину, а затем отпустить, то он начнет ускоренно двигаться влево под действием упругой силы пружины $F = -kx$. Знак минус означает, что сила направлена в сторону, противоположную смещению x . Коэффициент k положителен. По второму закону Ньютона:

$$ma = -kx.$$

Решение данного уравнения имеет вид:

$$x = x_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ - **собственной частотой** колебательной системы.

Груз на пружине называют **линейным гармоническим осциллятором**.

Период T гармонических колебаний груза на пружине равен

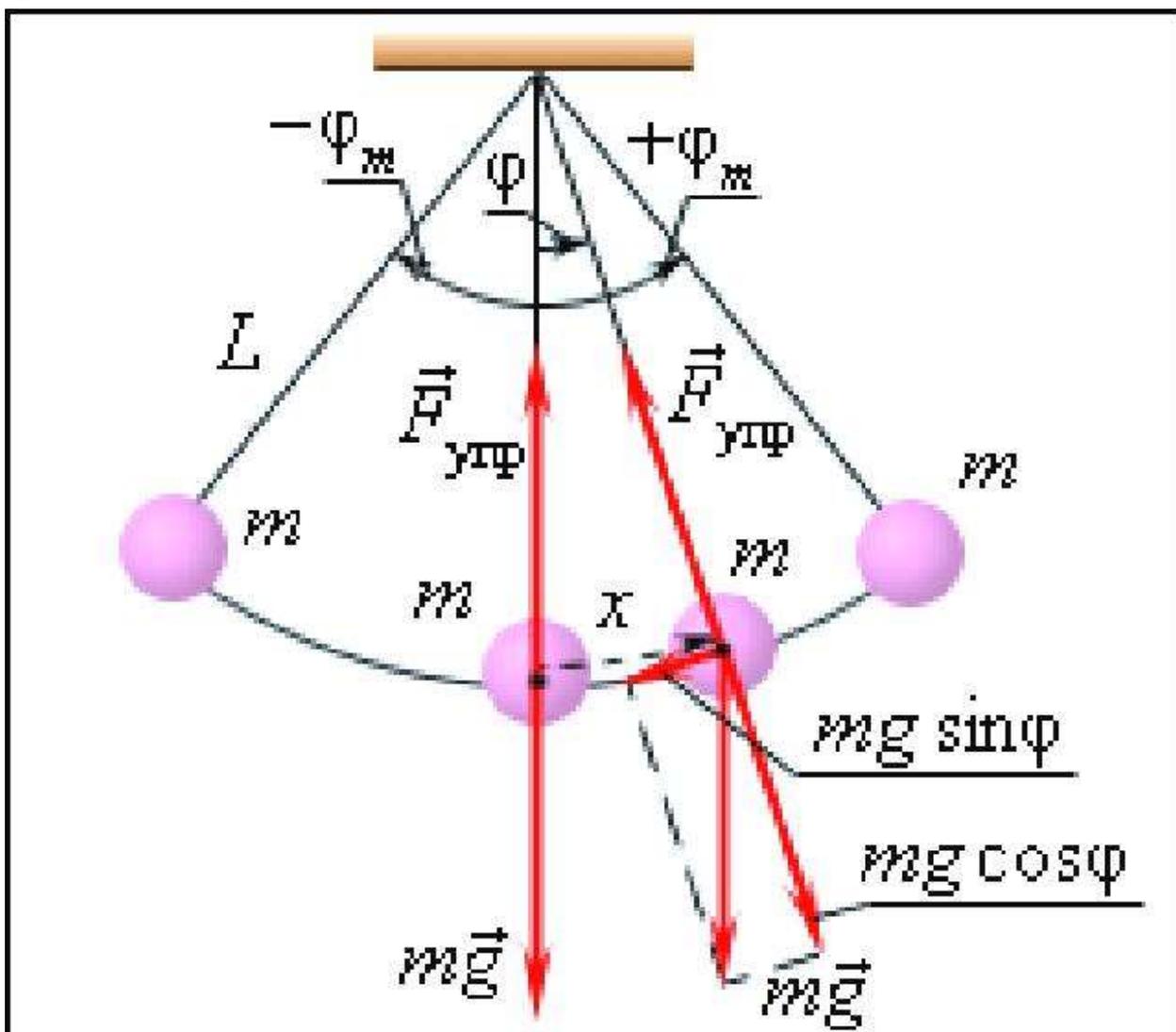
$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Приведем еще пример колебательной системы.

Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на невесомой, нерастяжимой нити и совершающую колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести. На практике математическим маятником можно считать тяжелое тело, подвешенное на легкой нити, длина которой во много раз больше размеров тела.

В положении равновесия, когда маятник висит по отвесу, сила тяжести mg уравновешивается силой натяжения нити. При отклонении маятника из положения равновесия на некоторый угол φ появляется касательная составляющая силы тяжести $F_t = -m \cdot g \sin \varphi$ (рис.). Знак «минус» в этой

формуле означает, что касательная составляющая направлена в сторону, противоположную отклонению маятника.



Для малых колебаний математического маятника второй закон Ньютона записывается в виде

$$m \cdot a_{\tau} = -m \cdot \frac{g}{l} \cdot x.$$

Таким образом, тангенциальное ускорение a_{τ} маятника пропорционально его смещению x , взятому с обратным знаком. Это как раз то условие, при котором система является гармоническим осциллятором. По общему правилу для всех систем, способных совершать свободные гармонические колебания, модуль коэффициента пропорциональности между ускорением и смещением из положения равновесия равен квадрату круговой частоты

$$\omega_0^2 = \frac{g}{l}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Период T колебаний математического маятника можно определить по формуле

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

где l – длина маятника.

Преобразование энергии при колебательном движении

Вычислим энергию тела массой m , совершающего свободные гармонические колебания с амплитудой A , и циклической частотой ω_0 . Потенциальная энергия E_n тела, смещенного на расстояние x от положения равновесия, измеряется той работой, которую произведет возвращающая сила $F = -kx$ (для пружинного маятника; для других систем аналогично), перемещая тело в положение равновесия. Эту работу можно найти, воспользовавшись формулой

$$A = -\frac{kx^2}{2},$$

откуда

$$E_n = \frac{kx^2}{2}.$$

Заменив x по формуле $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, получим

$$E_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Кинетическую энергию найдем, подставив в формулу $E_k = \frac{mv^2}{2}$

выражение для $v = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Заменив в уравнении для потенциальной энергии k через $m\omega_0^2$ и сложив почленно выражения для E_n и E_k , получим следующее выражение для полной энергии E колеблющегося тела:

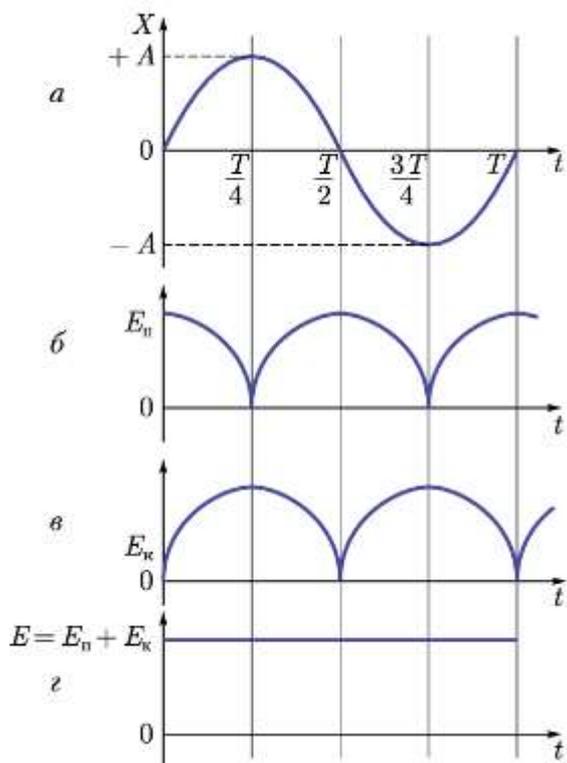
$$E = E_n + E_k = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 (\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)) = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2.$$

Таким образом, полная механическая энергия тела, совершающего гармонические колебания, пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. В случае свободных незатухающих колебаний полная механическая энергия не должна зависеть от времени. Поэтому амплитуда x_0 колебаний тоже не зависит от времени.

Потенциальная и кинетическая энергия колеблющегося тела пропорциональны квадрату амплитуды колебаний. Кинетическая и потенциальная энергии при свободных незатухающих гармонических колебаниях изменяются периодически.

Однако период изменения энергии в два раза меньше периода изменения смещения, скорости и ускорения. За время одного полного колебания кинетическая и потенциальная энергии дважды достигают своих амплитудных значений и дважды обращаются в нуль. Это связано с тем, что E_k и E_n пропорциональны квадратам косинуса и синуса фазы колебаний.

Максимальная потенциальная энергия тела, совершающего свободные гармонические колебания равна $\frac{1}{2}mA^2\omega_0^2$. Максимальная кинетическая энергия этого тела также равна $\frac{1}{2}mA^2\omega_0^2$.



Свободные затухающие колебания

На практике всякое колебание, которое не поддерживается извне, затухает, амплитуда его колебания с течением времени уменьшается. Причина затухания обуславливается силами, тормозящими движение, например, силой трения в месте подвеса при колебании маятника или силой сопротивления среды. Чтобы исследовать этот вопрос, надо написать уравнение, выражающее второй закон Ньютона, принимая в расчет силы сопротивления. Мы ограничимся рассмотрением случая, когда точка совершает прямолинейное колебание в вязкой среде. Сила сопротивления среды зависит от скорости движения точки и в случае малых скоростей ее можно считать пропорциональной скорости v ; направлена она в сторону, противоположную скорости; таким образом, силу сопротивления можно положить равной $-rv$, где r – постоянная величина, называемая коэффициентом сопротивления. Эта сила прибавится к упругой силе $-kx$, откуда полная сила, действующая на точку, равна $F = -kx - rv$ и, следовательно, второй закон Ньютона может быть написан в виде:

$$ma = -kx - rv.$$

Решение последнего уравнения имеет вид

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

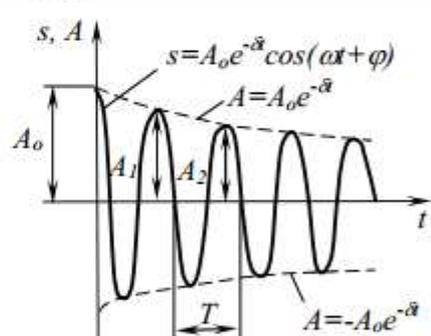
где введены обозначения $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ и $2\delta = \frac{r}{m}$.

Это решение представляет собою колебание с амплитудой $A_0 e^{-\delta t}$, уменьшающейся с течением времени. Период колебания $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$ в среде

с сопротивлением больше, чем период колебания $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ такой же массы m

под действием такой же упругой силы $F = -kx$ в среде без сопротивления. График зависимости x от времени представлен на рисунке. Как видно, колебания затухают со временем.

Свободные затухающие колебания пружинного маятника

Сила трения	$F_{\text{тр}} = -r \cdot v = -r \cdot \dot{x}$	Сила трения для пружинного маятника, совершающего малые колебания, пропорциональна скорости. Знак минус указывает на противоположные направления силы трения и скорости.
Закон движения маятника	$m \cdot \ddot{x} = -k \cdot x - r \cdot \dot{x}$	k – жесткость пружины; m – масса маятника; r – коэффициент сопротивления.
Дифференциальное уравнение затухающих колебаний	$\ddot{x} + \frac{r}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0,$ $\ddot{x} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = 0$	Учти, что собственная частота $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ и коэффициент затухания $\delta = \frac{r}{2 \cdot m}$.
Решение дифференциального уравнения	$x = A_0 \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi)$	 <p>A_0 – начальная амплитуда; ω_0 – собственная частота колебательной системы (при $\delta = 0$).</p>
Амплитуда затухающих колебаний	$A = A_0 \cdot e^{-\delta t}$	
Циклическая частота	$\omega = \sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)}$	
Период затухающих колебаний	$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)}}$	

Вынужденные колебания

Рассмотренные ранее колебания происходили с собственной частотой ω_0 , определяемой параметрами самой колебательной системы. Чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, необходимо компенсировать потери энергии.

Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют вынужденными колебаниями. За счет внешней силы периодически компенсируются потери энергии системы. Характер вынужденных колебаний определяется как внешней силой, так и

свойствами самой системы. По прошествии некоторого промежутка времени в системе устанавливаются вынужденные колебания с частотой, равной частоте внешней силы.

Пусть вынужденные колебания возникают под действием внешней периодически изменяющейся силы

$$F_{\text{вн}} = F_0 \cos \omega t ,$$

где F_0 – амплитуда вынуждающей силы, ω – циклическая частота.

Определим амплитуду вынужденных колебаний, считая, что затухание отсутствует. В этом случае на тело массой m действуют сила $F_{\text{вн}}$ и квазиупругая сила $F = -kx$.

В соответствии со вторым законом Ньютона:

$$ma = F_{\text{вн}} - kx$$

учитывая, что $a = -\omega^2 x$, а $k = m\omega_0^2$, получим

$$-m\omega^2 x = F_0 \cos \omega t - m\omega_0^2 x$$

откуда

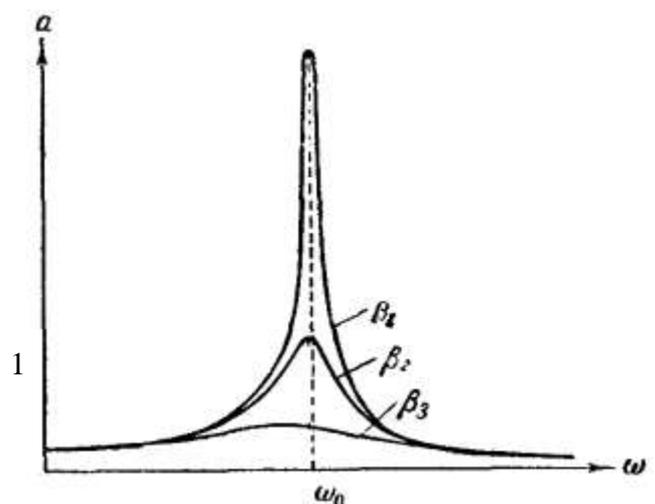
$$x = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t ,$$

где $A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$ – амплитуда вынужденных колебаний.

Анализируя выражение для амплитуды, можно сделать вывод, что чем меньше разность $\omega_0^2 - \omega^2$, тем больше амплитуда вынужденных колебаний.

С приближением частоты вынуждающей силы к частоте собственных колебаний колебательной системы амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. В идеальных колебательных системах (отсутствуют силы сопротивления и трения) амплитуда вынужденных колебаний при $\omega = \omega_0$ максимальна и стремится к бесконечности. Реальные колебательные системы характеризуются коэффициентом затухания β ; в них амплитуда конечна и достигает наибольшего значения при частоте, несколько меньшей ω_0 .

Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, когда частота колебаний приближается к частоте собственных колебаний системы.



На рисунке приведены резонансные кривые для различных коэффициентов затухания, откуда видно, что с увеличением коэффициента затухания кривые становятся более пологими.

Явление механического резонанса впервые было описано Г. Галилеем. Механический резонанс может быть как полезным, так и вредным. Явление резонанса используется в вибромашинах, работающих в горнодобывающей области, в электро- и радиотехнике. Вредное действие резонанса связано с разрушениями, которые он может вызвать. Чтобы предотвратить нежелательные последствия резонанса, необходимо при конструировании различных сооружений и машин учитывать даже небольшие периодически действующие силы и вибрации или использовать успокоители колебаний, основанные на явлении антирезонанса.

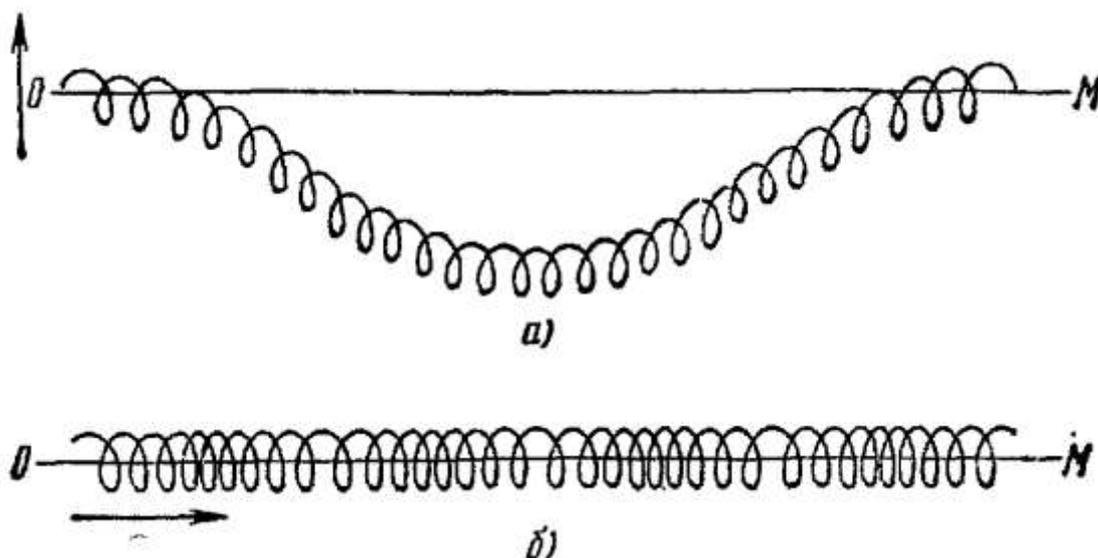
Упругие волны

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется волновым процессом (или волной). При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия.

Поэтому **основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.**

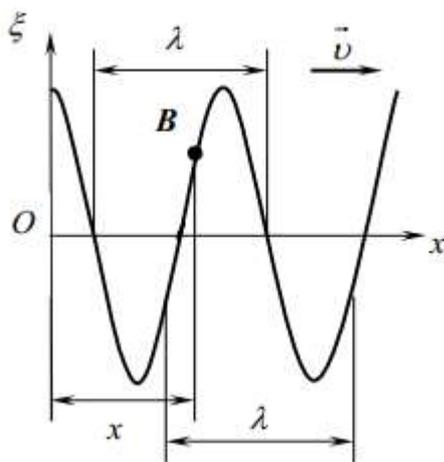
Упругой волной называют процесс распространения возмущения в упругой среде. При этом происходит распространение именно возмущения частиц среды, но сами частицы испытывают движения около своих положений равновесия. Среду при этом рассматривают как сплошную и непрерывную, отвлекаясь от ее атомистического строения.

Различают волны продольные и поперечные, в зависимости от того, движутся ли частицы около своих положений равновесия вдоль или поперек направления распространения волны. На рис. *а* изображен случай, когда мы заставляем крайний виток длинной проволочной спирали, все витки которой упруго связаны друг с другом, колебаться в направлении, перпендикулярном к *ОМ*. В этом случае и для всех последующих витков направление колебаний будет перпендикулярным к направлению их распространения. Это пример поперечных волн. На рис. *б* изображен иной случай, когда направление колебаний параллельно направлению распространения. Это пример продольных волн.



Несмотря на большое разнообразие физических процессов, вызывающих волны, их образование происходит по общему принципу. Возмущение, происходящее в какой-нибудь точке среды в некоторый момент времени, проявляется спустя определенное время на интересующем нас расстоянии от первоначальной точки, т. е. передается с определенной скоростью.

Упругая волна называется гармонической, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью v вдоль оси x , то есть приведена зависимость между смещением ξ частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием x этих частиц (например, частицы B) от источника колебаний O для какого-то фиксированного момента времени t



Приведенный график функции $\xi(x, t)$ похож на график гармонического колебания, однако они различны по существу. График волны даёт зависимость смещения всех частиц среды от расстояния до источника

колебаний в данный момент времени, а график колебаний – зависимость смещения данной частицы от времени.

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны λ (рис.). Длина волны равна тому расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период, то есть

$$\lambda v = \cdot T$$

или, учитывая, что $T = 1/v$, где v – частота колебаний,

$$\lambda v = v .$$

Если рассмотреть волновой процесс подробнее, то становится ясно, что колеблются не только частицы, расположенные вдоль оси x , а колеблется совокупность частиц, расположенных в некотором объеме, то есть волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает всё новые и новые области пространства. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t , называется **волновым фронтом**. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется **волновой поверхностью**. Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени – один. Волновой фронт также является волновой поверхностью. Волновые поверхности могут быть любой формы, а в простейшем случае они представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу, или совокупность концентрических сфер. Соответственно в этих случаях волна называется плоской или сферической

Уравнение бегущей волны

Рассмотрим распространение возмущения вдоль оси Ox в положительном направлении без затухания (амплитуды колебаний всех точек одинаковы и равны A). Зададим колебание точки с $x=0$ (источник колебаний) уравнением

$$s_0 = A \cos \omega t .$$

До точки с некоторой произвольной координатой x возмущение от начала координат дойдет через время τ , поэтому колебания этой точки запаздывают и описываются выражением

$$s = A \cos \omega(t - \tau) .$$

Так как время и скорость распространения волны связаны зависимостью $\tau = \frac{x}{v}$, то получим

$$s = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

где $\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \varphi$ - фаза волны.

Последнее уравнение является уравнением гармонической волны. Эта волна периодична во времени и пространстве, поскольку сама функция периодична и ее период равен 2π . Из периодичности во времени $\omega \Delta t = 2\pi$ находим $\Delta t = \frac{2\pi}{\omega}$. Этот промежуток времени называют периодом колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Из периодичности в пространстве $\omega \frac{\Delta x}{v} = 2\pi$ находим $\Delta x = \frac{2\pi v}{\omega} = Tv$.

Расстояние Δx называют длиной волны λ . Таким образом, длина волны – это расстояние между ближайшими точками среды, колеблющимися с разностью фаз 2π . Другими словами, это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний T :

$$\lambda = vT.$$

Поскольку $T = \frac{1}{\nu}$, где ν - частота колебаний, формулу для длины волны

можно представить в виде:

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

Уравнение гармонической волны принято записывать в симметричном более удобном и простом виде. Для этого внесем ω в скобку:

$$\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \omega t - \frac{\omega x}{v} = \omega t - kx,$$

где $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{Tv}$, или

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Величину k называют волновым числом.

Тогда уравнение гармонической волны примет следующий симметричный вид:

$$s = A \cos(\omega t - kx).$$

Отметим, что фигурирующая выше скорость v – это фазовая скорость волны, т. е. скорость, с которой распространяется определенное значение фазы волны. Именно фаза характеризует определенное состояние движения частиц среды при прохождении волны.

Если волна распространяется не вдоль оси Ox , а в произвольном направлении, то уравнение для такой волны имеет вид:

$$s = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}),$$

причем направление распространения волны определяется волновым вектором $\vec{k}(k_x; k_y; k_z)$, а $\vec{r}(x; y; z)$ – радиус-вектор, причем $\vec{k}\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$.

Определим форму волновых поверхностей – поверхностей, каждая точка которой в некоторый фиксированный момент времени имеет одинаковую фазу (и, следовательно, одинаковое смещение). Рассмотрим фазу волны $\varphi = \omega t - \vec{k}\vec{r}$ в некоторый момент времени $t = t_1$. Фаза в данный момент времени должна быть некоторой постоянной величиной для некоторой совокупности точек:

$$\omega t_1 - \vec{k}\vec{r} = \text{const},$$

или

$$\vec{k}\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z = C,$$

где $C = \omega t_1 - \text{const}$ – некоторая новая постоянная величина.

Уравнение $k_x x + k_y y + k_z z = C$ определяет плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{k}(k_x; k_y; k_z)$.

Если волна распространяется вдоль оси Ox , то уравнение ее фазовой поверхности имеет вид:

$$kx = C.$$

Оно определяет плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{k}(k; 0; 0)$ (перпендикулярную оси Ox).

Таким образом, гармонические волны являются плоскими волнами. В плоской волне волновые поверхности имеют вид плоскостей. Когда говорят, что плоская волна распространяется вдоль оси Ox , то это надо понимать так, что ее волновые поверхности (плоскости) перпендикулярны этой оси.

Рассмотренные выше волны, распространяющиеся вдоль одной прямой, являются частным случаем волн. В упругой среде возможны волны иного вида, например, сферические волны.

В сферической волне амплитуда убывает обратно пропорционально расстоянию r от источника колебаний. Зависимость смещения от координат и времени имеет вид:

$$s = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr).$$

Поверхность равных фаз в некоторый момент времени определяется уравнением $r = \text{const}$, т. е. представляет собой сферу радиуса r .

Отсюда и происходит название «сферическая» для такой волны.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Какое движение называют колебательным?
2. Какие колебания называют гармоническими?
3. Какие колебания называют свободными?
4. Дайте определения периода, частоты и амплитуды колебательного движения?
5. По какому закону изменяется скорость, ускорение при свободных гармонических колебаниях?
6. Какие механические колебания называют свободными?
7. От чего зависит период колебания математического, пружинного маятника?
8. От чего зависит полная энергия колеблющегося тела?
9. Какие механические колебания называются затухающими?
10. От чего зависит амплитуда, период затухающих колебаний?
11. Какие механические колебания называют вынужденными?
12. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний?
13. Какое явление называют механическим резонансом?
14. Что такое волновой процесс?
15. Что называется поперечной волной?
16. Что называется продольной волной?
17. Назовите характеристики волны. Какова связь между ними?
18. Запишите уравнение гармонической волны

Лекция № 2.

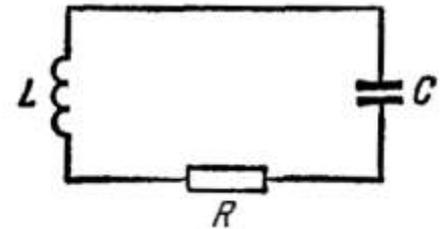
Электромагнитные колебания. Колебательный контур

Свободные электромагнитные колебания

Электромагнитными колебаниями называют периодические взаимосвязанные изменения зарядов, токов, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Простейшей идеализированной колебательной системой в механике являются, например, математический или пружинный маятник. Как было показано, в этих системах возникают свободные гармонические колебания. При механических колебаниях происходит периодическое превращение энергии системы из кинетической в потенциальную.

Аналогичные процессы протекают при возникновении электромагнитных колебаний в системе, называемой колебательным контуром. *Колебательный контур представляет собой электрическую цепь, состоящую из конденсатора C и индуктивности L , соединенных между собой.* Если сопротивление контура $R=0$, то такой колебательный контур называют идеальным.



Рассмотрим возникновение свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре, пользуясь аналогией между механическими и электромагнитными явлениями. Чтобы возбудить колебания в контуре, необходимо: 1) либо сообщить конденсатору C некоторый заряд, в результате чего он будет обладать энергией $W_{эл} = \frac{CU^2}{2}$; 2) либо возбудить в катушке индуктивности L ток, в результате чего она будет обладать энергией $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

Сообщим конденсатору заряд. В начальный момент времени ($t = 0$) заряд на обкладках конденсатора равен $q = q_0$ и ток в цепи отсутствует ($I = 0$). Между обкладками конденсатора появилось электрическое поле, энергия которого

$$W_{\max} = W_{эл} = \frac{CU_0^2}{2},$$

где C – емкость конденсатора, U_0 – максимальное напряжение между обкладками конденсатора. Такое состояние колебательного контура аналогично состоянию математического маятника, отклоненного от положения равновесия на малый угол (рис. а).

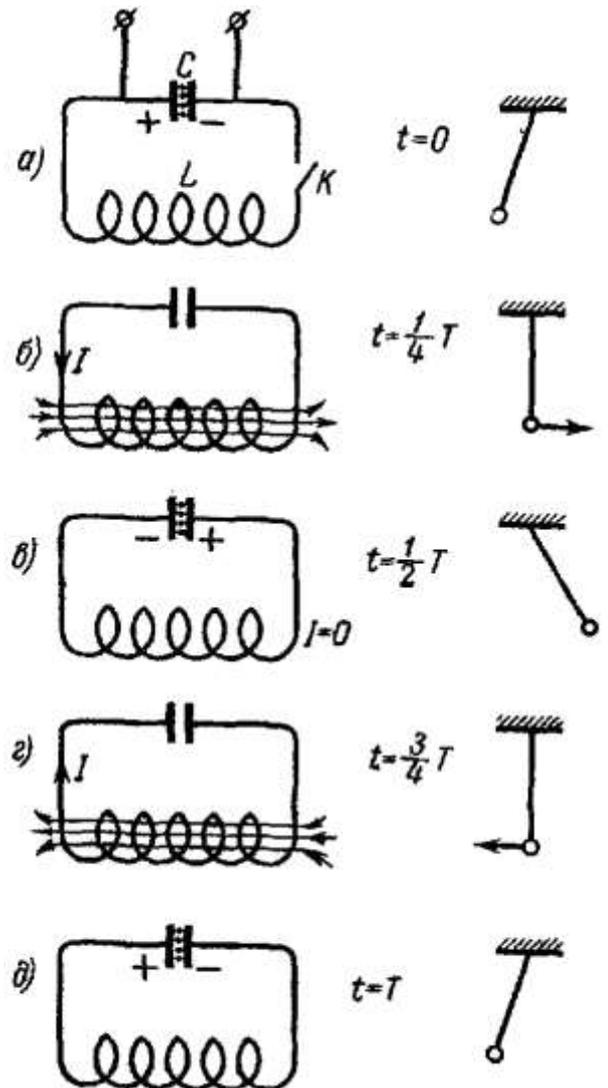
Замкнем конденсатор C на индуктивность L . Конденсатор начнет разряжаться, при этом в контуре возникает электрический ток, вследствие чего в катушке индуктивности появляется магнитное поле \vec{B} . В идеальном контуре через четверть периода энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля:

$$W_{\max} = W_{\text{м}} = \frac{LI_0^2}{2},$$

где L – индуктивность, I_0 – максимальный ток, протекающий через катушку. Напряжение между обкладками конденсатора при этом равно нулю: $U = 0$, $t = \frac{1}{4}T$. Такое состояние колебательного

контура аналогично состоянию математического маятника при прохождении положения равновесия, т. е. когда потенциальная энергия системы полностью превращается в кинетическую энергию (рис. б).

После этого магнитное поле должно быстро уменьшаться до нуля, так как нет токов, его поддерживающих. Изменяющееся магнитное поле вызывает ток самоиндукции в катушке индуктивности, который, согласно закону Ленца, поддерживает убывающий ток разрядки конденсатора. Таким образом, ток, продолжая течь в том же направлении, перезаряжает конденсатор. Когда закончится перезарядка конденсатора, ток в контуре будет равен нулю. Следовательно, через время, равное половине периода ($t = \frac{1}{2}T$), магнитное поле исчезнет, т.е. энергия магнитного поля полностью превратится в энергию электрического поля (рис. в). Это состояние



колебательного контура аналогично состоянию математического маятника, отклоненного от положения равновесия на такой же малый угол, но уже в сторону, противоположную состоянию, показанному на рис. а.

После этого конденсатор снова начинает разряжаться, в контуре возникает ток, но уже противоположного направления. Через время $t = \frac{3}{4}T$ конденсатор разрядится полностью, энергия электрического поля вновь превратится в энергию магнитного поля (рис. з).

Через время $t = T$ состояние контура станет таким же, как и в начальный момент времени (рис. д). Затем весь процесс повторяется.

В контуре возникают колебания, при которых изменяются напряжение между обкладками конденсатора и сила тока. При этом происходит превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля и наоборот, т. е. возникают электромагнитные колебания. Если сопротивление контура равно нулю, то процесс превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля должен продолжаться бесконечно, возникают незатухающие электромагнитные колебания. Эти колебания называют собственными, или свободными, так как они происходят без воздействия внешней вынуждающей силы.

Период незатухающих собственных колебаний, возникающих в колебательном контуре, определяется по формуле

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

которую называют формулой Томсона.

Циклическая, или круговая, частота собственных электромагнитных колебаний

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

В идеальном колебательном контуре колебания заряда происходят по закону

$$Q = Q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где Q_0 – максимальный заряд на обкладках конденсатора, φ_0 – начальная фаза.

Периодическое изменение заряда на обкладках конденсатора вызывает переменную разность потенциалов – переменное напряжение U и переменный электрический ток

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_0}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $U_0 = \frac{Q_0}{C}$ – амплитуда напряжения.

Учитывая, что электрический ток характеризует скорость изменения заряда на обкладках конденсатора, можно записать

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -Q_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -I_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $I_0 = Q_0 \omega_0$ – амплитуда тока.

Таким образом, по гармоническому закону изменяется не только заряд на обкладках конденсатора, но и напряжение и сила тока в контуре, т.е. возникают свободные электромагнитные колебания.

Из выражений для Q , U и I вытекает, что колебания заряда (напряжения) и тока в контуре сдвинуты по фазе на $\pi/2$. Следовательно, ток достигает максимального значения в те моменты времени, когда заряд (напряжение) на обкладках конденсатора равен нулю, и наоборот.

Превращение энергии в колебательном контуре

При зарядке конденсатора между его обкладками появляется электрическое поле, энергия которого $W_{эл} = \frac{CU^2}{2}$ или $W_{эл} = \frac{Q^2}{2C}$. При разрядке конденсатора на катушку индуктивности в ней возникает магнитное поле, энергия которого $W_m = \frac{LI^2}{2}$. В идеальном контуре максимальная энергия электрического поля равна максимальной энергии магнитного поля:

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Энергия заряженного конденсатора периодически изменяется со временем по закону

$$W_{эл} = \frac{CU_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$W_{эл} = \frac{Q_0^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Учитывая, что $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, получаем

$$W_{эл} = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Энергия магнитного поля соленоида изменяется со временем по закону

$$W_m = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2} \frac{L I_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Учитывая, что $I_0 = Q_0 \omega_0$, получаем

$$W_m = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

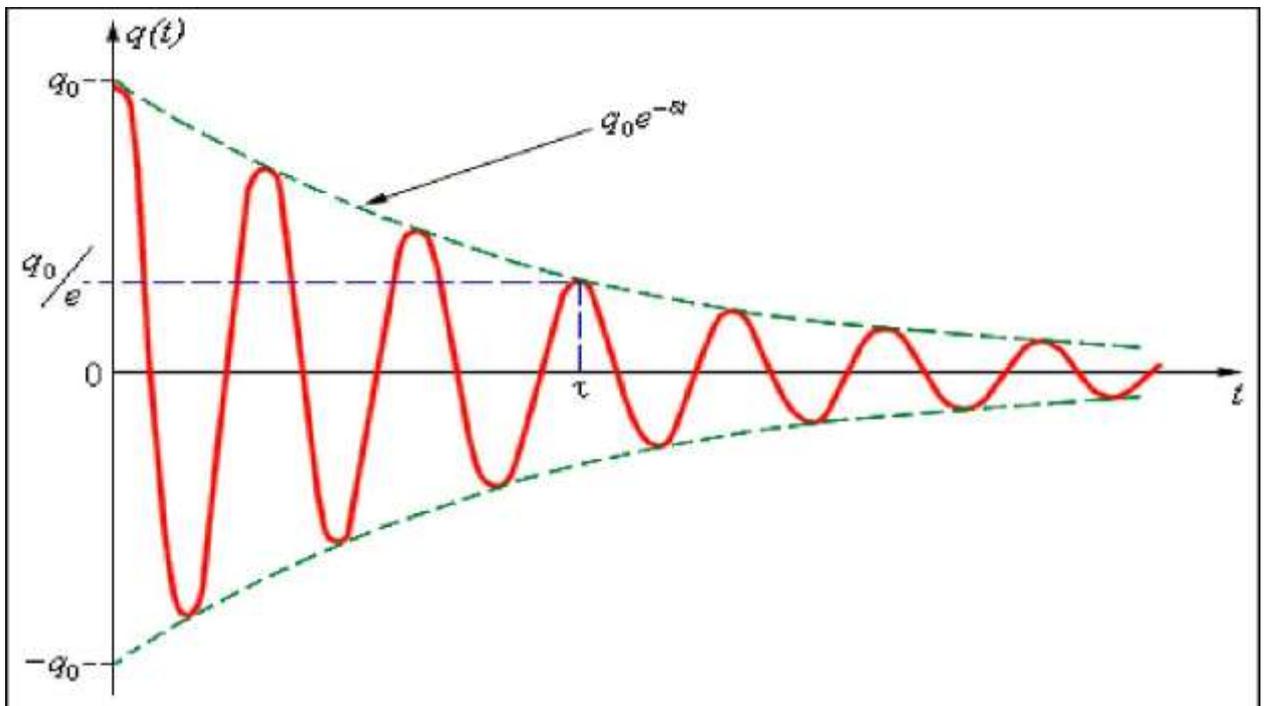
Полная энергия электромагнитного поля колебательного контура равна

$$W = W_{эл} + W_m = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2}.$$

Таким образом, в идеальном контуре суммарная энергия сохраняется, электромагнитные колебания незатухающие.

Затухающие электромагнитные колебания

Все реальные колебательные контуры содержат электрическое сопротивление R . Процесс свободных колебаний в таком контуре уже не подчиняется гармоническому закону. За каждый период колебаний часть электромагнитной энергии, запасённой в контуре, превращается в джоулево тепло, и колебания становятся затухающими (рис.).



Проводя аналогию между затухающими механическими и электромагнитными колебаниями, считаем, что R играет роль коэффициента сопротивления γ . Тогда уравнение затухающих электромагнитных колебаний имеет вид

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Это решение представляет собою колебание с амплитудой $Q_0 e^{-\alpha t}$, уменьшающейся с течением времени по экспоненциальному закону

Физическая величина $\delta = R/2L$ называется коэффициентом затухания.

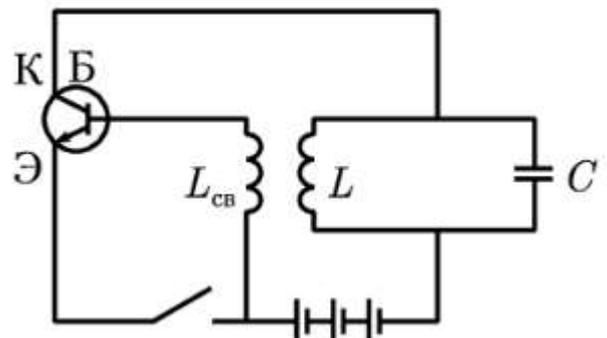
Скорость затухания зависит от электрического сопротивления R контура. Интервал времени $\tau = 1/\delta$, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в $e \approx 2,7$ раза, называется **временем затухания**.

Период колебания $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$ Частота колебаний

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Генератор незатухающих колебаний

Напомним, что автоколебательная система состоит из следующих основных частей: колебательной системы; источника энергии, за счет которого пополняется энергия в колебательной системе; клапана — устройства, регулирующего поступления энергии в колебательную систему определенными порциями; обратной связи, с помощью которой колебательная система управляет клапаном



В генераторе (рис.) колебательной системой служит контур (L и C), обладающий малым сопротивлением; источником энергии — батарея (выпрямитель), питающая напряжением транзистор; роль клапана выполняет транзистор, который регулирует поступления энергии порциями от источника в колебательный контур. Для самовозбуждения колебаний служит катушка обратной связи $L_{св}$, индуктивно связанная с катушкой колебательного контура L . В генераторе роль клапана выполняет транзистор типа р-п-р. Транзистор имеет три электрода: эмиттер Э, коллектор К, базу Б. Эмиттерный переход открыт, если положительный полюс источника соединен с эмиттером, а отрицательный — с базой. Транзистор не пропускает ток, если потенциал базы положителен по отношению к эмиттеру. В зависимости от потенциала базы по отношению к эмиттеру транзистор будет «закрит» или «открыт».

Если ключ замкнуть, то в цепи транзистора возникает ток, который заряжает конденсатор C колебательного контура. В контуре возникают

свободные колебания. Ток, проходящий через катушку L контура, индуцирует переменное напряжение в катушке обратной связи $L_{св}$, которое подается на эмиттерный переход транзистора. В первый полупериод колебаний транзистор будет «открыт», т. е. в коллекторной цепи транзистора будет течь ток. Этот ток совпадает по направлению с током в катушке контура. Во второй полупериод ток в контуре изменяет направление, транзистор будет «закрыт», колебательный контур в течение полупериода отключен от источника энергии. В последующий период процесс повторяется. Таким образом, транзистор включает и отключает источник постоянного тока, за счет энергии которого в контуре поддерживаются незатухающие колебания.

Амплитуда и период колебаний определяются свойствами колебательной системы.

Вынужденные электромагнитные колебания.

Рассмотренные выше колебания происходили с частотами, определяемыми параметрами самой колебательной системы. Чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, надо компенсировать потери энергии. Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС, называют вынужденными электромагнитными колебаниями.

Для того чтобы в колебательном контуре возникли вынужденные колебания, необходимо подвести к контуру внешнюю, периодически изменяющуюся по гармоническому закону, ЭДС или переменное напряжение

$$U = U_0 \cos \omega t ,$$

где U_0 – максимальное значение напряжения, ω – циклическая (круговая) частота.

Тогда аналогично вынужденным механическим колебаниям уравнение вынужденных электромагнитных колебаний имеет вид

$$Q = Q_0 \cos(\omega t + \varphi).$$

В установившемся режиме вынужденные колебания происходят с частотой ω и являются гармоническими.

Амплитуда и фаза колебаний зависят от ω и определяются следующими выражениями:

$$Q_0 = \frac{U_0}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}.$$

Сила тока в контуре при установившихся колебаниях – это скорость изменения заряда, определяется по формуле:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -Q_0 \omega \sin(\omega t + \varphi).$$

Из сравнения формул Q , U и I следует, что колебания заряда (напряжения) и тока сдвинуты на $\pi/2$.

Переменный ток

Как известно, сила тока в любой момент времени пропорциональна ЭДС источника тока (закон Ома для полной цепи). Если ЭДС источника не изменяется со временем и остаются неизменными параметры цепи, то через некоторое время после замыкания цепи изменения силы тока прекращаются, в цепи течет постоянный ток.

Однако в современной технике широко применяются не только источники постоянного тока, но и различные генераторы электрического тока, в которых ЭДС периодически изменяется. При подключении в электрическую цепь генератора переменной ЭДС в цепи возникают вынужденные электромагнитные колебания или переменный ток.

Переменный ток – это периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника

или

Переменный ток – это электрический ток, который изменяется с течением времени по гармоническому закону.

Мы в дальнейшем будем изучать вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, гармонически меняющегося с частотой ω по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$u = U_m \cdot \cos \omega t,$$

где u – мгновенное значение напряжения, U_m – амплитуда напряжения, ω – циклическая частота колебаний. Если напряжение меняется с частотой ω , то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой, но колебания силы тока не обязательно должны совпадать по фазе с колебаниями напряжения. Поэтому в общем случае

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_c),$$

где φ_c – разность (сдвиг) фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

Переменный ток обеспечивает работу электрических двигателей в станках на заводах и фабриках, приводит в действие осветительные приборы

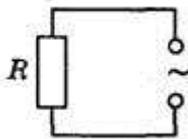
в наших квартирах и на улице, холодильники и пылесосы, отопительные приборы и т.п. Частота колебаний напряжения в сети равна 50 Гц. Такую же частоту колебаний имеет и сила переменного тока. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз поменяет свое направление. Частота 50 Гц принята для промышленного тока во многих странах мира. В США частота промышленного тока 60 Гц.

Резистор в цепи переменного тока

Пусть цепь состоит из проводников с малой индуктивностью и большим сопротивлением R (из резисторов). Например, такой цепью может быть нить накаливания электрической лампы и подводящие провода. Величину R , которую мы до сих пор называли электрическим сопротивлением или просто сопротивлением, теперь будем называть *активным сопротивлением*. В цепи переменного тока могут быть и другие сопротивления, зависящие от индуктивности цепи и ее емкости. Сопротивление R называется активным потому, что, только на нем выделяется энергия, т.е.

Сопротивление элемента электрической цепи (резистора), в котором происходит превращение электрической энергии во внутреннюю энергию, называют *активным сопротивлением*.

Итак, в цепи имеется резистор, активное сопротивление которого R , а катушка индуктивности и конденсатор отсутствуют (рис.).



Пусть напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону

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

Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения. Поэтому можно считать, что мгновенное значение силы тока определяется законом Ома:

$$i = U/R = U_m \cdot \sin \omega t / R = I_m \cdot \sin \omega t .$$

Следовательно, в проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения (рис. 2), а амплитуда силы тока равна амплитуде напряжения, деленной на сопротивление:

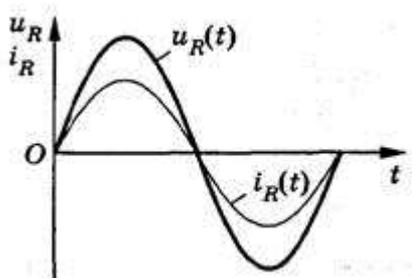


Рис. 2

При небольших значениях частоты переменного тока активное сопротивление проводника не зависит от частоты и практически совпадает с его электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока.

Катушка в цепи переменного тока

Индуктивность влияет на силу переменного тока в цепи. Это можно обнаружить с помощью простого опыта. Составим цепь из катушки большой индуктивности и лампы накаливания (рис. 3). С помощью переключателя можно присоединять эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть одинаковы. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока.

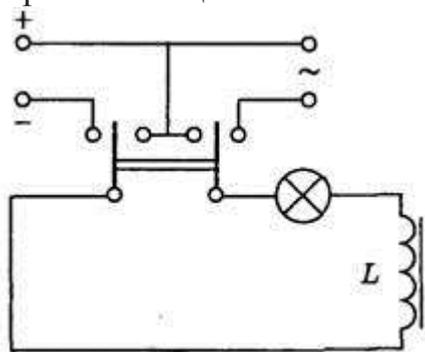


Рис. 3

Объясняется это самоиндукцией. При подключении катушки к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Возникающее при нарастании силы тока вихревое электрическое поле тормозит движение электронов. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает наибольшего (установившегося) значения, соответствующего данному постоянному напряжению. Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигать тех установившихся значений, которые она приобрела бы с течением времени при постоянном напряжении, равном максимальному значению переменного напряжения. Следовательно, максимальное значение силы переменного тока (его амплитуда) ограничивается индуктивностью L цепи и будет тем меньше, чем больше индуктивность и чем больше частота приложенного напряжения.

Докажем это математически. Пусть в цепь переменного тока включена идеальная катушка с электрическим сопротивлением провода, равным нулю (рис. 4). При изменениях силы тока по гармоническому закону

$$i = I_m \cdot \cos \omega t .$$

в катушке возникает ЭДС самоиндукции

$$e = -L \cdot i' = I_m \cdot L \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

где L – индуктивность катушки, ω – циклическая частота переменного тока.

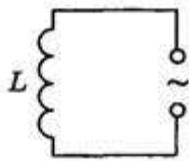


Рис. 4

Так как электрическое сопротивление катушки равно нулю, то ЭДС самоиндукции в ней в любой момент времени равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки, созданному внешним генератором:

$$u = -e = -I_m \cdot L \cdot \omega \cdot \sin \omega t .$$

Следовательно, при изменении силы тока в катушке по гармоническому закону напряжение на ее концах изменяется тоже по гармоническому закону, но со сдвигом фазы:

$$u = I_m \cdot L \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \pi/2) .$$

Следовательно, колебания напряжения на катушке индуктивности опережают колебания силы тока на $\pi/2$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на $\pi/2$.

В момент, когда напряжение на катушке достигает максимума, сила тока равна нулю (рис. 5). В момент, когда напряжение становится равным нулю, сила тока максимальна по модулю.

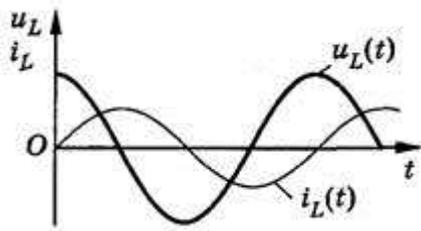


Рис. 5

Произведение $I_m \cdot L \cdot \omega$ является амплитудой колебаний напряжения на катушке:

$$U_m = I_m \cdot L \cdot \omega .$$

Отношение амплитуды колебаний напряжения на катушке к амплитуде колебаний силы тока в ней называется *индуктивным сопротивлением* (обозначается X_L):

$$X_L = U_m / I_m = L \cdot \omega .$$

Связь амплитуды колебаний напряжения на концах катушки с амплитудой колебаний силы тока в ней совпадает по форме с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока:

$$I_m = U_m / X_L .$$

В отличие от электрического сопротивления проводника в цепи постоянного тока, индуктивное сопротивление не является постоянной величиной, характеризующей данную катушку. Оно прямо пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда колебаний силы тока в катушке при постоянном значении амплитуды колебаний напряжения должна убывать обратно пропорционально частоте. Постоянный ток вообще «не замечает»

индуктивности катушки. При $\omega = 0$ индуктивное сопротивление равно нулю ($X_L = 0$).

Зависимость амплитуды колебаний силы тока в катушке от частоты приложенного напряжения можно наблюдать в опыте с генератором переменного напряжения, частоту которого можно изменять. Опыт показывает, что увеличение в два раза частоты переменного напряжения приводит к уменьшению в два раза амплитуды колебаний силы тока через катушку.

Конденсатор в цепи переменного тока

Рассмотрим процессы, протекающие в электрической цепи переменного тока с конденсатором. Если подключить конденсатор к источнику постоянного тока, то в цепи возникнет кратковременный импульс тока, который зарядит конденсатор до напряжения источника, а затем ток прекратится. Если заряженный конденсатор отключить от источника постоянного тока и соединить его обкладки с выводами лампы накаливания, то конденсатор будет разряжаться, при этом наблюдается кратковременная вспышка лампы.

При включении конденсатора в цепь переменного тока процесс его зарядки длится четверть периода. После достижения амплитудного значения напряжение между обкладками конденсатора уменьшается и конденсатор в течение четверти периода разряжается. В следующую четверть периода конденсатор вновь заряжается, но полярность напряжения на его обкладках изменяется на противоположную и т.д. Процессы зарядки и разрядки конденсатора чередуются с периодом, равным периоду колебаний приложенного переменного напряжения.

Как и в цепи постоянного тока, через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, электрические заряды не проходят. Но в результате периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора по проводам, соединенным с его выводами, течет переменный ток. Лампа накаливания, включенная последовательно с конденсатором в цепь переменного тока (рис. 6), кажется горячей непрерывно, так как человеческий глаз при высокой частоте колебаний силы тока не замечает периодического ослабления свечения нити лампы.

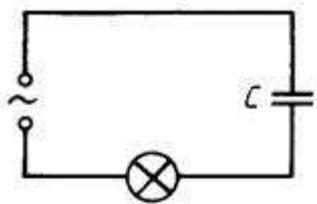


Рис. 6

Установим связь между амплитудой колебаний напряжения на обкладках конденсатора и амплитудой колебаний силы тока. При изменениях напряжения на обкладках конденсатора по гармоническому закону

$$u = U_m \cdot \cos \omega t,$$

заряд на его обкладках изменяется по закону:

$$q=C \cdot u=U_m \cdot C \cdot \cos \omega t .$$

Электрический ток в цепи возникает в результате изменения заряда конденсатора: $i = q'$. Поэтому колебания силы тока в цепи происходят по закону:

$$i=-U_m \cdot \omega \cdot C \cdot \sin \omega t=U_m \cdot \omega \cdot C \cdot \cos (\omega t+\pi / 2)$$

Следовательно, колебания напряжения на обкладках конденсатора в цепи переменного тока отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi / 2$ или колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на $\pi / 2$ (рис. 7). Это означает, что в момент, когда конденсатор начинает заряжаться, сила тока максимальна, а напряжение равно нулю. После того как напряжение достигает максимума, сила тока становится равной нулю и т.д.

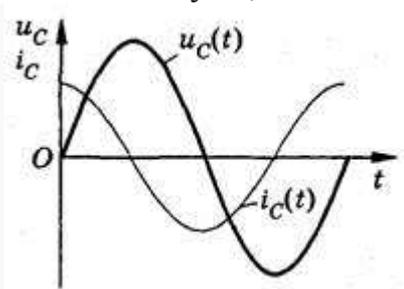


Рис. 7

Произведение $U_m \cdot \omega \cdot C$ является амплитудой колебаний силы тока:

$$I_m=U_m \cdot \omega \cdot C .$$

Отношение амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе к амплитуде колебаний силы тока называют емкостным сопротивлением конденсатора (обозначается X_C):

$$X_C=U_m / I_m=1 / \omega \cdot C .$$

Связь между амплитудным значением силы тока и амплитудным значением напряжения по форме совпадает с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока, в котором вместо электрического сопротивления фигурирует емкостное сопротивление конденсатора:

$$I_m=U_m X_C .$$

Емкостное сопротивление конденсатора, как и индуктивное сопротивление катушки, не является постоянной величиной. Оно обратно пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда колебаний силы тока в цепи конденсатора при постоянной амплитуде колебаний напряжения на конденсаторе возрастает прямо пропорционально частоте.

Закон Ома для электрической цепи переменного тока

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора, конденсатора и катушки (рис. 8). Если к выводам этой электрической цепи приложить электрическое напряжение, изменяющееся по гармоническому закону с частотой ω и амплитудой U_m , то в цепи возникнут вынужденные колебания силы тока с той же частотой и некоторой амплитудой I_m . Установим связь между амплитудами колебаний силы тока и напряжения.

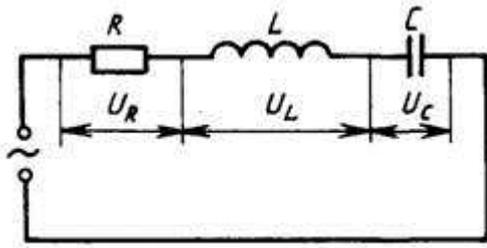


Рис. 8

В любой момент времени сумма мгновенных значений напряжений на последовательно включенных элементах цепи равна мгновенному значению приложенного напряжения:

$$u = u_R + u_L + u_C \quad (1)$$

Во всех последовательно включенных элементах цепи изменения силы тока происходят практически одновременно, так как электромагнитные взаимодействия распространяются со скоростью света. Поэтому можно считать, что колебания силы тока во всех элементах последовательной цепи происходят по закону:

$$i = I_m \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

Колебания напряжения на резисторе совпадают по фазе с колебаниями силы тока, колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе на $\pi/2$ от колебаний силы тока, а колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$. Поэтому уравнение (1) можно записать так:

$$u = U_{Rm} \cdot \cos \omega t + U_{Lm} \cdot \cos(\omega t + \pi/2) + U_{Cm} \cdot \cos(\omega t - \pi/2)$$

где U_{Rm} , U_{Cm} и U_{Lm} – амплитуды колебаний напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке.

Амплитуду колебаний напряжения в цепи переменного тока можно выразить через амплитудные значения напряжения на отдельных ее элементах, воспользовавшись методом векторных диаграмм.

При построении векторной диаграммы необходимо учитывать, что колебания напряжения на резисторе совпадают по фазе с колебаниями силы тока, поэтому вектор, изображающий амплитуду напряжения U_{Rm} , совпадает по направлению с вектором, изображающим амплитуду силы тока I_m . Колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе на $\pi/2$ от колебаний силы тока, поэтому вектор U_{Cm} отстает от вектора I_m на угол 90° . Колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока по фазе на $\pi/2$, поэтому вектор U_{Lm} опережает вектор I_m на угол 90° (рис. 9).

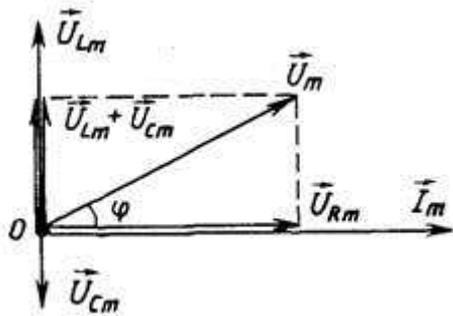


Рис. 9

На векторной диаграмме мгновенные значения напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке определяются проекциями на горизонтальную ось векторов \vec{U}_{Rm} , \vec{U}_{Cm} и \vec{U}_{Lm} , вращающихся с одинаковой угловой скоростью ω против часовой стрелки. Мгновенное значение напряжения во всей цепи равно сумме мгновенных напряжений u_R , u_C и u_L на отдельных элементах цепи, т. е. сумме проекций векторов \vec{U}_{Rm} , \vec{U}_{Cm} и \vec{U}_{Lm} на горизонтальную ось. Так как сумма проекций векторов на произвольную ось равна проекции суммы этих векторов на ту же ось, то амплитуду полного напряжения можно найти как модуль суммы векторов:

$$\vec{U}_m = \vec{U}_{Rm} + \vec{U}_{Cm} + \vec{U}_{Lm}.$$

Из рисунка 9 видно, что амплитуда напряжений на всей цепи равна

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}, \quad (4)$$

или

$$U_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2} = I_m \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I_m \cdot \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}.$$

Отсюда

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}}. \quad (5)$$

Введя обозначение для *полного сопротивления* цепи переменного тока

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}, \quad (6)$$

выразим связь между амплитудными значениями силы тока и напряжения в цепи переменного тока следующим образом:

$$I_m = \frac{U_m}{Z}. \quad (7)$$

Это выражение называют *законом Ома для цепи переменного тока*.

Из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 9, видно, что фаза колебаний полного напряжения равна $\omega t + \varphi$. Поэтому мгновенное значение полного напряжения определяется формулой:

$$u = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

Начальную фазу φ можно найти из векторной диаграммы:

$$\cos \varphi = \frac{U_{Rm}}{U_m} = \frac{I_m \cdot R}{I_m \cdot \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}} = \frac{R}{Z}. \quad (9)$$

Мощность в цепи переменного тока

Мощность в цепи постоянного тока определяется произведением напряжения на силу тока:

$$P=U \cdot I$$

Физический смысл этой формулы прост: так как напряжение U численно равно работе электрического поля по перемещению единичного заряда, то произведение $U \cdot I$ характеризует работу по перемещению заряда за единицу времени, протекающего через поперечное сечение проводника, т.е. является мощностью. Мощность электрического тока на данном участке цепи положительна, если энергия поступает к этому участку из остальной сети, и отрицательна, если энергия с этого участка возвращается в сеть. На протяжении очень малого интервала времени переменный ток можно считать неизменным. Поэтому мгновенная мощность в цепи переменного тока определяется такой же формулой:

$$p=u \cdot i$$

Пусть напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону

$$u = U_m \cdot \cos \omega t$$

(с тем же успехом, разумеется, вместо $u = U_m \cdot \cos \omega t$ можно было бы записать $u = U_m \cdot \sin \omega t$ то и сила тока будет меняться со временем гармонически с той же частотой, но в общем случае будет сдвинута по фазе относительно напряжения:

$$i = I_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_c),$$

где φ_c – сдвиг фаз между силой тока и напряжением. Поэтому для мгновенной мощности можно записать:

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \varphi_c).$$

При этом мощность меняется со временем как по модулю, так и по знаку. В течение одной части периода энергия поступает к данному участку цепи ($p > 0$), но в течение другой части периода некоторая доля энергии вновь возвращается в сеть ($p < 0$). Как правило, во всех случаях нам надо знать среднюю мощность на участке цепи за достаточно большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно определить среднюю мощность за один период.

Чтобы найти среднюю мощность за период, преобразуем полученную формулу таким образом, чтобы выделить в ней член, не зависящий от времени. С этой целью воспользуемся известной формулой для произведения двух косинусов:

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)}{2}.$$

В рассматриваемом случае $\alpha = \omega t$ и $\beta = \omega t + \varphi_c$. Поэтому

$$p = \frac{U_m \cdot I_m}{2} [\cos \varphi_c + \cos(2\omega t + \varphi_c)] = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cos \varphi_c + \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi_c).$$

Выражение для мгновенной мощности состоит из двух слагаемых. Первое не зависит от времени, а второе дважды за каждый период изменения напряжения изменяет знак: в течение какой-то части периода энергия поступает в цепь от источника переменного напряжения, а в течении другой части возвращается обратно. Поэтому среднее значение второго слагаемого за период равно нулю. Следовательно, средняя мощность P за период равна первому члену, не зависящему от времени:

$$P = (U_m \cdot I_m / 2) \cos \varphi_c. \quad (10)$$

При совпадении фазы колебаний силы тока и напряжения (для активного сопротивления R) среднее значение мощности равно:

$$P = U_m \cdot I_m / 2 = I_m^2 \cdot R / 2.$$

Для того чтобы формула для расчета мощности переменного тока совпадала по форме с аналогичной формулой для постоянного тока ($P = I \cdot U = I^2 \cdot R$), вводятся понятия действующих значений силы тока и напряжения. Из равенства мощностей получим

$$P = \frac{I_m^2 \cdot R}{2} = I^2 \cdot R \text{ или } \frac{I_m^2}{2} = I^2 .$$

Действующим значением силы тока называют величину, в $\sqrt{2}$ раз меньшую ее амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Действующее значение силы тока равно силе такого постоянного тока, при котором средняя мощность, выделяющаяся в проводнике в цепи переменного тока, равна мощности, выделяющейся в том же проводнике в цепи постоянного тока.

Аналогично можно доказать, что

действующее значение переменного напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитудного значения:

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

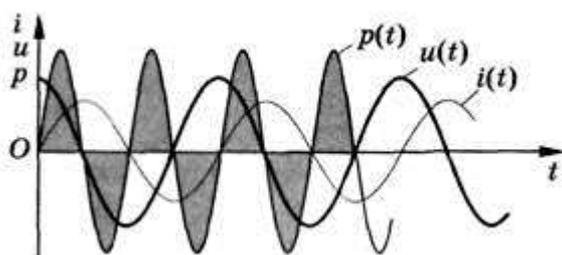
Заметим, что обычно электрическая аппаратура в цепях переменного тока показывает действующие значения измеряемых величин. Переходя к действующим значениям силы тока и напряжения, уравнение (10) можно переписать:

$$P = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos \varphi_c = U \cdot I \cos \varphi_c . \quad (10)$$

Таким образом, мощность переменного тока на участке цепи определяется именно действующими значениями силы тока и напряжения. Она зависит также от сдвига фаз φ_c между напряжением и током. Множитель $\cos \varphi_c$ в формуле называется *коэффициентом мощности*.

В случае, когда $\varphi_c = \pm \pi/2$, энергия, поступающая к участку цепи за период, равна нулю, хотя в цепи и существует ток. Так будет, в частности, если цепь содержит только катушку индуктивности или только конденсатор. Как же средняя мощность может оказаться равной нулю при наличии тока в цепи? Это поясняют приведенные на рисунке 10 графики изменения со временем мгновенных значений напряжения, силы тока и мощности при $\varphi_c = -\pi/2$ (чисто индуктивное сопротивление участка цепи). График зависимости мгновенной мощности от времени можно получить, перемножив значения силы тока и напряжения в каждый момент времени. Из этого графика видно, что в течение одной четверти периода мощность положительна и энергия поступает к данному участку цепи; но в течение следующей четверти периода мощность отрицательна, и данный участок отдает без потерь обратно в сеть полученную ранее энергию. Поступающая в течение четверти

периода энергия запасается в магнитном поле тока, а затем без потерь возвращается в сеть.



Лишь при наличии проводника с активным сопротивлением в цепи, не содержащей движущихся проводников, электромагнитная энергия превращается во внутреннюю энергию проводника, который нагревается. Обратного превращения внутренней энергии в электромагнитную на участке с активным сопротивлением уже не происходит.

При проектировании цепей переменного тока нужно добиваться, чтобы $\cos \varphi_c$ не был мал. Иначе значительная часть энергии будет циркулировать по проводам от генератора к потребителям и обратно. Так как провода обладают активным сопротивлением, то при этом энергия расходуется на нагревание проводов.

Неблагоприятные условия для потребления энергии возникают при включении в сеть электродвигателей, так как их обмотка имеет малое активное сопротивление и большую индуктивность. Для увеличения $\cos \varphi_c$ в сетях питания предприятий с большим числом электродвигателей включают специальные компенсирующие конденсаторы. Нужно также следить, чтобы электродвигатели не работали вхолостую или с недогрузкой. Это уменьшает коэффициент мощности всей цепи. Повышение $\cos \varphi_c$ является важной народнохозяйственной задачей, так как позволяет с максимальной отдачей использовать генераторы электростанций и снизить потери энергии. Это достигается правильным проектированием электрических цепей. Запрещается использовать устройства с $\cos \varphi_c < 0,85$.

Трансформаторы.

При практическом использовании энергии электрического тока очень часто возникает необходимость изменять напряжение, даваемое каким-либо генератором. В одних случаях бывают нужны напряжения в тысячи или даже сотни тысяч вольт, в других необходимы напряжения в несколько вольт или несколько десятков вольт. Осуществить такого рода преобразования постоянного напряжения очень трудно, между тем *переменное напряжение можно преобразовать* — повышать или понижать — весьма просто и *почти без потерь энергии*. В этом заключается одна из базовых причин того, что в технике пользуются в подавляющем большинстве случаев переменным, а не постоянным током. Приборы, с помощью которых производится преобразование напряжения переменного тока, носят

название *трансформаторов*. Принципиальная схема устройства трансформатора показана на рис. 309.

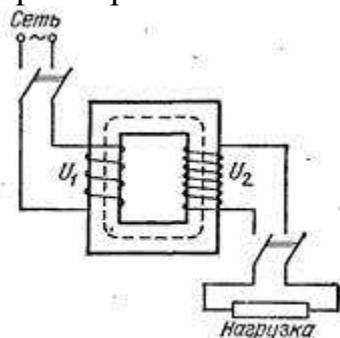


Рис. 309. Схема устройства трансформатора

Всякий трансформатор имеет железный сердечник, на который надеты две катушки (обмотки). Концы одной из этих обмоток подключаются к источнику переменного тока, к примеру к городской сети, с напряжением U_1 ; нагрузка, т. е. те приборы, которые потребляют электрическую энергию, подключается к концам второй обмотки, на которых создается переменное напряжение U_2 , отличное от U_1 .

Обмотка, подключенная к источнику тока, принято называть *первичной*, а обмотка, к которой подключена нагрузка,— *вторичной*. В случае если напряжение на первичной обмотке (напряжение источника) больше, чем на вторичной, т. е. $U_1 > U_2$ то трансформатор принято называть *понижающим*; если же $U_1 < U_2$, то он принято называть *повышающим*.

Когда мы подключаем трансформатор к источнику переменного тока, к примеру к городской сети, то проходящий по первичной обмотке переменный ток создает переменное магнитное поле, одна из линий которого показана штриховой линией на рис. 309. Так как обе обмотки надеты на общий железный сердечник, то почти все линии этого поля проходят через обмотки. Иначе можно сказать, что обе обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком. При изменении этого потока в каждой витке обмоток, как первичной, так и вторичной, индуцируется одна и та же э. д. с. е. Полная же индуцированная э. д. с. ε , возникающая в каждой обмотке, равна произведению э. д. с. ε на число витков N в соответствующей обмотке. В случае если первичная обмотка имеет N_1 витков, а вторичная — N_2 витков, то индуцированные в них э. д. с. равны соответственно $\varepsilon_1 = \varepsilon \cdot N_1$ (4) и $\varepsilon_2 =$

$$\varepsilon_1 = \frac{N_1}{N_2} \varepsilon_2 \quad (5), \text{ т. е. } \varepsilon_2 = \frac{N_2}{N_1} \varepsilon_1 \quad (6)$$

При так называемом холостом ходе трансформатора, т. е. тогда, когда к концам вторичной обмотки не подключена никакая нагрузка и через нее не идет ток, напряжение на концах вторичной обмотки U_2 равно индуцированной в ней э. д. с. ε_2 . Что же касается э. д. с. ε_1 индуцированной в первичной обмотке, то она по правилу Ленца (§ 139) всегда направлена противоположно приложенному к ней внешнему напряжению U_1 и при холостом ходе почти равна ему.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, отношение напряжений на зажимах обмоток трансформатора при холостом ходе приближенно равно отношению индуцированных в них э. д. с:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (7)$$

Это отношение принято называть коэффициентом трансформации и обозначается буквой K :

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (8)$$

В случае если, к примеру, первичная обмотка имеет 2500 витков, а вторичная — 250 витков, то коэффициент трансформации равен 10. Подключив первичную обмотку к источнику с напряжением $U_1 = 1000$ В, мы на вторичной обмотке получим напряжение $U_2 = 100$ В. В случае если бы мы, наоборот, использовали в качестве первичной обмотку с меньшим числом витков и подключили ее к источнику с напряжением $U_1 = 100$ В, то коэффициент трансформации был бы равен 0,1, и на концах другой обмотки мы получили бы напряжение $U_2 = 1000$ В. В первом случае наш трансформатор работает как понижающий, во втором — как повышающий.

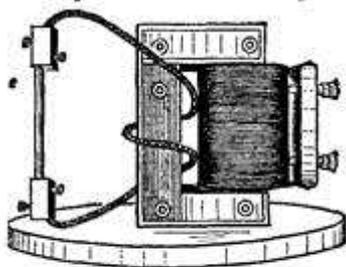


Рис. 311. Понижающий трансформатор, дающий очень большой ток

Трансформаторы рассчитываются так, чтобы при нормальной их нагрузке, когда током холостого хода I_0 можно пренебречь по сравнению с рабочим током I_1 токи в первичной и вторичной обмотках были приблизительно обратно пропорциональны соответствующим

напряжениям:
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} \quad (9)$$

По этой причине, если напряжение U_2 во много раз меньше, чем U_1 во вторичной цепи такого понижающего трансформатора можно получить очень большие токи. Такие трансформаторы применяются при электросварке. На рис. 311 для примера показан понижающий трансформатор, вторичная обмотка которого имеет всего один виток. Напряжение U_2 здесь очень мало, но ток во вторичной обмотке настолько велик, что он нагревает до красного каления толстый медный стержень.

Трансформатор представляет собой, как мы видим, прибор, передающий энергию из цепи первичной обмотки в цепь вторичной. Эта передача неизбежно связана с некоторыми потерями - расходом энергии на нагревание обмоток, на токи Фуко и на перемагничивание железа.

К. п. д. трансформатора называют отношение мощности, потребляемой в цепи вторичной обмотки, к мощности, отбираемой из сети. $\eta = \frac{P_2}{P_1}$
(10)

Разность между этими величинами представляет собой бесполезную потерю. Для уменьшения потерь энергии на нагревание сердечников токами Фуко их изготавливают из отдельных тонких листов стали, изолированных друг от друга, а для уменьшения потерь на нагревание сердечника при его перемагничивании сердечники изготавливают из специальных сортов стали, в которых эти потери малы. Благодаря этому потери обычно весьма малы по сравнению с мощностью, преобразуемой в трансформаторах, и к. п. д. трансформаторов очень высок. Он достигает 98—99 % для больших трансформаторов и около 95% для малых.

Токи Фуко или вихревые токи – вихревые индукционные токи, возникающие в проводниках при изменении пронизывающего их магнитного потока

Трансформаторы для небольших мощностей (десятки ватт), применяющиеся главным образом в лабораториях и для бытовых целей, имеют очень небольшие размеры. Мощные же трансформаторы, преобразующие сотни и тысячи киловатт, представляют собой огромные сооружения. Обычно мощные трансформаторы помещаются в стальной бак, заполненный специальным минеральным маслом. Это улучшает условия охлаждения трансформатора, и, кроме того, масло играет важную роль как изолирующий материал. Концы обмоток трансформатора выводятся через проходные изоляторы, укрепленные на верхней крышке бака.

Трансформатор был изобретен в 1876 г. П. Н. Яблочковым, который применил его для питания своих «свечей», требующих различного напряжения.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Каким образом возникают свободные колебания в колебательном контуре?
2. От чего зависит период свободных колебания в контуре?
3. Какие колебания называются затухающими?
4. Какие электромагнитные колебания называют вынужденными?
5. Что представляет собой автоколебательная система
6. Какой ток называют переменным?
7. Как осуществляется генерирование переменного тока?
8. Что называют мгновенным значением тока? напряжения? ЭДС?
9. Как определяются действующие (эффективные) значения тока и напряжения?
10. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока.

11. Чему равна мощность в цепи переменного тока?
12. Как устроен трансформатор и чем определяется коэффициент трансформации?
13. Расскажите о получении, передаче и распределении электроэнергии.

Лекция 3

Электромагнитные волны, их свойства.

Электромагнитное поле

Согласно теории электромагнитного поля, переменное электрическое поле порождает переменное магнитное. Эти поля имеют вихревой характер: силовые линии порождающего поля concentрически охвачены силовыми линиями порождаемого поля. В результате образуется система «переплетенных» между собой электрических и магнитных полей.

Магнитное поле возникает вокруг проводников, по которым текут токи. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, откуда следует, что электрические токи, порождающие магнитное поле, также должны быть замкнуты.

Если по проводнику протекает постоянный ток, т. е. ток проводимости, то линии тока замкнуты.

Рассмотрим случай, когда в электрическую цепь включен конденсатор. Между обкладками конденсатора заряды перемещаться не могут. Это приводит к тому, что линии тока обрываются у поверхности обкладок конденсатора, ток проводимости, текущий по проводнику, соединяющему обкладки конденсатора, оказывается разомкнутым. Если напряжение источника тока является переменным, то конденсатор попеременно заряжается и разряжается, в цепи идет ток. Это свидетельствует о том, что линии тока замкнуты. Между обкладками конденсатора изменяющийся электрический заряд создает переменное электрическое поле, которое Максвелл назвал током смещения.

Ток смещения – переменное электрическое поле, подобно току проводимости, порождает магнитное поле, силовые линии которого всегда замкнуты.

Таким образом, электрическое и магнитное поля взаимосвязаны: изменение одного из них порождает другое. Эти поля – проявление единого электромагнитного поля.

Электромагнитное поле – особая форма материи. Оно существует реально, т. е. независимо от нас, от наших знаний о нем. Неотъемлемой характеристикой материи является энергия. Под энергией электромагнитного поля подразумевается сумма энергий электрического и магнитного полей:

$$W = W_{эл} + W_{м}.$$

Соответственно плотность энергии электромагнитного поля складывается из плотностей энергий электрического и магнитного полей:

$$w = w_{эл} + w_{м} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Электромагнитные волны

В общем случае утверждать, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, нельзя. Предположим, что какой-то заряд, покоящийся относительно Земли, создает неоднородное электрическое поле, магнитного поля вокруг заряда нет. Если наблюдатель находится в системе координат, движущейся относительно Земли, то неоднородное электрическое поле, созданное этим зарядом, для него уже переменное во времени. Это переменное электрическое поле порождает магнитное. Таким образом, для этого наблюдателя существуют одновременно и электрическое и магнитное поля.

Индукция \vec{B} магнитного поля, возникающего в результате изменения электрического, пропорциональна скорости изменения напряженности электрического поля: $B \sim \frac{\Delta E}{\Delta t}$. Напряженность \vec{E} электрического поля, возникающего в результате изменения магнитного поля, согласно закону Фарадея, пропорциональна скорости изменения индукции магнитного поля:

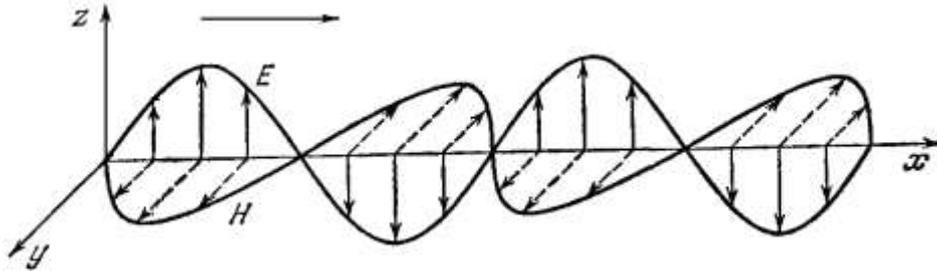
$$E \sim \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$

Если в какой-либо точке пространства возбудить вихревое электрическое поле, то силовые линии возникающего переменного магнитного поля охватывают силовые линии электрического поля концентрическими окружностями. Меняющееся магнитное поле порождает электрическое поле, силовые линии которого охватывают силовые линии магнитного поля, и т.д.

Значит, переменные электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, они поддерживают друг друга и могут существовать независимо от источника, их породившего, распространяясь в пространстве в виде электромагнитной волны. Другими словами, электромагнитные волны – это распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

Из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны являются поперечными: векторы \vec{E} и \vec{B} взаимно-перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{v} – скорости распространения волны. Кроме того, в электромагнитной волне векторы \vec{E} и \vec{B} всегда колеблются в одинаковых фазах, одновременно достигают максимума, одновременно обращаются в нуль.

Таким образом, электромагнитная волна является волной поперечной.



Согласно теории Максвелла, скорость распространения электромагнитных волн – величина конечная. Она определяется электрическими и магнитными свойствами среды, в которой распространяется электромагнитная волна:

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

где ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; ε и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Если электромагнитная волна распространяется в вакууме, то $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$.

Вычислим скорость распространения электромагнитной волны в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости света в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Расстояние, на которое перемещается электромагнитная волна за время, равное одному периоду колебания, называется длиной волны. Если v – скорость распространения электромагнитной волны в однородной среде, T – ее период, ν – частота, λ – длина, то $\lambda = vT$ или $\lambda = \frac{v}{\nu}$. Для вакуума $\lambda_0 = cT$

или

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}.$$

Так как скорость волны зависит от ε и μ среды, то при переходе волны из одной среды в другую изменяются ν и λ , а частота колебаний остается прежней.

Если волна переходит из вакуума в среду с диэлектрической проницаемостью ε и магнитной μ , то длина волны уменьшается:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

где λ_0 – длина волны в вакууме.

Условие возникновения электромагнитных волн — необходимость создания электромагнитных колебания достаточно высокой частоты.

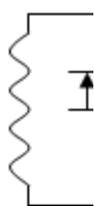
Изменения электромагнитного поля происходят при изменении силы тока в проводнике, а сила тока в проводнике изменяется при изменении скорости движения электрических зарядов в нём, т.е. при движении зарядов с ускорением.

ВЫВОД: электромагнитные волны должны возникать при ускоренном движении электромагнитных зарядов.

Экспериментальное доказательство теории Максвелла (опыты Герца)

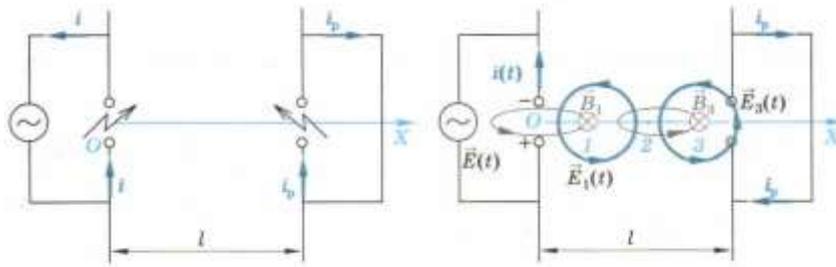
Для получения электромагнитных волн Г. Герц использовал простое устройство, называемое сейчас вибратором Герца. Это устройство представляет собой открытый колебательный контур.

К открытому контуру можно перейти от закрытого, если постепенно раздвигать пластины конденсатора, уменьшая их площадь и одновременно уменьшая число витков в катушке. В конце концов, получится просто прямой провод. Это и есть открытый колебательный контур. Емкость и индуктивность вибратора Герца малы. Поэтому частота колебаний весьма велика.



Герц получал электромагнитные волны, возбуждая в вибраторе с помощью источника высокого напряжения серию импульсов быстропеременного тока. Колебания электрических зарядов в вибраторе создают электромагнитную волну. Только колебания в

вибраторе совершает не одна заряженная частица, а огромное число электронов, движущихся согласованно. В электромагнитной волне векторы E и B перпендикулярны друг другу. Вектор E лежит в плоскости, проходящей через вибратор, а вектор B перпендикулярен этой плоскости. Излучение волн происходит с максимальной интенсивностью в направлении, перпендикулярном оси вибратора. Вдоль оси излучения не происходит.



Электромагнитные волны регистрировались Герцем с помощью приемного вибратора (резонатора), представляющего собой такое же устройство, как и излучающий вибратор. Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны в приемном вибраторе возбуждаются колебания тока. Если собственная частота приемного вибратора совпадает с частотой электромагнитной волны, наблюдается резонанс. Колебания в резонаторе происходят с большой амплитудой при расположении его параллельно излучающему вибратору. Герц обнаруживал эти колебания, наблюдая искорки в очень маленьком промежутке между проводниками приемного вибратора. Герц не только получил электромагнитные волны, но и обнаружил, что они ведут себя подобно другим видам волн.

Вычислив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора. Герц смог определить скорость электромагнитной волны по формуле $c = \lambda \nu$. Она оказалась приблизительно равной скорости света: $c = 300\,000$ км/с.

Опыты Герца блестяще подтвердили предсказания Максвелла.

Свойства электромагнитных волн

1. ЭМВ- поперечная волна. Это означает, что векторы E и B электромагнитного поля волны перпендикулярны к направлению ее распространения.
2. ЭМВ распространяются в вакууме со скоростью света 300 тыс. км/с.
3. В среде скорость меньше $\vartheta = c/n$ показатель среды
4. При переходе из одной среды в другую частота и период волны не изменяется, изменяется только скорость.
5. Всем ЭМВ присущи свойства: интерференция, дифракция, поляризация, отражение, преломление, поглощение.

Электромагнитные волны переносят энергию электромагнитного поля. Скорость переноса энергии сквозь площадь S в момент времени t характеризует **поток энергии электромагнитной волны.**

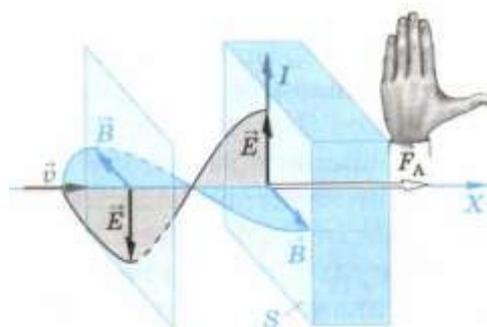
$$\Phi_W = P_{эм} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \frac{\Phi_W}{S} = \frac{P_{эм}}{S} = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Интенсивность электромагнитной волны — среднее значение плотности потока энергии электромагнитной волны:

$$I = \frac{\bar{P}_{\text{эм}}}{S} = \bar{w}_{\text{эм}} c = c \epsilon_0 \bar{E}^2.$$

Единица интенсивности волны — ватт на квадратный метр (1 Вт/м²).

Электромагнитная волна переносит не только энергию электромагнитного поля, но и импульс. Этим объясняется давление, которое она оказывает на объекты, встречающиеся на пути её распространения. **Давление** является результатом совместного действия на заряженные частицы вещества электрического и магнитного полей электромагнитной волны.



Предположим, что плоская электромагнитная волна падает на образец и отражается от него. При падении плоской электромагнитной волны на поверхность вещества площадью S электрическое поле волны вызывает в веществе направленное движение свободных зарядов. Направление движения этих зарядов со- направлено с напряжённостью поля E . Магнитное поле с индукцией B волны действует на возникающий ток с силой Ампера F_A . Её направление определяется с помощью правила левой руки. На образец действует сила F_A , направленная в сторону распространения волны. Давление электромагнитной волны на поверхность образца равно:

$$P_{\text{эм}} = 2 \frac{I}{c}.$$

Диапазон частот электромагнитных волн. Он определяется всеми возможными частотами колебаний заряженных частиц. Такие колебания возникают при переменном токе в линиях электропередачи, антеннах радио- и телевизионных станций, СВЧ-печах, мобильных телефонах, радарх, лазерах, лампах накаливания и люминесцентных лампах, радиоактивных элементах, рентгеновских аппаратах. Диапазон частот электромагнитных волн, фиксируемых в настоящее время, простирается от 0 до $3 \cdot 10^{22}$ Гц. Этот диапазон соответствует спектру (от лат. spectrum — видение, образ) электромагнитных волн с длиной волны λ , изменяющейся от 10^{-14} м до бесконечности. По длине волны (или частоте) спектр электромагнитных волн условно делят на восемь диапазонов Отличие частот (длин волн), излучаемых в различных диапазонах, связано с различием микроскопических источников излучения.

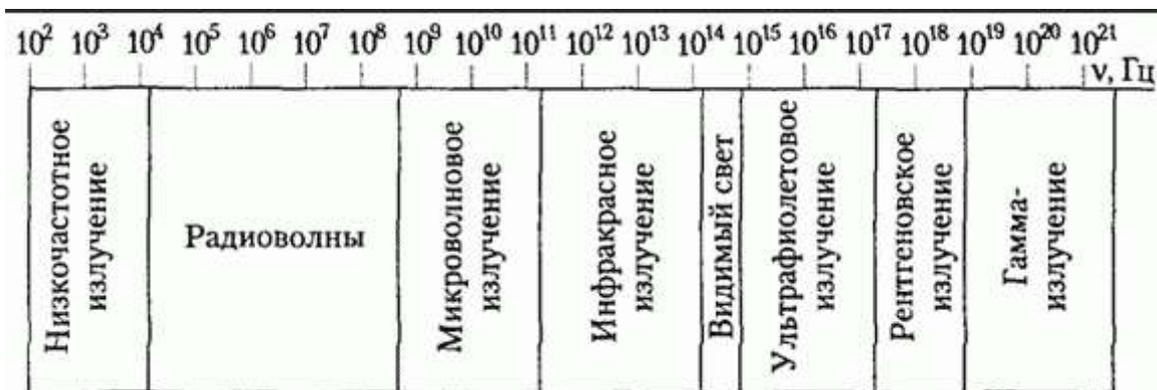
Шкала ЭМВ

Все ЭМВ представлены на одной шкале. Они расположены в порядке возрастания частоты и уменьшения длины волны.

С увеличением частоты происходит:

- Уменьшение длины волны

- Увеличение энергии излучения
- Более слабое поглощение веществом
- Увеличение проникающей способности
- Более сильное проявление квантовых свойств
- Усиление вредного влияния на живые организмы



Электромагнитные волны звуковых частот возникают в диапазоне частот от 0 до $2 \cdot 10^4$ Гц $\lambda = 1.5 \cdot 10^4 \div \infty$ м. Источником волн звуковых частот является переменный ток соответствующей частоты. Учитывая, что интенсивность излучения электромагнитных волн пропорциональна четвертой степени частоты, излучением таких, сравнительно малых, частот можно пренебречь. Именно по этой причине часто можно пренебречь излучением линии передачи переменного тока с частотой 50 Гц.

Низкочастотные волны возникают в проводах с переменным током. Они слабо излучаются и практического значения не имеют. Источники – генераторы переменного тока.

Радиоволны - это ЭМВ, служащие для передачи сигналов на расстояние без проводов, занимают диапазон частот $2 \cdot 10^4$ — 10^9 Гц $\lambda = 0.3 - 1,5 \cdot 10^4$ м. Радиоволны создаются высокочастотными токами, текущими в антенне. Источники – колебательный контур.

Свойства радиоволн.

Свойства радиоволн позволяют им свободно проходить сквозь воздух или вакуум. Но если на пути волны встречается металлический провод, антенна или любое другое проводящее тело, то они отдают ему свою энергию, вызывая тем самым в этом проводнике переменный электрический ток. Но не вся энергия волны поглощается проводником, часть ее отражается от поверхности. На этом свойстве основано применение электромагнитных волн в радиолокации.

Главное свойство радиоволн заключается в том, что они способны переносить через пространство энергию, излучаемую генератором электромагнитных колебаний. Колебания же возникают при изменении электрического поля.

Применение радиоволн.

Радиоволны, как средство для беспроводной передачи звуковой, видео и иной информации на достаточно значительные расстояния, приобрело популярность и широкую сферу использования. Именно радиоволны лежат в основе организации многих современных процессов, среди которых: радиовещание, телевидение, радиотелефонная связь, радиометеорология, радиолокация.

Микроволновое излучение. СВЧ излучение- космическое излучение.

Возникает в диапазоне частот 10^9 — $3 \cdot 10^{11}$ Гц $\lambda = 1$ мм — 0,3 м

Источник СВЧ излучения — валентные электроны атома, изменяющие направления спина или изменяющие скорости своего вращения молекулы вещества. Учитывая прозрачность атмосферы в этом диапазоне, СВЧ-излучение используют для космической связи. Кроме того, это излучение используют в бытовых микроволновых СВЧ-печах.

Инфракрасное излучение. Инфракрасные лучи занимают частотный диапазон $3 \cdot 10^{11}$ — $3,85 \cdot 10^{14}$ Гц $\lambda = 780$ нм — 1 мм.

Было открыто в 1800 году В. Гершелем. Он исследовал нагрев, вызываемый светом с различной длиной волны, раскладывая солнечный свет в спектр и помещая термометр, у которого резервуар с ртутью был зачернен сажей, в разные части спектра. Обнаружив повышение температуры за красной границей видимого спектра, он пришёл к выводу, что термометр в этом месте нагревается какими-то невидимыми лучами. Сначала эти лучи из-за их повышенной способности нагревать тела были названы тепловыми, а затем (учитывая их место в спектре) **инфракрасными**. («инфра» от лат. ниже, под)

Свойства инфракрасных лучей.

1. Многие вещества, прозрачные для видимого света, оказываются непрозрачными для инфракрасных лучей и наоборот. Например слой воды в несколько сантиметров непрозрачен для инфракрасного излучения.

2. 50% энергии излучения Солнца приходится на инфракрасные лучи.

Нагретые тела способны излучать электромагнитные волны в очень широком диапазоне частот. Однако при температуре ниже 500°C излучение любого тела почти целиком является инфракрасным.

3. Инфракрасные фотографии можно получить применяя специальную чувствительную пленку и устанавливая на объектив фотоаппарата светофильтр, пропускающий инфракрасное излучение и не пропускающий видимый свет.

На инфракрасных фотографиях можно увидеть детали, которые в обычном свете глазу не видны, благодаря различию коэффициентов рассеяния, отражения и пропускания в видимом и инфракрасном диапазонах.

Инфракрасное излучение используется:

1. при нагреве и сушке овощей, фруктов и различных лакокрасочных покрытий;

2. в приборах ночного видения;

3. в системах самонаведения на цель снарядов и ракет и т.д.

Искусственными источниками этого излучения являются:

- лампы накаливания с вольфрамовой нитью;
- угольная электрическая дуга;
- различные газоразрядные лампы;
- ртутные лампы высокого давления;
- некоторые лазеры

Применение ИК-излучения.

Инфракрасное излучение применяют в: медицине; дистанционном управлении; при покраске (для сушки лакокрасочных поверхностей); для стерилизации пищевых продуктов; как антикоррозийное средство (с целью предотвращения коррозии поверхностей, покрываемых лаком); проверка денежных знаков на подлинность; для обогрева помещения.

Видимый свет- излучение воспринимаемое глазом человека. (КОЖЗГСФ) Световые волны занимают достаточно узкий диапазон: $\lambda = 380—780 \text{ нм} = 3,85 \cdot 10^{14}—7,89 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

Источником видимого света являются валентные электроны в атомах и молекулах, изменяющие своё положение в пространстве, а также свободные заряды, движущиеся ускоренно. Эта часть спектра даёт человеку максимальную информацию об окружающем мире, являясь лишь малой частью спектра

Таблица 5

Диапазон длин волн, соответствующий определённому основному цвету

	Красный	Оранжевый	Жёлтый	Зелёный	Голубой	Синий	Фиолетовый
λ , нм	780—620	620—590	590—560	560—500	500—480	480—450	450—380
ν , ТГц	385—484	484—508	508—536	536—600	600—625	625—667	667—789

электромагнитных волн. Максимум чувствительности человеческого глаза приходится на длину волны $\lambda = 560 \text{ нм}$. На эту длину волны приходится также максимум интенсивности излучения Солнца и одновременно максимум прозрачности атмосферы Земли. В процессе длительной биологической эволюции подобное удивительное совпадение существенно помогало человеку получать информацию об окружающем мире, что способствовало его выживанию.

Излучение, имеющее разные длины волн (частоты) в диапазоне видимого света, оказывает различное физиологическое воздействие на сетчатку человеческого глаза, вызывая ощущение цвета. **Цвет** — не свойство электромагнитной световой волны самой по себе, а проявление электрохимического действия физиологической системы человека: глаз, нервов, мозга. Например, электромагнитное излучение в диапазоне длин волн $X = 620—780 \text{ нм}$ вызывает у человека ощущение красного цвета. Достаточно приближённо можно назвать семь основных цветов, различаемых человеческим глазом в видимом диапазоне (в порядке возрастания частоты излучения): красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий,

фиолетовый. Диапазон длин волн электромагнитного излучения, соответствующий каждому цвету, приведён в таблице 5.

Видимый свет может влиять на протекание химических реакций в растениях (фотосинтез) и организмах животных и человека. Например, голубой свет может вызывать диссоциацию (деление) молекул билирубина. Этот процесс увеличивает число таких молекул в крови, препятствуя развитию желтухи у новорожденных. Видимый свет испускают отдельные насекомые (светлячки) и некоторые глубоководные рыбы за счёт химических реакций в организме. Поглощение растениями углекислого газа в результате процесса фотосинтеза и выделение кислорода способствует поддержанию биологической жизни на Земле. Оно оказывается возможным благодаря энергии, излучаемой естественным источником видимого света — Солнцем.

Ультрафиолетовое излучение. занимает диапазон частот $8 \cdot 10^{14}—3 \cdot 10^{16}$ Гц $\lambda = 10—380$ нм

Ультрафиолетовые лучи были открыты в 1801г. немецким ученым И.В.Риттером и, независимо от него англичанином У. Волластоном . В опытах проверялось будет ли хлорид серебра чернеть не только под действием видимого света, но и если его поместить за фиолетовый край спектра. После проведения опытов, был получен положительный результат. Невидимые лучи, вызывавшие это почернение, были названы ультрафиолетовыми. («ультра» от лат. выше. над).

Естественными источниками ультрафиолетового излучения являются Солнце, звёзды и другие космические объекты. Заметную долю ультрафиолетового излучения содержит излучение нагретых до 3000 С твёрдых тел.

Источник ультрафиолетового излучения — валентные электроны атомов и молекул, а также ускоренно движущиеся свободные заряды.

В малых дозах УФ-излучение оказывает благотворное оздоровительное влияние на человека, активизируя синтез витамина D в организме, а также вызывая загар. Большая доза УФ-облучения может вызвать ожог кожи и раковые новообразования (в 80% случаев излечимые). Кроме того, чрезмерное УФ-облучение ослабляет иммунную систему организма, способствуя развитию некоторых заболеваний.

Ультрафиолетовое излучение с длиной волны $\lambda < 300$ нм деполимеризует нуклеиновые кислоты и разрушает протеины, нарушая жизненные процессы в организме. Поэтому в малых дозах такое излучение обладает бактерицидным действием, уничтожая микроорганизмы.

Озоновый слой атмосферы Земли сильно поглощает УФ-излучение с длиной волны $\lambda < 320$ нм, а кислород воздуха — коротковолновое УФ-излучение ($\lambda < 185$ нм). Практически не пропускает УФ-излучение оконное стекло, так как его поглощает оксид железа, входящий в состав стекла. По этой причине даже в жаркий солнечный день нельзя загореть в комнате при закрытом окне.

Человеческий глаз не видит УФ-излучение, так как роговая оболочка глаза и глазная линза поглощают ультрафиолет. Однако люди, у которых удалена глазная линза при снятии катаракты, могут видеть УФ-излучение в диапазоне длин волн 300—350 нм.

Ультрафиолетовое излучение видят некоторые животные. Например, голубь ориентируется по Солнцу даже в пасмурную погоду.

Свойства ультрафиолетовых лучей.

1. Для большинства тел, прозрачных в видимой области спектра, характерно уменьшение прозрачности в ультрафиолетовом диапазоне.

2. В малых дозах мягкое (близкое к видимому свету) ультрафиолетовое излучение оказывает благоприятное влияние на человека: способствует образованию витаминов группы D; вызывают у человека загар;

3. Жесткое ультрафиолетовое излучение оказывает бактерицидное действие: происходит гибель болезнетворных бактерий.

4. Однако большие дозы ультрафиолетового излучения могут вызвать повреждение глаз и ожог кожи, изменения в развитии клеток и обмене веществ.

5. Ионизируют воздух и делают его легко проходимым для электрического тока.

6. Проникают через такие тела и предметы, которые не пропускают лучей видимого света.

7. Вызывают свечение (люминесценцию) многих веществ.

8. Вызывает химические реакции. (вызывает почернение фотопленки)

Ультрафиолетовое излучение используется:

1. В люминесцентных лампах;

2. в криминалистике и в искусствоведении (обнаружение подделки документов).

3. в медицине и косметологии;

4. в шоу-бизнесе.

Рентгеновское излучение возникает в диапазоне частот $3 \cdot 10^{16}$ — $3 \cdot 10^{20}$ Гц
 $\lambda = 10^{-12}$ — 10^{-8} м

Вечером 8 ноября 1895 года немецкий ученый Вильгельм Конрад Рентген, производя в затемненном помещении опыты с электрическими разрядами в вакуумной трубке, обнаружил свечение расположенного рядом с трубкой экрана, покрытого платиносиноеродистым барием. Так как сама трубка была покрыта черным чехлом, не пропускающим видимых и ультрафиолетовых лучей, то Рентген предположил, что свечение экрана вызывается каким-то новыми лучами. Рентген назвал их X-лучи, а позднее они получили название рентгеновских лучей.

В ходе своих опытов Рентген установил, что излучаемые трубкой лучи обладают очень сильной проникающей способностью. Лучи проходили через книгу в 1000 страниц, еловые доски до 3 см толщиной и даже алюминиевую пластину толщиной 1.5 см. Но самое большое потрясение ученый испытал,

когда увидел на экране темные тени костей на фоне слабого очертания своей руки!

В настоящее время рентгеновские лучи получают с помощью специальных устройств, называемых рентгеновскими трубками. Это стеклянный сосуд, из которого откачен воздух. В него впаяны металлические нити. Напряжение между катодом и анодом 50-200 кВ. При включении электрического тока в пустоте от катода к аноду движутся электроны. При торможении быстрых электронов в аноде возникает рентгеновское излучение.

Свойства рентгеновских лучей.

1. Обладает высокой проникающей способностью, которая тем выше, чем меньше длина волны.

2. Оказывает негативное биологическое действие. Особенно страдают от рентгеновых лучей кожные покровы - появляются ожоги, могут развиваться раковые опухоли и язвы.

3. Сильно ионизируют воздух.

4. Вызывают свечение (люминесценцию) многих веществ.

5. Вызывает химические реакции. Рентгеновское излучение вызывает почернение фотопленки. Это его свойство имеет важное значение для медицины, промышленности и научных исследований. Поскольку проникающая способность рентгеновского излучения различна для разных материалов, менее прозрачные для него части объекта дают более светлые участки на фотоснимке, чем те, через которые излучение проникает хорошо.

Благодаря особым свойствам рентгеновское излучение широко применяется в медицине, дефектоскопии, в астрономии, в криминалистике.

Дифракция рентгеновских лучей.

Природа излучения, обнаруженного и исследованного В. Рентгеном, долго была неясна

Обнаружить дифракцию рентгеновских сложно, т.к. у обычных дифракционных решеток период слишком велик по сравнению с длиной волны рентгеновского излучения.

Выход был найден М. Лауэ в 1912 г. Он решил использовать в качестве дифракционной решетки кристаллы, у которых атомы, молекулы или ионы, из которых они состоят, образуют правильную пространственную кристаллическую решетку.

В результате проведения эксперимента было доказано:

1). Рентгеновское излучение имеет волновую природу.

2). Был измерен диапазон длин волн рентгеновского излучения и определено его место на шкале электромагнитных волн.

3). Был найден новый, весьма мощный и эффективный метод исследования структуры кристаллов — рентгеноструктурный анализ. В самом деле, получив соответствующую фотографию при дифракции в кристалле рентгеновского излучения с известной длиной волны, можно определить структуру этого кристалла.

Применение рентгеновского излучения.

При помощи рентгеновских лучей можно «просветить» человеческое тело, в результате чего можно получить изображение костей, а в современных приборах и внутренних органов (рентгенография и рентгеноскопия).

Выявление дефектов в изделиях (рельсах, сварочных швах и т. д.) с помощью рентгеновского излучения называется рентгеновской дефектоскопией

В материаловедении, кристаллографии, химии и биохимии рентгеновские лучи используются для выяснения структуры веществ на атомном уровне при помощи дифракционного рассеяния рентгеновского излучения (рентгеноструктурный анализ).

Известным примером является определение структуры ДНК.

При помощи рентгеновских лучей может быть определён химический состав вещества.

В аэропортах активно применяются рентгено-телевизионные интроскопы, позволяющие просматривать содержимое ручной клади и багажа.

Создание приёмников рентгеновского излучения и размещение их на космических станциях позволило обнаружить рентгеновское излучение сотен звёзд, а также оболочек сверхновых звёзд и целых галактик.

Гамма-излучение. -излучение — самое коротковолновое электромагнитное излучение, занимающее весь диапазон частот $\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Гц, что соответствует длинам волн $\lambda < 10^{-12}$ м.

γ-излучение было открыто французским учёным **Полем Вилларом** в 1900 г. Изучая излучение радия в сильном магнитном поле, Виллар обнаружил коротковолновое электромагнитное излучение, не отклоняющееся, как и свет, магнитным полем. Оно было названо **-излучение**.

По своим свойствам гамма-лучи напоминают рентгеновские, но их проникающая способность в несколько раз больше. Гамма-лучи – электромагнитные волны. Это было доказано дифракцией гамма лучей на кристаллах и измерена длина волны (меньше 0,1 нм).

Источник – радиоактивный распад ядер элементов.

γ-излучение обладает ещё большей проникающей способностью, чем рентгеновское излучение. Оно проходит сквозь метровый слой бетона и слой свинца толщиной несколько сантиметров. Почти всё -излучение, приходящее на Землю из космоса, поглощается атмосферой Земли. Это обеспечивает возможность существования органической жизни на Земле. -излучение возникает при взрыве ядерного оружия вследствие радиоактивного распада ядер.

Свойства гамма-излучения.

Гамма-лучи, в отличие от α-лучей и β-лучей, не отклоняются электрическими и магнитными полями, характеризуются большей проникающей способностью при равных энергиях и прочих равных

условиях. Основные процессы, возникающие при прохождении гамма-излучения через вещество: фотоэффект - энергия гамма-кванта поглощается электроном оболочки атома, и электрон, совершая работу выхода, покидает атом, который становится ионизированным; эффект образования пар - гамма-квант в поле ядра превращается в электрон и позитрон; ядерный фотоэффект - при энергиях выше нескольких десятков МэВ гамма-квант способен выбивать нуклоны из ядра.

Применение гамма-излучения.

Гамма-дефектоскопия, контроль изделий просвечиванием γ -лучами.

Консервирование пищевых продуктов.

Стерилизация медицинских материалов и оборудования.

Лучевая терапия.

Гамма-высотомер, измерение расстояния до поверхности при приземлении спускаемых космических аппаратов.

Гамма-стерилизация специй, зерна, рыбы, мяса и других продуктов для увеличения срока хранения.

-Мы рассмотрели с вами шкалу ЭМВ. А теперь вспомним процесс получения ЭМК.

ЭМК — свободные колебания в реальном колебательном контуре всегда затухающие. Но зачастую просто необходимо сделать их незатухающими.

- Итак, нам требуется такое устройство, с помощью которого компенсировались бы потери энергии при каждом полном колебании в контуре для того, чтобы они были незатухающими. Как это можно сделать

То есть, существуют такие колебания, которые поддерживаются автоматически – автоколебания. Но их надо как-то получать. Необходимо иметь источник, с помощью которого пополнялась бы энергия колебательной системы. Как называется прибор, который что-то создаёт? Является источником чего-либо?.. Генератор!

Автоколебания. Генератор незатухающих колебаний (на транзисторе)

Свободные электромагнитные колебания в реальном колебательном контуре всегда затухающие. Для того чтобы они были незатухающими, нужно создать устройство, с помощью которого компенсировались бы потери энергии при каждом полном колебании в контуре. Широко применимы так называемые **автоколебания** — незатухающие колебания, поддерживаемые в системе за счет **постоянного** внешнего источника энергии, причем сама система управляет им, обеспечивая согласованность поступления энергии определенными порциями в нужный момент времени.

Любая автоколебательная система состоит из следующих четырех частей (рис. 1):

- 1) колебательная система;
- 2) источник энергии, за счет которого компенсируются потери;
- 3) клапан — некоторый элемент, регулирующий поступление энергии в колебательную систему определенными порциями в нужный момент;
- 4) обратная связь — управление работой клапана за счет процессов в самой колебательной системе.

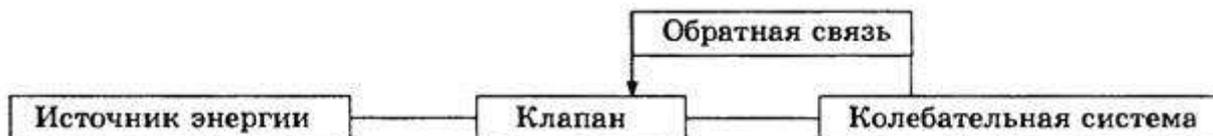


Рис. 1

Примеры автоколебаний:

- незатухающие колебания маятника часов за счёт постоянного действия тяжести заводной гири;
- колебания скрипичной струны под воздействием равномерно движущегося смычка;
- колебание воздушного столба в трубе органа, при равномерной подаче воздуха в неё;
- вращательные колебания латунной часовой шестерёнки со стальной осью, подвешенной к магниту и закрученной
- образование турбулентных потоков на перекатах и порогах рек;
- голоса людей, животных и птиц образуются благодаря автоколебаниям, возникающим при прохождении воздуха через голосовые связки.

- Наиболее распространённой механической автоколебательной системой являются маятниковые часы. В 1657 году голландский физик Христиан Гюйгенс предложил использовать изохронность колебаний маятника для создания равномерного движения стрелки на часах. Устройство, предложенное Гюйгенсом, в его главных чертах сохранилось до настоящего времени: маятник, поднятый груз, анкер и ходовое колесо. Обратите внимание, что, в основном, маятник движется свободно, получая за период два толчка. Колебания возникают и поддерживаются самой колебательной системой, то есть являются автоколебаниями.

Генератор на транзисторе (Доклад)

Генератор на транзисторе — пример автоколебательной системы. На рис. 2 приведена упрощенная схема такого генератора, в котором роль "клапана" играет транзистор. Колебательный контур подключен к источнику тока последовательно с транзистором. Эмиттерный переход транзистора через катушку $L_{св}$ индуктивно связан с колебательным контуром. Эту катушку называют катушкой обратной связи.

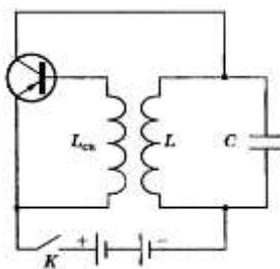


Рис. 2

При замыкании цепи через транзистор проходит импульс тока, который заряжает конденсатор C колебательного контура, в результате чего в контуре возникают свободные электромагнитные колебания малой амплитуды. Ток, протекающий по контурной катушке L , индуцирует на концах катушки обратной связи переменное напряжение. Под действием этого напряжения электрическое поле эмиттерного перехода периодически то усиливается, то ослабляется, а транзистор то открывается, то запирается. В те промежутки времени, когда транзистор открыт, через него проходят импульсы тока. Если катушка L_{cb} подключена правильно (положительная обратная связь), то частота импульсов тока совпадает с частотой колебаний, возникших в контуре, и импульсы тока приходят в контур в те моменты, когда конденсатор заряжается (когда верхняя пластина конденсатора заряжена положительно). Поэтому импульсы тока, проходящие через транзистор, подзаряжают конденсатор и пополняют энергию контура, и колебания в контуре не затухают.

Если при положительной обратной связи медленно увеличивать расстояние между катушками L_{cb} и L , то с помощью осциллографа можно обнаружить, что амплитуда автоколебаний уменьшается, и автоколебания могут прекратиться. Это значит, что при слабой обратной связи энергия, поступающая в контур, меньше энергии, необратимо преобразуемой во внутреннюю.

Таким образом, обратная связь должна быть такой, чтобы:

1) напряжение на эмиттерном переходе изменялось синфазно с напряжением на конденсаторе контура — это фазовое условие самовозбуждения генератора;

2) обратная связь обеспечивала бы поступление в контур столько энергии, сколько ее необходимо для компенсации потерь энергии в контуре — это амплитудное условие самовозбуждения.

Частота автоколебаний равна частоте свободных колебаний в контуре и зависит от его параметров.

Уменьшая L и C , можно получить высокочастотные незатухающие колебания, используемые в радиотехнике.

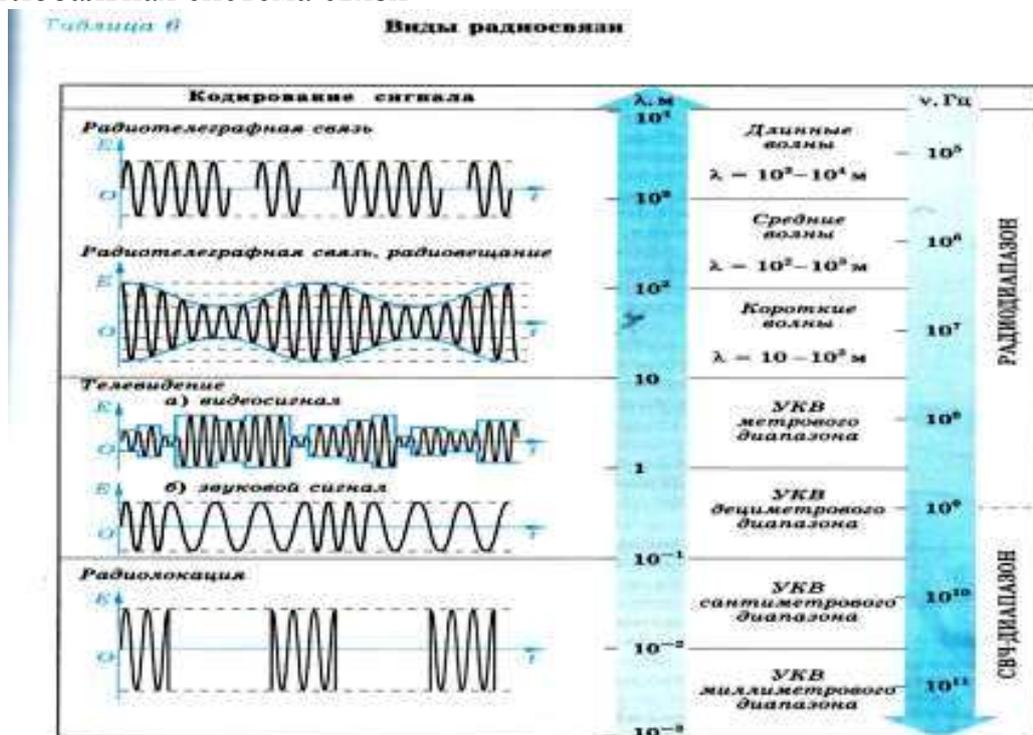
Амплитуда установившихся автоколебаний, как показывает опыт, не зависит от начальных условий и определяется параметрами автоколебательной системы — напряжением источника, расстоянием между L_{cb} и L , сопротивлением контура.

Принцип радиотелефонной связи

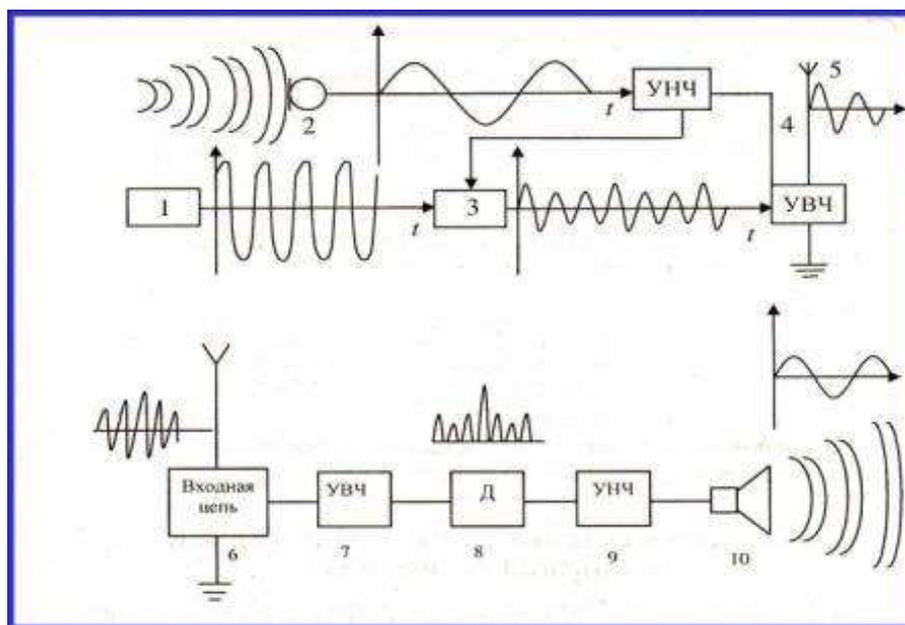
Электромагнитные волны в настоящее время широко применяются в различных областях радиоэлектроники (отрасль науки и техники, использующая электромагнитные волны для передачи, приема и преобразования информации): радиосвязь, радиовещание, телевидение, радиолокация, радиоуправление, радиотелеметрия, радиометеорология, радиоразведка и др.

Виды радиосвязи

1. телевидение
2. радиорелейные линии связи
3. космическая связь
4. развитие радиоэлектроники
5. глобальная система связи



Радиопередачи стали возможны после создания генератора незатухающих колебаний. При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне с помощью микрофона превращаются в электрические колебания той же формы. Трудность передачи звукового сигнала состоит в том, что для радиосвязи необходимы колебания высокой частоты, а колебания звукового диапазона — низкочастотные колебания, для излучения которых невозможно построить эффективные антенны. Поэтому колебания звуковой частоты приходится тем или иным способом накладывать на колебания высокой частоты, которые уже переносят их на большие расстояния.



Принцип работы радиосвязи (для того, чтобы осуществить радиосвязь) **нужны:**

1) Задающий генератор вырабатывает гармонические колебания высокой частоты (несущая частота более 100 тыс. Гц).

2) Микрофон преобразует механические звуковые колебания в электрические той же частоты.

3) Модулятор изменяет по частоте или амплитуде высокочастотные колебания с помощью электрических колебаний низкой частоты.

4) Усилители высокой и низкой частоты усиливают по мощности высокочастотные и звуковые (низкочастотные) электрические колебания.

5) Передающая антенна излучает модулированные электромагнитные волны.

6) Приемная антенна принимает электромагнитные волны.

Электромагнитная волна, достигшая приемной антенны, индуцирует в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

7) УВЧ.

8) Детектор выделяет из модулированных высокочастотных колебаний низкочастотные колебания.

9) УНЧ.

10) Динамик преобразует электромагнитные колебания в механические звуковые колебания.

Радиопередатчик – устройство способное непрерывно излучать ЭМК. С его помощью передают звуковую информацию на дальние расстояния.

Радиопередающее устройство содержит следующие основные элементы (рис. 3):

Г — задающий генератор колебаний высокой частоты, преобразующий энергию источника постоянного напряжения в

гармонические колебания высокой частоты. Частоту этих колебаний называют несущей. Она должна быть строго постоянной;

МК — преобразователь сообщений в электрический сигнал, используемый для модуляции колебаний несущей частоты. Вид преобразователя зависит от физической природы передаваемого сигнала: при звуковом сигнале преобразователем является микрофон, при передаче изображений — передающая телевизионная трубка:

М — модулятор, в котором происходит модуляция высокочастотного сигнала в соответствии с частотой звукового сигнала, несущего информацию, подлежащую передаче;

УВЧ — обычно имеется один или два каскада усилителя мощности модулированного сигнала;

A₁ (открытый колебательный контур)— излучающая антенна, предназначенная для излучения электромагнитных модулированных волн в окружающее пространство.

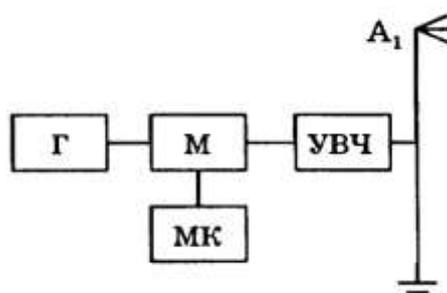


Рис. 3

Радиопередатчики проектируются и применяются во многих отраслях: все виды радиосвязи, радиолокации, радиопеленгации, звукового и телевизионного вещания, службы точного времени и т. д.

Основные характеристики радиопередатчиков: вид излучения, рабочие частоты, допустимая нестабильность частоты излучаемого сигнала, мощность излучения.

Радиоприемник - устройство предназначено для приема информации, передаваемой с помощью электромагнитных волн, излучаемых передающей антенной радиопередатчика.

Радиоприемное устройство содержит следующие основные элементы (рис. 4):

A₂ — приемная антенна служит для улавливания электромагнитных колебаний. Бывают антенны, рассчитанные на колебания строго определенной частоты (настроенные антенны), и антенны, не настроенные на определенную частоту (всеволновые антенны).;

РК — резонансный контур, настраиваемый на определенную частоту, который из множества принятых антенной сигналов выделяет полезный сигнал;

УВЧ — Мощность принятого сигнала исключительно мала. Поэтому в усилителе высокой частоты повышается напряжение принятого сигнала и увеличивается его мощность;

Д - детекторный каскад (демодулятор) Здесь усиленный модулированный высокочастотный сигнал преобразуется и из него выделяется модулирующий сигнал, несущий передаваемую информацию. В качестве детектора используют приборы с нелинейной характеристикой — электронные лампы и полупроводниковые приборы;

УНЧ — усилитель низкой частоты. Выделенное в детекторном каскаде модулирующее напряжение низкой частоты мало и его усиливают в усилителе низкой частоты;

ГВ — после усиления низкочастотный сигнал поступает на громкоговоритель (телефон).

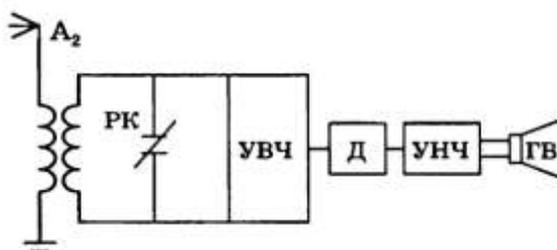


Рис.4

Модуляция

Гармоническое колебание $E=E_0\sin(\omega t+\varphi_0)$ характеризуется тремя постоянными во времени параметрами: амплитудой E_0 , частотой ω и начальной фазой φ_0 .

Однако существуют колебания, у которых один из этих параметров не постоянен, а изменяется по определенному закону. Такие колебания называются **модулированными**.

Модулированные колебания обычно получают изменением гармонического колебания в соответствии с колебанием, которое для этой цели выбирают. Этот процесс получил название **модуляции**.

Модуляция — процесс изменения одного из параметров гармонического колебания в соответствии с другим колебанием. Различают амплитудную, частотную и фазовую модуляции.

Рассмотрим **принцип амплитудной модуляции колебаний**. При амплитудной модуляции со звуковой частотой изменяют амплитуду высокочастотных колебаний. В самом простом устройстве для реализации амплитудной модуляции последовательно с источником постоянного напряжения включают дополнительный источник переменного напряжения низкой частоты. Этим источником может быть, например, вторичная обмотка трансформатора, если по его первичной обмотке проходит ток звуковой частоты. Для этого (рис.5) в первичную цепь трансформатора включают источник постоянного напряжения и микрофон.

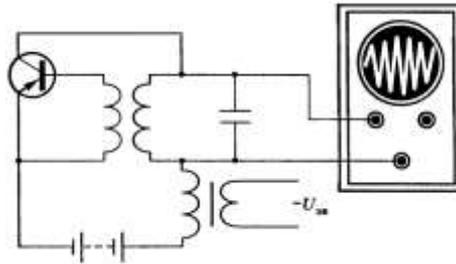


Рис. 5

Микрофон представляет собой переменное сопротивление, величина которого зависит от давления на его мембрану. Когда перед микрофоном нет источников звука, его сопротивление постоянно, и в цепи микрофона (первичная цепь трансформатора) идет слабый постоянный ток. Генератор создает незатухающие колебания высокой частоты (рис.6, а). Когда перед микрофоном воспроизводятся какие-нибудь звуки, его сопротивление изменяется со звуковой частотой. Аналогично изменяется ток в цепи микрофона, и благодаря явлению электромагнитной индукции во вторичной цепи трансформатора возникает переменное напряжение звуковой частоты, которое соответственно увеличивает или уменьшает силу тока в цепи коллектора.

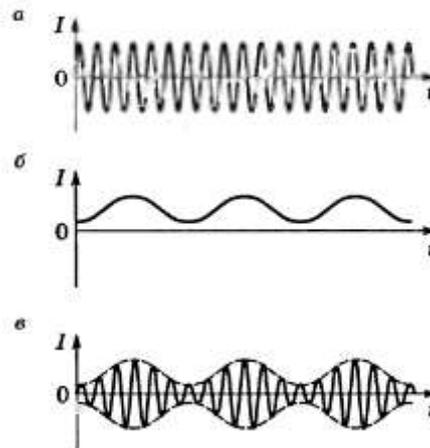


Рис. 6

Амплитуда колебаний несущей частоты начинает изменяться со звуковой частотой — получаются модулированные колебания, которые излучаются в пространство.

Временную развертку модулированных колебаний можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа, если подать на него напряжение с колебательного контура.

Так, если звуковая волна имеет вид, изображенный на рисунке 6б, то антенна будет излучать модулированные волны, изображенные на рисунке 6в.

Детектирование

Под воздействием электромагнитных волн, излучаемых антеннами передатчиков, в антенне радиоприемника (рис.7) возникают вынужденные модулированные колебания.

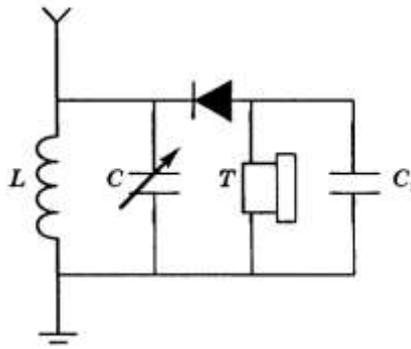


Рис. 7

Один из элементов контура, например конденсатор C , делается переменной емкости для настройки в резонанс с какой-то станцией. В контуре возникнут модулированные высокочастотные колебания (рис.8).



Рис. 8

Этот высокочастотный модулированный сигнал не способен непосредственно вызвать колебания мембраны телефона со звуковой частотой. Он только возбудит высокочастотные колебания, не воспринимаемые нашим ухом. При большой частоте мембрана вследствие инертности не будет успевать смещаться сколько-нибудь значительно за малое время, равное периоду высокочастотных колебаний. Поэтому этот модулированный сигнал подается на детектор (вакуумный или кристаллический полупроводниковый диод), обладающий односторонней проводимостью. После прохождения детектора получают детектированные колебания, представляющие собой суперпозицию выпрямленных колебаний высокой и низкой частот (рис.9).

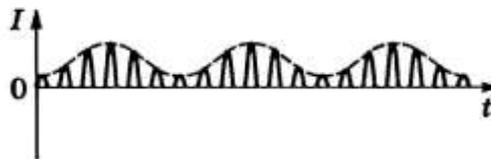


Рис. 9

Для окончательного отделения звуковой частоты от высокой параллельно с телефоном включают блокировочный конденсатор C_1 . Его емкость подбирается так, чтобы емкостное сопротивление ($1/\omega C_1$) для низких частот было гораздо больше, чем индуктивное сопротивление телефона. А телефон представляет большое индуктивное сопротивление (ωL) для высокой частоты. Тогда токи высокой частоты пойдут через конденсатор, а низкой — через телефон. Мембрана телефона будет колебаться аналогично мембране микрофона, и мы услышим точно такой же звук, как перед микрофоном (рис.10).



Рис.10

Детекторный приемник очень прост, надежен, не требует источников питания. Это отсутствие источника является и недостатком его. Он принимает сигналы только от близких и очень мощных радиостанций. Если необходимо принять слабый сигнал, то его нужно предварительно усилить. Для этого используют, например, триод, который играет в нашей схеме роль детектора и усилителя одновременно. Схема простейшего приемника с ламповым усилителем показана на рисунке 11.

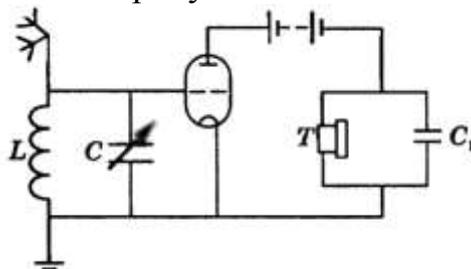


Рис.11

Модулированные вынужденные колебания контура подаются теперь на сетку триода и вызывают значительные изменения силы тока в его анодной цепи, которые происходят в такт с колебаниями, излучаемыми антенной передатчика. А далее усиленный детектированный сигнал попадает на телефон T и фильтр C₁, где низкая частота окончательно отделяется от высокой. Для значительного усиления используются многокаскадные приемники.

Радиовещание. Принципы телевидения

В современной технике используются радиоволны различных частот. Классификация радиоволн по длинам волн и частотам приведена в таблице

Классификация радиоволн по длинам волн и частотам

Наименование волн	Диапазон частот, Гц	Диапазон длин волн, м
Сверхдлинные (СДВ)	$< 3 \cdot 10^4$	$> 1 \cdot 10^4$
Длинные (ДВ)	$3 \cdot 10^4 — 3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3 — 1 \cdot 10^4$
Средние (СВ)	$3 \cdot 10^5 — 3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^2 — 1 \cdot 10^3$
Короткие (КВ)	$3 \cdot 10^6 — 3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^1 — 1 \cdot 10^2$
Ультракороткие (УКВ):	$3 \cdot 10^7 — 3 \cdot 10^{11}$	$0,001 — 1 \cdot 10^1$
Метровые	$3 \cdot 10^7 — 3 \cdot 10^8$	$1 — 1 \cdot 10^1$

Дециметровые	$3 \cdot 10^8 — 3 \cdot 10^9$	0,1 — 1
Сантиметровые	$3 \cdot 10^9 — 3 \cdot 10^{10}$	0,01 — 0,1
Миллиметровые	$3 \cdot 10^{10} — 3 \cdot 10^{11}$	0,001 — 0,01

Радиоволны сильно отличаются по своим свойствам. Например, длинные и средние волны хорошо огибают естественные препятствия. Но на средних волнах дальность приема резко отличается днем и ночью. Это связано с тем, что средние волны сильно поглощаются нижним слоем ионосферы 2 и отражаются от более отдаленного слоя 1 (рис. 13, а). Дальность их приема сильно возрастает ночью, так как из-за отсутствия солнечного излучения нижний слой ионосферы 2 пропадает.

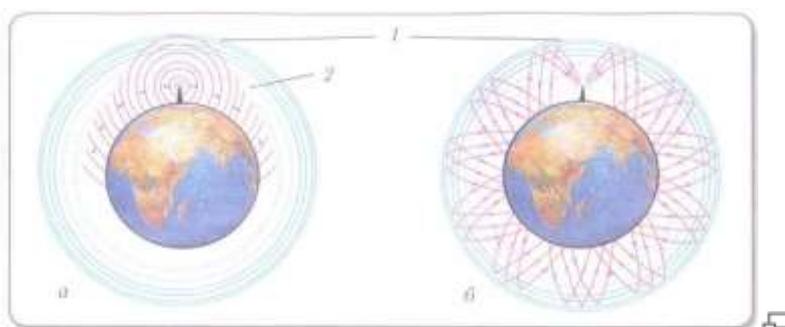


Рис.13. Схема распространения: а — длинных электромагнитных волн; б — коротких электромагнитных волн

Короткие волны отражаются от ионосферы и, таким образом, многократно отражаясь от поверхности Земли и ионосферы 1 (рис.13, б), могут распространяться на очень большие расстояния.

Советский радист Э. Кренкель, находясь в северной полярной экспедиции в 30-е годы XX в., с помощью маломощной радиостанции установил связь с австралийскими радистами.

Ультракороткие волны пропускаются ионосферой и не огибают препятствия. Осуществление связи такими волнами возможно только в пределах прямой видимости. Это привело к сооружению гигантских (400-500 м высотой) телевизионных башен, электромагнитные волны с которых могут попадать в приемники, находящиеся от них на расстоянии порядка 70-80 км. Только использование спутников на различных орбитах решило вопрос с приемом теле- и радиопередач и телефонных сообщений в любых уголках Земли.

- Останкинская телебашня имеет высоту 535 м и позволяет вести прием телевизионных передач на расстоянии до 120 км от Москвы.

Радиоволнами осуществляется передача на расстояние изображений предметов. На телевизионной станции производится преобразование передаваемого изображения в последовательность электрических сигналов. Сигнал изображения модулирует несущие высокочастотные колебания. Эти колебания излучаются антенной в виде радиоволн и передаются на большое

расстояние. Они принимаются антенной телевизора. В результате детектирования снова получается электрический сигнал изображения. Он преобразуется в видимое изображение на экране кинескопа телевизора. Вместе с сигналом изображения передаются и звуковые сигналы.

- Телевизионные передачи ведутся в диапазоне от 50 МГц до 230 МГц, в котором волны распространяются только в пределах прямой видимости.

Области использования радиоволн:

- *радиовещание* — передача речи, музыки на длинных, средних, коротких, ультракоротких волнах метрового диапазона;

- *радиосвязь* — передача на расстояние телеграфных сигналов и телефонных разговоров на ультракоротких волнах метрового и дециметрового диапазонов;

- *телевидение* — передача на расстояние изображения (аудио- и видеосигналов) на ультракоротких волнах метрового и дециметрового диапазонов;

- *радиолокация* — обнаружение и определение положения различных объектов на волнах метровых, дециметровых, сантиметровых и миллиметровых диапазонов;

- *радиоастрономия* — исследование с помощью радиотелескопов космических объектов по их ультракоротковолновому излучению.

Радар (радиолокатор) — прибор, представляющий собой комбинацию ультракоротковолнового радиопередатчика и приемника. С помощью общей антенны для приема и передачи создается остронаправленный радиолуч. Излучение осуществляется короткими импульсами длительностью порядка 10^{-6} с. Импульсы отражаются от предметов, позволяя после приема и обработки сигнала установить расстояние до предмета, скорость и направление его движения.

Важнейшим преимуществом радиолокации является независимость работы радаров от погодных условий и времени суток.

Мобильная сотовая связь

Мобильная (сотовая) телефонная связь, позволяет пользователю иметь доступ к развитой абонентской сети при помощи портативной переносной (мобильной) трубки-телефона значительного (десятки километров) радиуса действия.

Принцип действия мобильной телефонной связи достаточно прост: при помощи трубки-телефона (мобильного телефона) абонент связывается с ближайшей базовой станцией (передатчиком) сети (рис.14).



Рис. 14. Базовая станция сотовой сети (передатчик)

Эта базовая станция, в свою очередь, связывается со следующим передатчиком сети и т. д. по мере требования абонента (рис.15).

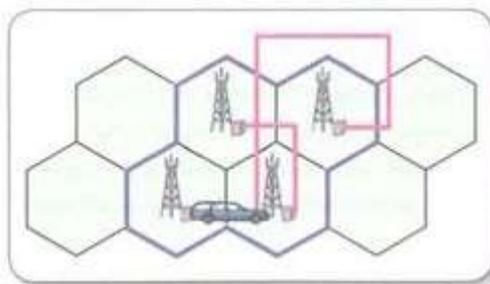


Рис. 15. Сотовая сеть передатчиков

Описанный принцип создания развитой абонентской сети называется *сотовым* принципом, поскольку по такому же принципу пчелы выстраивают соты внутри улья. При этом каждая созданная ячейка служит основой для создания следующей точно такой же ячейки и т. д.

В силу этого обстоятельства мобильную телефонную связь принято называть также **сотовой телефонной** связью. При движении абонента (например, на автомобиле) (см. рис. 15) базовые станции самостоятельно следят за ним и «передают» друг другу, что происходит практически без потери качества связи, быстро и совершенно незаметно для пользователя.

Самая простая часть структурной схемы сотовой связи — мобильный (переносной) телефон, состоит из двух частей: собственно «трубки» или ME (Mobile Equipment) и модуля идентификации абонента, или **смарт-карты** SIM (Subscriber Identity Module), получаемой при заключении контракта с тем или иным оператором.

Каждому сотовому телефону при производстве присваивается собственный номер или международный идентификатор мобильного устройства IMEI (International Mobile Equipment Identity), позволяющий отличить его от второго точно такого же.

Первый оператор GSM принял абонентов в 1991 году, а уже к началу 1994 г. мировые сети, основанные на данном стандарте, имели 1,3 миллиона абонентов. К концу 1995 г. их число увеличилось до 10 миллионов!

При включении мобильного телефона с активированной смарт-картой он «сам» находит ближайшую базовую станцию соответствующей сотовой сети, после чего весь пакет телефонных услуг данной сети становится доступным абоненту.

Каждый передатчик обеспечивает радиопокрытие в среднем на расстоянии до двух десятков километров от него. Для рационального использования сотовой сети передатчиков разрабатываются оптимальные схемы их взаиморасположения на местности с учетом ее рельефа.

Важнейшей характеристикой для выбора того или иного оператора сотовой сети является зона покрытия различных населенных пунктов нашей страны базовыми станциями данной сети.

Современные технологии позволяют в метро или других труднодоступных для электромагнитных волн местах устанавливать микробазовые станции или пикосоты, которые позволяют значительно разгружать мобильный трафик на напряженных направлениях.

Поколения мобильной связи (история мобильной связи) в России наиболее развито и широко представлено 2G. Основные стандарты второго поколения в РФ – GSM 900/1800 и CDMA 450. Как GSM, так и CDMA используются для голосовых звонков, текстовых сообщений и мобильного доступа в интернет. Хотя второе поколение и не может обеспечить таких же скоростей, как скажем, 3G, или 4G, но это единственный вид сотовой связи который присутствует во всех регионах Российской Федерации, даже в наиболее удаленных. Крупнейшими мобильными провайдерами на территории РФ являются МегаФон, МТС, Beeline, ВымпелКом и Теле2. В среднем покрытие территории РФ составляет 85%, однако МТС, к примеру, обеспечивает покрытие на 100% России.

Стандарт GSM в России использует частоты в 900 и 1800 МГц. Поскольку все мобильные телефоны являются дуплексными устройствами, для связи используются сразу две частоты, одна для приема, вторая для передачи данных. К слову, при [определении положения мобильного устройства](#) методом триангуляции по вышкам сотовой связи используются именно эти две частоты. CDMA использует две частоты в диапазонах 450 и 850 МГц, с таким же дуплексным распределением. Крупнейшим CDMA провайдером является СКАЙЛИНК. Как мы уже отмечали, эти стандарты используются в основном для голосовых звонков, текстовых сообщений и мобильного доступа в интернет. Доступ в интернет реализован на технологиях GPRS и EDGE.

Третье поколение мобильной связи или 3G, которое широко используется по всему миру также представлено и в России. Крупнейшие сети 3G в стране работают на технологии WCDMA и согласно решению ГКРЧ работают на частотах 2000-2100 МГц. Под 3G следует понимать 3G со

всеми надстройками: HSUPA, HSPDA HSPA+, которые часто ошибочно имеют как [3,5G](#). Скорости передачи данных в таких сетях несравненно выше чем в сети GSM, и варьируется в диапазоне 2-14 Мбит/сек. Это поколение мобильной связи позволяет нам пользоваться быстрым мобильным интернетом и совершать видео звонки.

Крупнейшими операторами рынка услуг 3G в России являются МТС, МегаФон, ВымпелКом, Beeline и СКАЙЛИНК. Вместе эти компании обеспечивают работу сети 3G в более чем 120 крупнейших городах Российской Федерации. Покрытие сетей третьего поколения не так велико и сосредоточено, в основном, в густо населенных городах. 3G часто используют для организации скрытого беспроводного видео наблюдения, так как скорость передачи позволяет передавать потоковое видео, а низкое энергопотребление увеличивает время работы скрытой камеры. Это отчасти объясняет популярность [подавителей 3G](#).

Сети четвертого поколения также активно развиваются. Первыми компаниями, которые начали строительство такой сети являются Yota и Freshtel, после них в развитие этого поколения связи на территории РФ включились такие гиганты как МТС и МегаФон. Также в России были недавно организованы производственные мощности, которые разрабатывают и собирают оборудование для базовых станций четвертого поколения, а также производят все необходимое для этого периферийное оборудование. Первым городом, где была запущена сеть 4G был Новосибирск, а после четвертое поколение мобильной связи появилось и в Москве. 4G представлена двумя стандартами — LTE (791-862 МГц) и Wi-Max (2500-2600 МГц). На сегодня сеть 4G полностью развернута в таких городах как: Москва, Санкт-Петербург, Сочи, Самара, Новосибирск, Уфа и Краснодар.

Выше были приведены наиболее распространенные стандарты сотовой связи, однако стоит отметить, что РФ также создала свою систему глобального позиционирования, под названием [ГЛОНАСС](#). Она была создана в замену американской спутниковой системе навигации GPS. ГЛОНАСС сильно отличается от GPS. Американская система работает на трех каналах и использует 3 разных частоты: 1575.42, 1227.60 и 1176.45 МГц, и делится на гражданский и военный сектора, а частота 1575.42 МГц отведена для работы службы спасения. ГЛОНАСС, в свою очередь работает с двумя каналами, их частоты: 1602-1615 и 1246-1256 МГц. ГЛОНАСС наиболее популярен в приполярных районах, так как орбиты спутников ГЛОНАСС выше чем орбиты GPS и имеют лучшую видимость. Однако стоит отметить, что GPS определяет координаты точнее.

В целом можно сказать, что Россия имеет неплохое покрытие различными стандартами и поколениями сотовой связи, а высокие темпы [развития сетей 4G](#) не могут не радовать активных пользователей мобильных гаджетов.

Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Чему равна плотность энергии электромагнитного поля?
2. Что представляет собой электромагнитная волна?
3. От чего зависит скорость распространения электромагнитной волны?
4. Что называют длиной электромагнитной волны?
5. Что такое открытый Колебательный контур?
6. На какие виды делятся электромагнитные волны?
7. Как осуществляются генерирование и прием электромагнитных волн?
8. Из каких основных частей состоят и как работают передатчик и приемник радиоволн?
9. Как осуществляется Телевизионная передача?
10. В чем заключается принцип радиолокации?

Лекция 4

Геометрическая оптика. Линзы.

Геометрическая оптика

Основные понятия:

Оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом.

Светящаяся точка – источник оптического излучения, не имеющий размеров.

Луч – линия, вдоль которой распространяется свет; бесконечно тонкий пучок света.

Показатель преломления – физическая величина, характеризующая преломляющую силу прозрачной среды, и равная отношению фазовых скоростей световых волн в вакууме и в данной среде.

Полное внутреннее отражение – отражение света на поверхности раздела двух сред, не сопровождаемое преломлением.

Изображение – картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему световых лучей, и воспроизводящая контуры и детали объекта.

Линза – шлифованное стекло или любое другое прозрачное вещество, ограниченное сферическими поверхностями.

Фокус линзы – точка, в которой пересекаются лучи света или их продолжения, падающие на линзу параллельно главной оптической оси.

Главная оптическая ось – линия, соединяющая центры кривизны поверхностей оптической системы.

Аберрации – погрешности изображения в оптической системе, вызываемые отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе.

Основные законы геометрической оптики.

Оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. Под светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие области спектра электромагнитного излучения – инфракрасную и ультрафиолетовую. Различные участки спектра электромагнитного излучения отличаются друг от друга длиной волны и частотой.

Простейшие оптические явления, например возникновение теней и получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках так называемой геометрической оптики.

Геометрическая (лучевая) оптика представляет собой простой приближенный метод построения изображений в оптических системах. Основные понятия геометрической оптики: светящаяся точка и световой луч.

В геометрической оптике под светящейся точкой понимают источник оптического излучения, не имеющий размеров. Это положение противоречит объяснению светящейся точки в физическом смысле, когда под светящейся точкой понимают тело, которое испускает оптическое излучение, но размерами которого можно пренебрегать по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается это тело.

Под лучом понимается линия, вдоль которой распространяется свет, или, другими словами, бесконечно тонкий пучок света. Луч в таком понимании – абстракция. О существовании луча в таком смысле можно говорить лишь постольку, поскольку он входит в состав светового пучка, содержащего бесконечное множество лучей. Реальное существование имеют не бесконечно тонкие пучки света (лучи), а пучки конечного поперечного сечения (лучи в физическом смысле этого слова), но достаточно узкие, которые еще могут существовать изолированно от других пучков.

Таким образом, светящаяся точка и световой луч в геометрической оптике есть понятия математические.

В основу формального построения геометрической оптики можно положить четыре закона, установленных опытным путем:

1) закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно;

2) закон независимости световых пучков: распространение всякого светового пучка в среде совершенно не зависит от того, есть в ней другие пучки света или нет;

3) закон отражения: падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения (эта плоскость называется плоскостью падения), причем угол падения i_1 равен углу отражения i_1' .

4) закон преломления света: преломленный луч лежит в плоскости падения, причем отношение синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 есть величина, постоянная для двух данных сред, т. е.

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}.$$

Постоянная величина n_{21} называется относительным показателем или коэффициентом преломления второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума называют абсолютным показателем (коэффициентом) преломления этой среды. Его обозначают через n , снабжая эту букву, если требуется, соответствующими индексами. Например, n_1 – показатель преломления первой, а n_2 – второй сред. Ради краткости величину n обычно называют просто показателем (коэффициентом) преломления среды, т. е. опускают прилагательное «абсолютный».

Относительный показатель преломления n_{21} выражается через абсолютные показатели n_1 и n_2 соотношением

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

С учетом данного соотношения закон преломления можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

Если $n_{21} < 1$, то может оказаться, что величина $\sin i_2$, формально вычисленная по

формуле $\sin i_2 = \frac{\sin i_1}{n_{21}}$, начнет

превосходить единицу, т. е. $\sin i_2 > 1$.

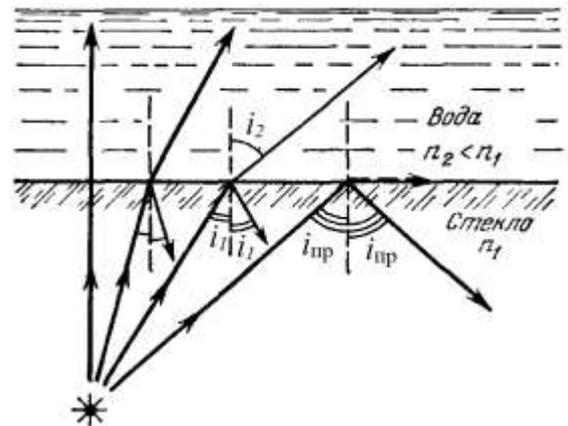
Соответствующего угла преломления не существует. Поэтому преломленный луч не возникает, а свет отражается

полностью. Это явление называется полным отражением. Угол падения, при котором оно возникает, определяется условием $i_1 \geq i_{\text{пр}}$, причем

$$\sin i_{\text{пр}} = n_{21}.$$

Величина $i_{\text{пр}}$ называется предельным углом полного отражения.

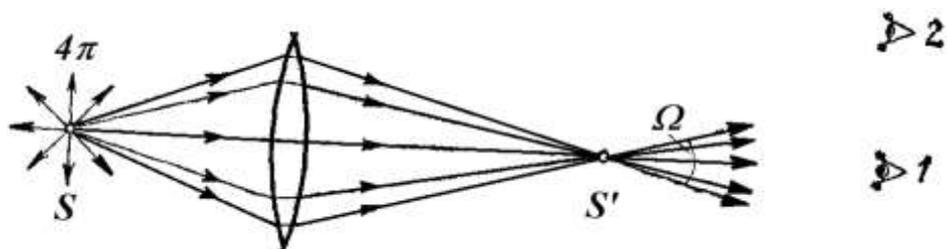
Геометрическая оптика построена на том, что из каждой точки S светящегося предмета проводят пучок лучей и отыскивают точку их пересечения S' после прохождения оптической системы. Из этой точки лучи расходятся дальше, как будто бы точка являлась самостоятельным источником света. Поэтому она называется изображением светящейся точки S . Изображение S' называется действительным, если световые лучи



действительно пересекаются в точке S' . Если же в S' пересекаются продолжения лучей, проведенные в направлении, обратном распространению света, то изображение называется мнимым.

При помощи оптических приспособлений мнимые изображения могут быть преобразованы в действительные. Например, в нашем глазу мнимое изображение преобразуется в действительное, получающееся на сетчатке глаза. Совокупность изображений всех точек светящегося объекта представляет собой изображение этого объекта, полученное с помощью данной оптической системы.

Изображения точечных источников существенно отличаются от действительных точечных источников тем, что из них лучи расходятся в ограниченном телесном угле, тогда как из реального источника – равномерно во все стороны. Поэтому изображение, в отличие от точечного источника, можно видеть не из любого положения.



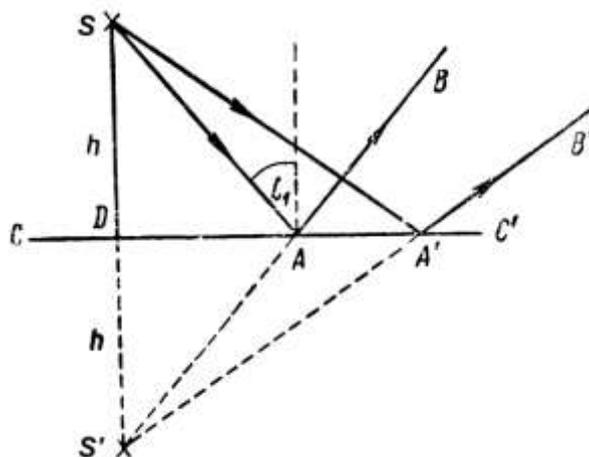
Если желают подчеркнуть, что лучи строго пересекаются в точке S' , то изображение называют стигматическим. Пучок же лучей, исходящих из одной точки или сходящихся в одной точке, называется гомоцентрическим. На практике случаи стигматических изображений, как правило, бывают исключениями.

С математической точки зрения задача геометрической теории оптических изображений сводится к определению положения изображения при любом заданном положении предмета.

Отражение света от плоского зеркала.

Плоское зеркало формирует мнимое изображение.

Рассмотрим луч, исходящий из точечного объекта S и отражающийся от плоского зеркала CC' в произвольной точке A . Опустим из точки S перпендикуляр SD на плоскость зеркала CC' . Пусть продолжение луча AB пересекает продолжение



перпендикуляра SD в точке S' . Угол падения луча PA обозначим через i_1 .

Прямоугольные треугольники DSA и $DS'A$ равны друг другу, так как имеют общую сторону DA и $\angle SAD = \angle S'AD$. Отсюда отрезок $h = DS' = DS$. Так как луч SA выбран произвольно, то это соотношение справедливо и для любого другого луча $SA'B'$, т. е. продолжения всех лучей пересекутся в одной и той же точке S' лежащей за плоскостью зеркала на том же расстоянии $h = SD$, на котором объект S лежит перед зеркалом. Так как в точке S' пересекаются не сами лучи, а их продолжения, то точка S' является мнимым изображением точки S .

Тонкая линза.

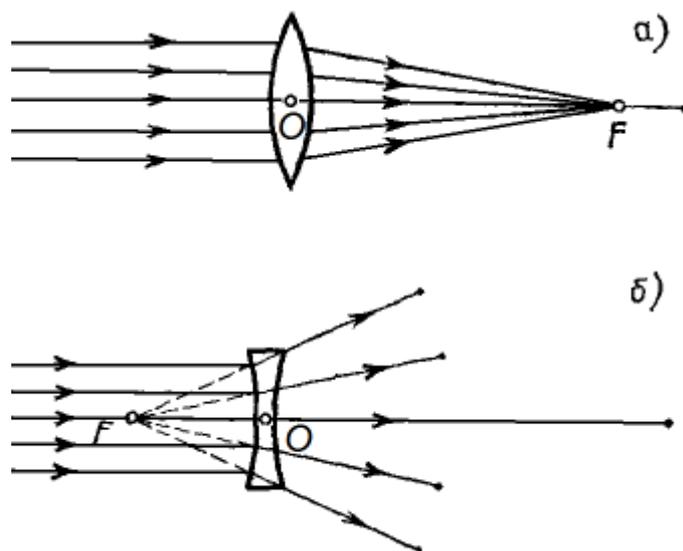
Линзой называют шлифованное стекло или любое другое прозрачное вещество, ограниченное сферическими поверхностями. В частном случае одна из поверхностей линзы может быть плоской. Линзы бывают: 1) собирающие, у которых толщина в середине больше, чем у краев; 2) рассеивающие, у которых толщина в середине меньше, чем у краев. Это применимо для линз, имеющих большой коэффициент преломления, чем среда, из которой падают лучи.

Линзы характеризуют: главной оптической осью – линией, соединяющей центры кривизны поверхностей линзы, оптическим центром O .

Всякую прямую, проходящую через оптический центр линзы, называют ее побочной оптической осью. Через оптический центр линзы луч проходит, не преломляясь.

Линзы, у которых радиусы кривизны образующих их поверхностей велики по сравнению с их толщиной, называют тонкими. Если это условие не выполняется, то линза является толстой.

Линза изменяет направления падающих на нее лучей. Собирающая линза (рис. а) преобразует параллельный пучок лучей в сходящийся. Рассеивающая линза (рис. б) превращает параллельный пучок лучей в расходящийся.



Если на тонкую собирающую линзу параллельно главной оптической оси направить пучок световых лучей, то все лучи пересекутся в одной точке F на главной оптической оси, называемой главным фокусом линзы. У линзы два фокуса. Если на линзу свет падает слева, то фокус, находящийся слева от собирающей линзы, называют передним, а находящийся справа – задним.

Расстояние от оптического центра линзы O до главного фокуса F называют главным фокусным расстоянием F . Эта величина является основной характеристикой линзы. Для собирающих линз главное фокусное расстояние – величина положительная, для рассеивающих – отрицательная. Линзу характеризуют также оптической силой. Оптическая сила – величина, обратная фокусному расстоянию линзы:

$$\Phi = \frac{1}{F}.$$

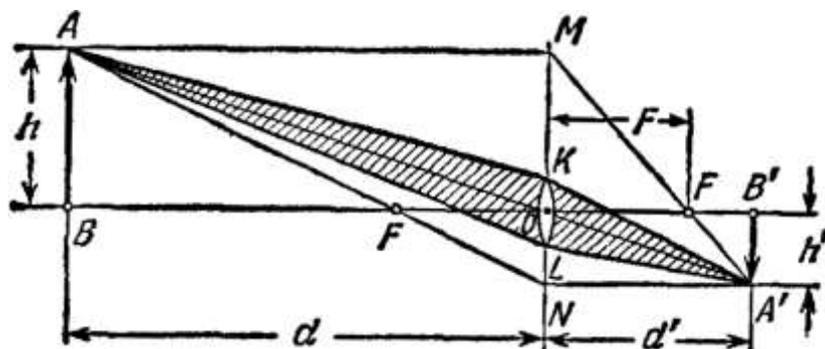
Для собирающей линзы $\Phi > 0$, для рассеивающей $\Phi < 0$. Единица оптической силы – диоптрия (дптр). Диоптрия равна оптической силе линзы с главным фокусным расстоянием 1 м.

Для рассеивающих линз передний фокус является мнимым, и для его построения берут не сами лучи, а их продолжение.

В случае протяженных предметов построение изображения сводится к построению изображений его отдельных точек.

При построении изображений точек, лежащих вне главной оптической оси, удобно использовать лучи, ход которых известен:

- 1) луч AOA' , проходящий через оптический центр (не меняет направления распространения);
- 2) луч AMA' , параллельный главной оптической оси (после преломления в линзе идет через задний фокус);
- 3) луч ANA' , проходящий через передний фокус линзы (после преломления в ней идет параллельно главной оптической оси).



Энергия из точки A в точку A' переносится пучком, заштрихованным на рисунке,

При построении изображения точки A , лежащей на главной оптической оси линзы, нужно знать ход луча, проходящего через точку A и падающего на

линзу под произвольным углом. Для этого нужно провести побочную оптическую ось параллельную данному падающему лучу, и фокальную плоскость. Точка пересечения побочной оси с фокальной плоскостью определяет положение побочного фокуса, в котором соберутся лучи, параллельные побочной оси. Следовательно, исходный луч после преломления в линзе пойдет через этот фокус и точка пересечения его с главной оптической осью даст изображение светящейся точки A .

Главное фокусное расстояние тонкой собирающей линзы определяется по формуле (основная формула линзы)

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{F},$$

где d – расстояние от предмета AB до оптического центра линзы; d' – расстояние от оптического центра линзы до изображения предмета на экране.

Последнюю формулу можно переписать в виде

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления вещества линзы и окружающей среды; r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы.

В последней формуле перед членами, содержащими r_1 и r_2 , ставится знак «плюс» для выпуклых поверхностей и «минус» – для вогнутых. Отсюда следует, что если двояковыпуклая линза находится в оптически более плотной среде, чем вещество линзы то она является рассеивающей. Двояковогнутая линза может быть собирающей, например, если ее поместить в воду.

Линейным увеличением тонкой линзы называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета:

$$\Gamma = \frac{h'}{h}.$$

Как следует из подобия треугольников ABO и $A'B'O$

$$\Gamma = \frac{d'}{d}.$$

Недостатки (абберации) оптических систем.

При построении изображения малого предмета в тонкой линзе мы пользовались параксиальным пучком света. Кроме того, лучи параксиального

пучка составляли небольшие углы с главной оптической осью. Далее, падающий свет считали монохроматическим, а показатель преломления материала линзы – не зависящим от длины волны падающего света. На практике все эти условия не соблюдаются и возникают соответствующие недостатки оптических систем. Коротко остановимся на некоторых из них.

Если же пучок света, исходящий из источника S , составляет большой угол с главной оптической осью, то лучи, составляющие разные углы, пересекают оптическую ось не в одной точке, а в разных точках. расстояниях от центра линзы. Тогда на экране, расположенном перпендикулярно главной оптической оси, вместо стигматического точечного изображения получается расплывчатое пятно. Такая погрешность, связанная со сферичностью преломляющих поверхностей, называется *сферической аберрацией*.

Из-за явления дисперсии (зависимости показателя преломления от длины волны) для данной линзы фокусы для разных цветов будут смещены друг относительно друга. В результате этого изображение белого пятна получается цветным. Чередование цветов зависит от положения экрана наблюдения, а соответствующее искажение носит название *хроматической аберрации*.

В случае, когда лучи, участвующие в построении изображения, образуют достаточно большие углы с главной оптической осью, увеличение системы зависит от угла между пучком и главной оптической осью. В этом случае изображение не является подобным предмету. Поэтому, например, предмет в виде правильного квадрата изображается в искаженном виде – в виде подушки, бочки или еще более сложной фигуры. Недостатки такого рода называются *дисторсией*.

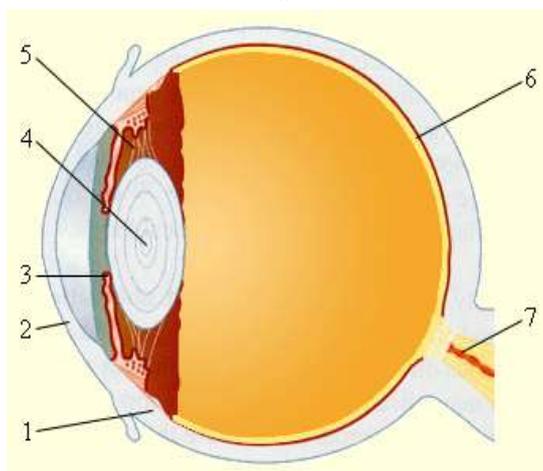
Лучи, идущие от точечного объекта, лежащего вне оптической оси системы, могут образовывать в плоскости изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях сложное несимметричное пятно рассеяния, напоминающее по виду комету с хвостом. Поэтому подобная аберрация во внеосевых пучках была названа *комой*. Кома обусловлена как сферичностью поверхности, так и удаленностью точки от оси, в результате чего построение изображения производится внеосевыми (наклонными) пучками.

Астигматизм наклонных пучков заключается в том, что лучи одного и того же пучка, исходящие из точки и идущие в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, после преломления в оптической системе, теряя гомоцентричность, не собираются в одну точку, а образуют две точки

схода. В результате этого изображение точки имеет вид пятна рассеяния, форма которого зависит от положения экрана наблюдения.

Глаз как оптический инструмент

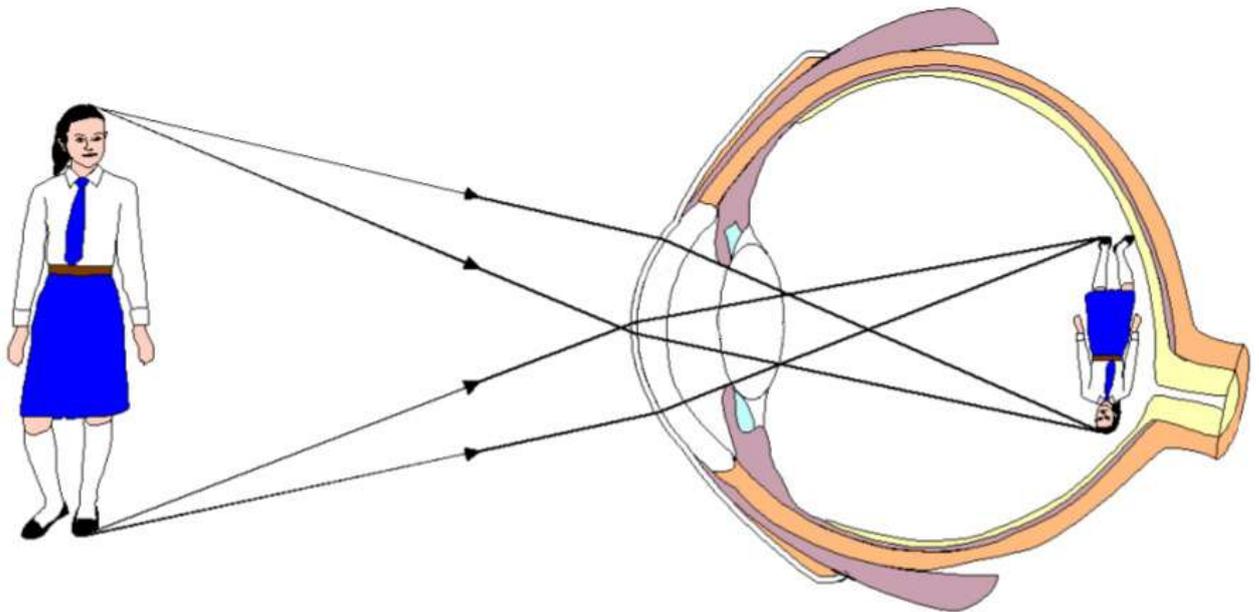
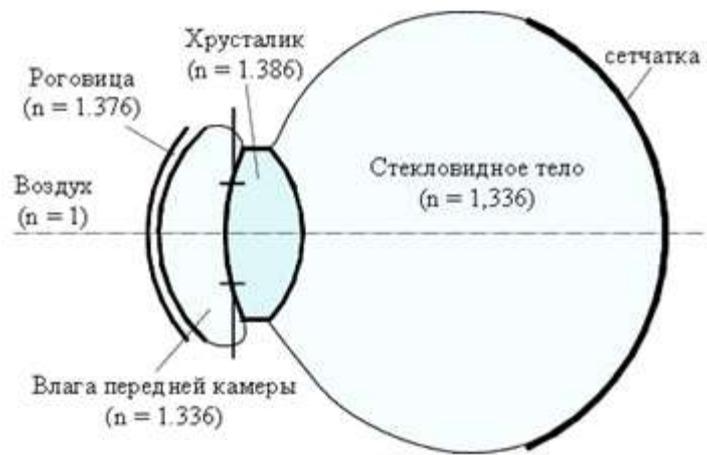
Глаз имеет почти шарообразную форму и диаметр около 2,5 см. Снаружи он покрыт защитной оболочкой 1 белого цвета – склерой. Передняя прозрачная часть 2 склеры называется роговицей. На некотором расстоянии от нее расположена радужная оболочка 3, окрашенная пигментом. Отверстие в радужной оболочке представляет собой зрачок.



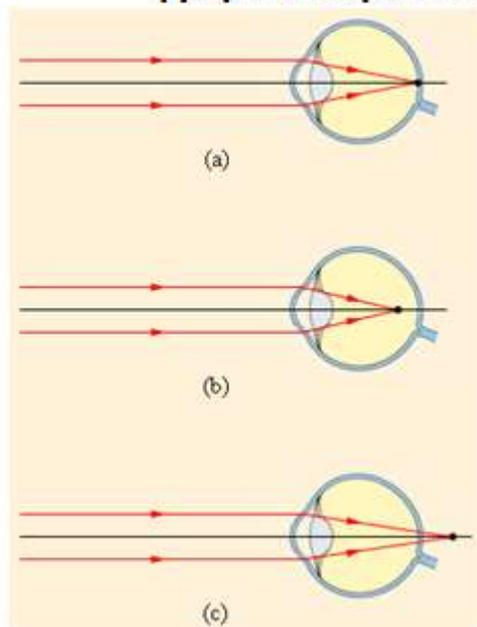
В зависимости от интенсивности падающего света зрачок рефлекторно изменяет свой диаметр приблизительно от 2 до 8 мм, т.е. действует подобно диафрагме фотоаппарата. Между роговицей и радужной оболочкой находится прозрачная жидкость. За зрачком находится хрусталик 4 – эластичное линзоподобное тело. Особая мышца 5 может изменять в некоторых пределах форму хрусталика, изменяя тем самым его оптическую силу. Остальная часть глаза заполнена стекловидным телом. Задняя часть глаза – глазное дно, оно покрыто сетчатой оболочкой 6, представляющей собой сложное разветвление зрительного нерва 7 с нервными окончаниями – палочками и колбочками, которые являются светочувствительными элементами.

Упрощенная оптическая схема глаза

Оптическую систему глаза составляют роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело

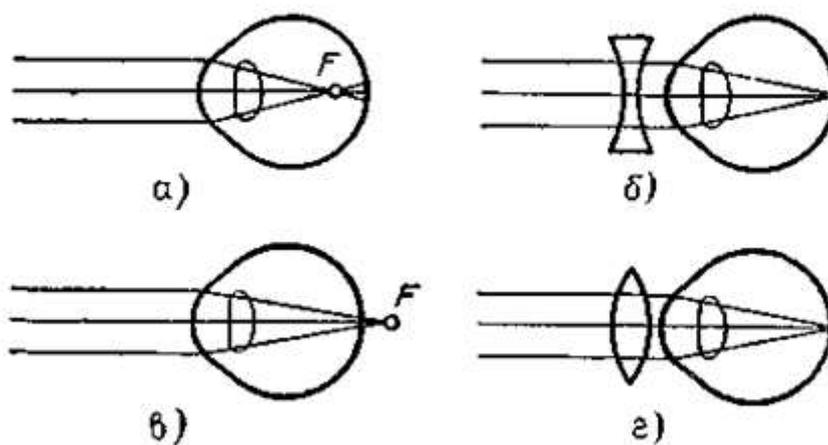


Дефекты зрения и их коррекция



Изображение удаленного предмета:
 а – нормальный глаз;
 б – близорукий глаз;
 с – дальнозоркий глаз.

Дефекты зрения и их коррекция



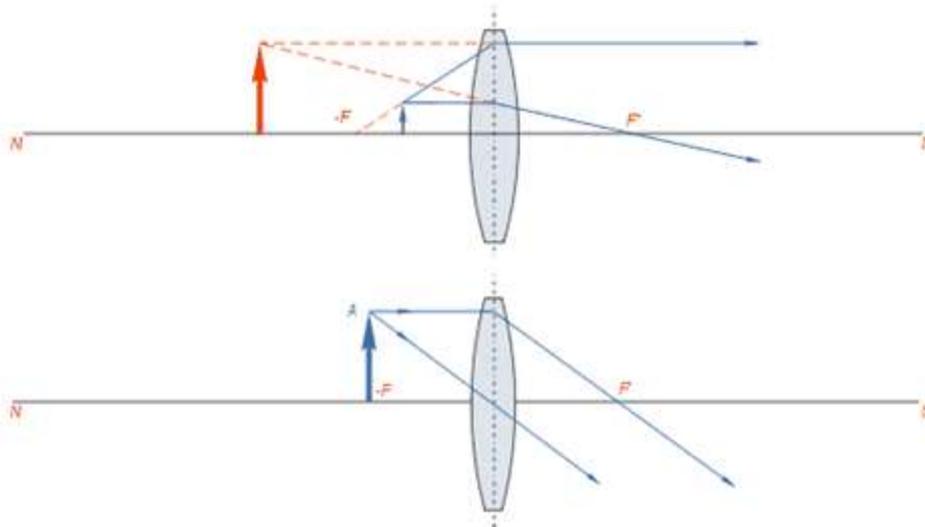
Оптические приборы

Оптическими приборам и называют устройства, предназначенные для получения изображений различных объектов. К оптическим приборам относятся лупа, фотоаппарат, микроскоп, телескоп и т.д.

Лупа. Простейшим прибором, с помощью которого можно увеличивать угол зрения, является *лупа*. Лупа представляет собой короткофокусную линзу. При рассмотрении предмета его помещают между лупой и фокусом лупы

III. Лупа

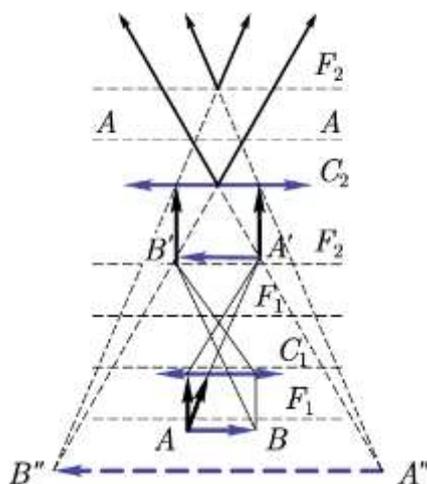
Если предмет находится на расстоянии меньшем фокусного, то лучи выйдут из линзы расходящимся пучком, нигде не пересекаясь. Изображение при этом получается **мнимым, прямым, увеличенным**.



Чем меньше фокусное расстояние лупы F , тем большее угловое увеличение она дает, или угловое увеличение лупы пропорционально ее оптической силе. Лупы с $F < 2$ см не применяют, так как они искажают изображения.

Микроскоп. Для получения большого углового увеличения используют оптические системы, состоящие из нескольких линз, т. е. **м микроскоп**.

Простейший микроскоп состоит из двух короткофокусных собирающих линз: O_1 и O_2



Если предмет AB поместить перед линзой C_1 (объективом) на расстоянии немного большем, чем фокусное F_1 , то объектив даст увеличенное действительное и обратное изображение предмета $A'B'$. Вторую линзу C_2 (окуляр), обращенную к глазу наблюдателя, располагают так, чтобы

изображение, даваемое объективом, находилось между окуляром и фокусом F_2 окуляра со стороны объектива. В этом случае окуляр действует как лупа и дает увеличенное, мнимое и обратное (по отношению к предмету) изображение предмета $A''B''$, которое и воспринимается глазом наблюдателя. Плоскость изображения, даваемого микроскопом, устанавливается на расстоянии наилучшего зрения от глаза наблюдателя.

Оптическое увеличение микроскопа

$$\Gamma = \frac{A''B''}{AB}$$

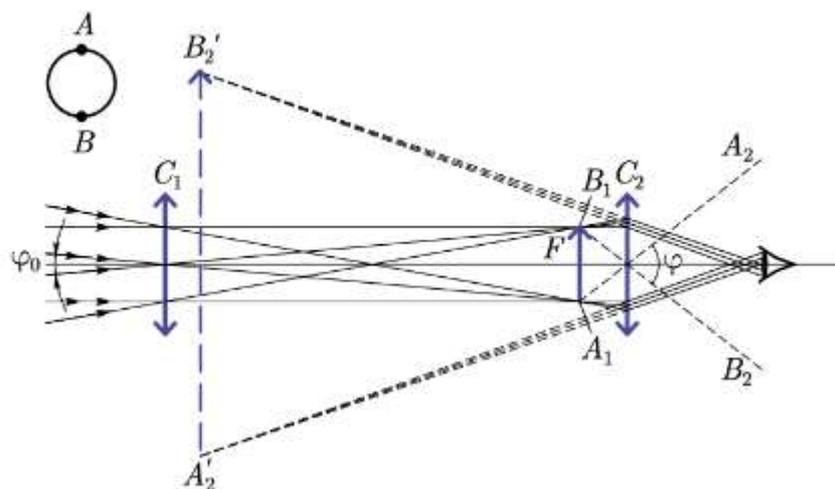
$$\Gamma = \delta d_{\text{н}} D_1 D_2$$

где δ – расстояние между фокусами объектива и окуляра; $d_{\text{н}}$ – расстояние наилучшего зрения; $D_1 D_2$ – оптическая сила объектива и окуляра соответственно.

Телескоп.

Оптический прибор, с помощью которого можно детально рассматривать удаленные объекты, называют *телескопом*.

Первый телескоп-рефрактор, точнее зрительную трубу, изобрел датский оптик И. Липперсгей. Его изобретение, как имеющее военное значение, было засекречено датским правительством. Но весть о приборе, приближающем далекие предметы, широко распространилась по Европе. Узнал о ней и великий итальянский ученый Г. Галилей. Независимо от датского оптика он построил телескоп еще более совершенной конструкции. Простейшим телескопом является зрительная труба. Ход лучей в телескопе показан на рис.



С помощью объектива C_1 получают действительное изображение астрономического объекта, лучи от любой точки которого идут практически параллельно.

Действительное, обратное и уменьшенное изображение A_1B_1 объекта AB получается почти в фокальной плоскости объектива. Окуляр C_2 в телескопе располагают таким образом, чтобы его передний фокус совпадал с задним фокусом объектива. Следовательно, изображение A_1B_1 объекта AB находится почти в фокальной плоскости окуляра C_2 , окуляр дает изображение $A_2'B_2'$.

$$\Gamma = \frac{F_{об}}{F_{ок}}$$

Для получения значительных угловых увеличений нужно использовать длиннофокусные объективы и короткофокусные окуляры.

Чем больше диаметр телескопа, тем больше его разрешающая способность.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света.
2. Что такое световой луч?
3. Что называют углом падения? углом отражения?
4. Сформулируйте законы отражения света, законы преломления света.
5. Что называют абсолютным (относительным) показателем преломления?
6. Что называют предельным углом полного отражения?
7. В чем различие собирающих и рассеивающих линз?
8. Какая линза называется тонкой?
9. Что такое фокусное расстояние линзы, оптическая сила линзы?
10. Как осуществляется построение изображения предметов в линзах?
11. Напишите формулу тонкой линзы.
12. Почему глаз – оптическая система?
13. Какую линзу называют лупой?
14. Из каких оптических элементов состоит микроскоп?

Лекция № 5.

Волновые свойства света. Принцип относительности Эйнштейна

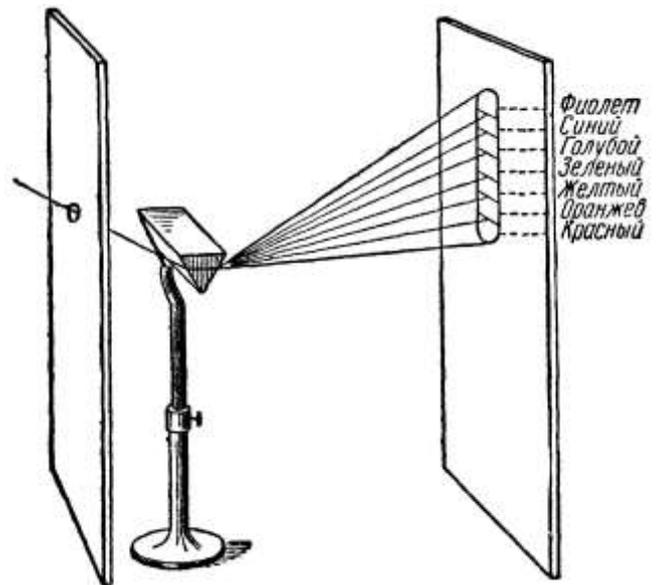
Волновая оптика

Дисперсия света

Если пропустить пучок белого света через стеклянную призму, то на экране возникнет полоска с непрерывно меняющейся окраской, которая называется призматическим, или дисперсионным, спектром (см. рис.).

Разложение белого света в спектр при прохождении через призму – проявление дисперсии. **Дисперсией называют зависимость скорости света в веществе от длины волны, или зависимость показателя преломления вещества от длины волны.**

Почему же белый свет, проходя через призму, разлагается в спектр? С точки зрения волновой теории всякий колебательный процесс можно характеризовать частотой колебаний, амплитудой и фазой. Амплитуда колебаний (точнее, ее квадрат) определяет энергию колебаний. Фаза играет основную роль в явлениях интерференции. Цвет всех лучей связан с длиной волны.



Дисперсия света характерна для всех сред, кроме вакуума.

В вакууме скорость распространения электромагнитных волн любой длины одна и та же ($3 \cdot 10^8$ м/с), а в веществе зависит от длины волны.

Поэтому отличаются и показатели преломления $n = \frac{c}{v}$ для различных волн, входящих в состав белого света. **Проходя через призму, составные части белого луча испытывают различное преломление и выходят расходящимся цветным пучком.**

Явление дисперсии света наблюдается не только при прохождении света через призму, но и во многих других случаях. Так, например, преломление солнечного света в водяных каплях, образующихся в атмосфере, сопровождается разложением его на цветные лучи; этим объясняется образование радуги.

Дисперсию называют нормальной, если показатель преломления возрастает с уменьшением длины волны.

При сравнении спектров, полученных с помощью призм с равными преломляющими углами, но изготовленных из различных веществ, установлено, что цветные лучи не только отклонены на разные углы, что обусловлено разными значениями n для одной и той же λ , но и их спектры растянуты на большую или меньшую длину из-за различия в значении дисперсии для разных веществ.

Первые экспериментальные исследования дисперсии света принадлежат Ньютону, который показал, что белый свет является сложным и состоит из семи цветов: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового. Собирая линзой в одно место вышедшие из призмы цветные лучи, Ньютон получил на экране, вместо окрашенной, белую полоску. Следовательно, при соединении цветных лучей спектра образуется белый цвет. Белый цвет можно получить при смешении двух (или более) цветов. Такие цвета называют дополнительными. Примером дополнительных цветов являются желтые и синие лучи. Смешивая в различной пропорции излучение трех основных цветов, какими являются красный, зеленый и фиолетовый, можно получить любую окраску лучей.

В окраске тел наблюдается большое разнообразие. Цвет тела обусловлен его окраской, свойствами его поверхности, оптическими свойствами источника света и среды, через которую свет распространяется.

Цвет прозрачного тела определяется составом того света, который проходит через него.

Если пропустить белый свет через окрашенные стекла (например, красное, зеленое и др.), то эти стекла преимущественно пропустят те цвета, в которые они окрашены сами: красные – красный; зеленые – зеленый и т. д. На этом основано применение различных световых фильтров.

Цвет непрозрачного тела определяется смесью цветов, которые оно отражает. Некоторые тела кажутся нам только желтыми, другие – синими и т.д. Это значит, что тело преимущественно отражает желтые (синие) лучи. Тело, отражающее в большом количестве все цветные лучи, будет казаться белым. Тело, поглощающее почти все падающие на него лучи, будет казаться черным.

В природе не существует ни абсолютно белых, ни абсолютно черных тел.

Способность тел поглощать определенные цветные лучи называют избирательным поглощением. От него и зависит окраска тел.

Если падающий на окрашенную поверхность свет по своему составу отличается от дневного, то эффекты освещения могут быть совершенно другими. Даже переход от дневного света к искусственному значительно меняет соотношение цветов и оттенков предметов и особенно художественных произведений. Желтые и зеленые цвета кажутся при вечернем освещении более тусклыми, а синий цвет – почти черным.

Интерференция света.

Свет представляет собой электромагнитную волну, в которой колеблются два вектора – напряженности электрического и напряженности магнитного полей. Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями электрического вектора, о котором говорят как о световом векторе.

Явление интерференции света состоит в сложении световых пучков, что ведет к образованию системы светлых и темных полос. Из явления интерференции следует, что два световых потока, накладываясь, могут не только усиливать, но и ослаблять друг друга. Это свойство световых потоков непосредственно указывает на их волновую природу: две системы волн усиливают друг друга там, где гребни волн одной системы попадают на гребни другой и провалы на провалы, и ослабляют друг друга в тех местах, где гребни накладываются на провалы.

Рассмотрим два световых пучка. Пусть \vec{E}_1 – напряженность электрического поля, создаваемая первым пучком в произвольной точке C области перекрытия, а \vec{E}_2 – вторым. Согласно принципу суперпозиции, результирующая напряженность поля в той же точке C , создаваемая обоими пучками, будет представляться векторной суммой $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

Все приемники света могут измерять только усредненные по времени величины, квадратичные по полю. Такая величина в оптике называется интенсивностью света и обозначается через I

$$I \sim \langle \vec{E}^2 \rangle.$$

Найдем теперь интенсивность света в точке C . Возведя равенство $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ в квадрат и произведя усреднение по времени, получим

$$I = I_1 + I_2 + I_{12},$$

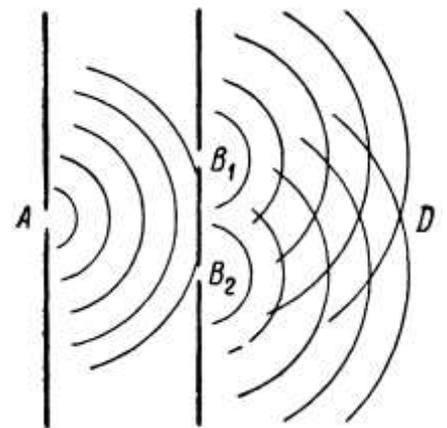
где I_1 – интенсивность света первого пучка, а I_2 – второго. Последнее слагаемое

$$I_{12} \sim 2\langle \vec{E}_1 \vec{E}_2 \rangle,$$

учитывающее взаимодействие пучков, называется **интерференционным членом**. Если взять независимые источники света, например две электрические лампочки, то повседневный опыт показывает, что $I = I_1 + I_2$, т. е. результирующая интенсивность равна сумме интенсивностей налагающихся пучков, а потому интерференционный член обращается в нуль. Тогда говорят, что пучки не коррелированы или не когерентны между собой. Однако, если накладываются пучки не независимы, например один получается отражением другого от зеркала, то в некоторых случаях интерференционный член I_{12} не обращается в нуль, а потому $I \neq I_1 + I_2$. В одних точках пространства результирующая интенсивность I больше, в других меньше суммы интенсивностей I_1 и I_2 .

Вообще говоря, колебания, удовлетворяющие условиям, при которых разность фаз остается постоянной величиной называются когерентными. Ясно, что колебания, происходящие с разными частотами, не могут быть когерентными. Однако не все колебания, частоты которых одинаковы, являются когерентными.

Когерентные световые пучки были впервые использованы Юнгом в следующем опыте: малое отверстие A в непрозрачном экране освещалось интенсивным источником. Согласно принципу Гюйгенса, оно становится новым источником полусферических волн. Эти волны падают на два следующих малых отверстия B_1 и B_2 , которые, в свою очередь, становятся источниками волн, перекрывающихся друг друга в области D . Так как колебания в отверстиях B_1 и B_2 вызываются одной и той же падающей на них волной, то они совершаются в одинаковой фазе и с одинаковыми амплитудами. Волны, исходящие из точек B_1 и B_2 сходятся в каждой точке области D с разностью хода, определяемой пройденными ими путями. В зависимости от этой разности хода они усиливают или ослабляют друг друга. Таким образом, наблюдается чередование светлых и темных полос.



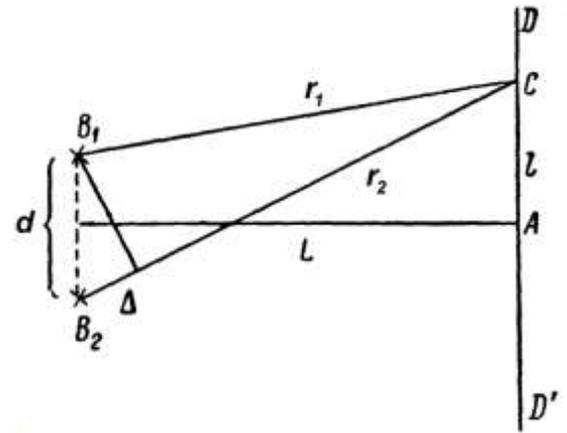
Рассмотрим этот эксперимент подробнее. Пусть имеем два когерентных источника, расположенных в точках B_1 и B_2 на расстоянии d друг от друга, колеблющихся с одинаковой частотой и в одной фазе. Когерентные волны, исходящие из этих источников, встретятся в некоторой точке экрана C .

Рассматриваемые в точке C колебания описываются уравнениями:

$$E_1 = E_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right),$$

$$E_2 = E_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_2\right),$$

где E_0 – амплитуды колебаний в точке C (для простоты считаем их равными). Положим, что оба колебания происходят перпендикулярно плоскости чертежа.



После сложения колебаний в точке C имеем

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos\frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)\right),$$

где $2E_0 \cos\frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$ – амплитуда колебания в точке C . По известной амплитуде можно определить результирующую интенсивность:

$$I \sim 4E_0^2 \cos^2 \frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1).$$

Данная формула выражает зависимость результирующей интенсивности в каждой точке экрана DD' от разности хода слагаемых волн. Причем, максимальная освещенность наблюдается, когда волны одинаковых периодов максимально усиливают друг друга при разности хода Δ , равной целому числу длин волн λ :

$$\Delta = r_2 - r_1 = \pm m\lambda,$$

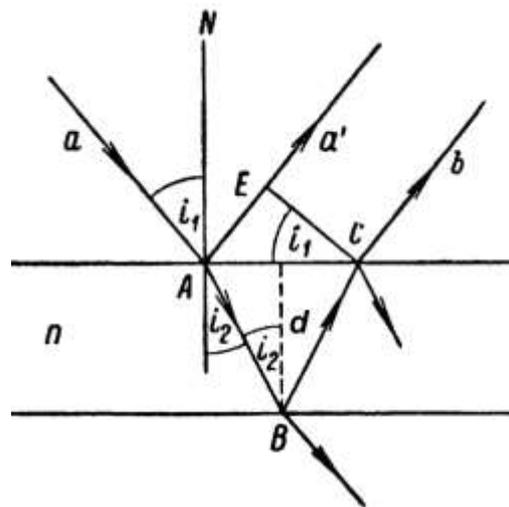
где m – целое число, а минимальная освещенность – когда волны максимально ослабляют друг друга при разности хода, равной нечетному числу длин волн:

$$\Delta = r_2 - r_1 = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Интерференция в тонких пленках.

Наиболее типичным и распространенным примером интерференции света является интерференция в тонких пленках (мыльная пленка, тонкая стеклянная пластинка и т.д.).

На рисунке показана тонкая пленка толщиной d , на нее под углом i_1 к нормали N падает параллельный пучок лучей. Рассмотрим результат интерференции в лучах, отраженных от пленки. Для подсчета разности хода выделим из пучка отдельный луч a , падающий на первую поверхность в точке A под углом падения i_1 . Этот луч частично отразится, образовав луч a' частично преломится и упадет на вторую поверхность пластины в точке B . Здесь он снова частично преломится и частично отразится. То же произойдет и в точке C , где возникнет преломленный луч b , параллельный лучу a' . Опустим из точки C перпендикуляр CE на направление луча a' . Тогда, считая коэффициент преломления пластины равным n , а коэффициент преломления среды вне пластины (воздуха) равным единице, получим для разности хода Δ между лучами a' и b :



$$\Delta = (AB + BC)n - \left(AE + \frac{\lambda}{2} \right),$$

где λ – длина волны рассматриваемого света. Величина $\lambda/2$ представляет собою добавочную разность хода, возникающую при отражении луча a на границе между воздухом и пластиной: если бы среда вне пластины имела коэффициент преломления больше, чем коэффициент преломления пластины, то потеря полуволны имела бы место при отражении в точке B . Кроме того, учтено, что оптический путь равен геометрическому пути, умноженному на показатель преломления среды, в которой распространяется свет.

Из рисунка имеем

$$AB = BC = \frac{d}{\cos i_2},$$

где d – толщина пленки, i_2 – угол преломления. Также из рисунка следует, что

$$AE = AC \sin i_1 = 2d \cdot \operatorname{tg} i_2 \sin i_1.$$

Воспользовавшись законом преломления: $\sin i_1 = n \sin i_2$, перепишем выражение для AE в виде:

$$AE = 2d \cdot n \frac{\sin^2 i_2}{\cos i_2}.$$

Подставив в выражение для разности хода вместо AB , BC и AE их значения, найдем

$$\Delta = 2d \cdot n \frac{1 - \sin^2 i_2}{\cos i_2} - \frac{\lambda}{2}$$

или

$$\Delta = 2d \cdot n \cos i_2 - \frac{\lambda}{2}.$$

Это выражение можно несколько преобразовать, введя в него вместо угла преломления i_2 , угол падения i_1 .

Воспользовавшись законом преломления, найдем

$$\cos i_2 = \sqrt{1 - \sin^2 i_2} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 i_1}{n^2}},$$

после чего получим:

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}.$$

Разность хода зависит от толщины d пленки, показателя преломления n материала, угла падения лучей i_1 и длины волны λ падающего света. Итак, результат интерференции в тонких пленках определяется следующими условиями, выраженными через оптическую разность хода.

Условие максимума:

$$2k \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}, \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots$$

Условие минимума:

$$(2k + 1) \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}, \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots$$

Анализируя последние два выражения, приходим к выводам:

1) если на тонкую пленку падает монохроматическое излучение (например, $\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7}$ м – красный цвет), то она в отраженном свете будет либо красной (максимум), либо темной (минимум);

2) если на тонкую пленку падает белый свет (сложный), то она будет иметь окраску, соответствующую λ , для которой выполняется условие максимума.

Однородная окраска при угле падения i_1 наблюдается в том случае, когда толщина пленки всюду одинакова, в противном случае постоянной окраски не будет и только части пленки, имеющие одинаковую толщину, будут казаться окрашенными в один цвет.

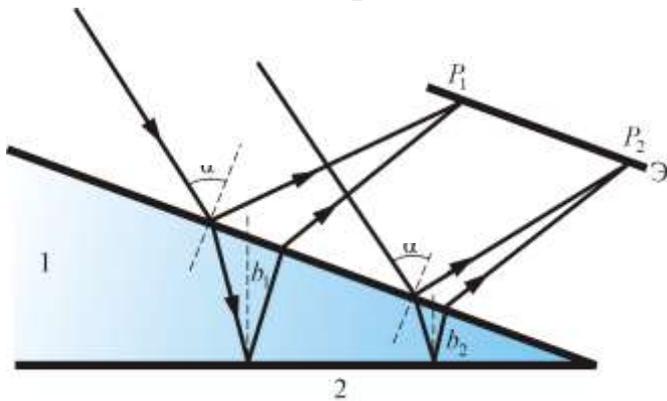
Интерференционная картина наблюдается и в проходящем свете, но так как в проходящем свете нет потери полуволны, то вся картина интерференции изменится на обратную.

Интерференция от клина

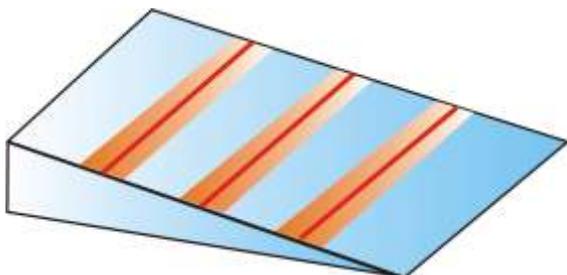
Полосы равной толщины

В белом свете интерференционные полосы окрашены. Поэтому такое явление называют *цветами тонких пленок*. Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, возникающих на поверхности металлов при закалке, и т.п.

Каждая из интерференционных полос возникает в результате отражении от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют *полосами равной толщины*

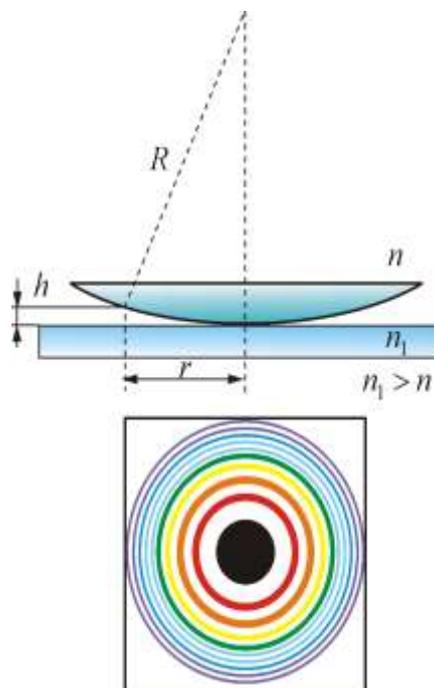


$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2(i_1)} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$



Кольца Ньютона

Кольцевые полосы равной толщины, наблюдаемые в воздушном зазоре между соприкасающимися выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны и плоской поверхностью стекла, называют кольцами Ньютона.



$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

$$h = \frac{m\lambda}{2}$$

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}$$

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}$$

Применение интерференции света

1.. Расположение интерференционных полос зависит от длины волны и разности хода лучей. Это позволяет по виду интерференционной картины (или их смещению) **проводить точные измерения расстояний** при

известной длине волны или, наоборот, определять спектр интерферирующих волн (интерференционная спектроскопия).

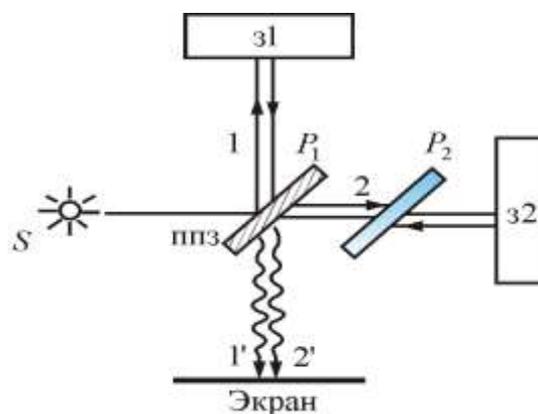
Интерферометр Майкельсона.

Интерферометры – оптические приборы, действие которых основано на явлении интерференции света.

Принцип действия интерферометра заключается в следующем: пучок электромагнитного излучения (света, радиоволн и т. п.) с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее количество когерентных пучков. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и возвращается на экран, создавая интерференционную картину, по которой можно установить смещение фаз пучков

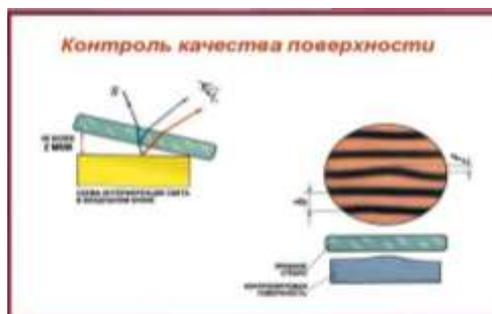
Принцип действия интерферометра Майкельсона

z1 и z2 – зеркала. Полупрозрачное зеркало P₁ посеребрено и делит луч на две части – луч 1 и 2. Луч 1, отражаясь от z1 и проходя P₁ дает 1', а луч 2, отражаясь от z2 и далее от P₁ дает 2'. Пластинки P₁ и P₂ одинаковы по размерам. P₂ ставится для компенсации разности хода второго луча. Лучи 1' и 2' когерентны и интерферируют



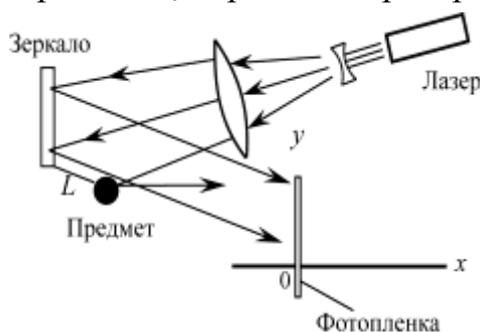
$$\Delta = n(l_2 - l_1)$$

2. По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды, в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.



3. Явление интерференции волн, рассеянных от некоторого объекта (или прошедших через него), с «опорной» волной лежит в основе **голографии** (в т.ч. оптической, акустической или СВЧ-голографии).

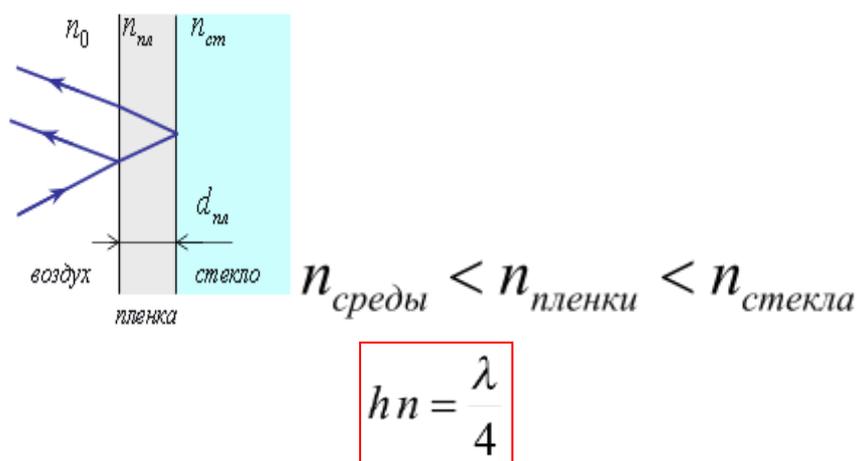
Голографический негатив, освещенный монохроматическим светом, дает полное трехмерное изображение, парящее в пространстве.



На фотопленку попадают как отраженный от предмета лазерный свет, так и опорный пучок от зеркала

4. Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.

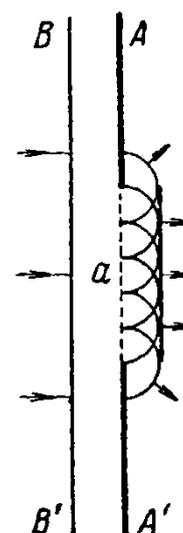
На поверхность объектива наносится тонкий слой прозрачного вещества: фторида кальция CaF_2 или фторида магния MgF_2 .



Дифракция света.

Характерным для распространения любых волн является их способность загибаться за преграды (давать дифракцию). Однако масштаб загибания зависит от отношения размеров преграды к длине волны. Например, крупные волны, распространяющиеся по поверхности воды, полностью огибают сваю, мелкая же рябь образует за сваей хорошо выраженную область „тени“.

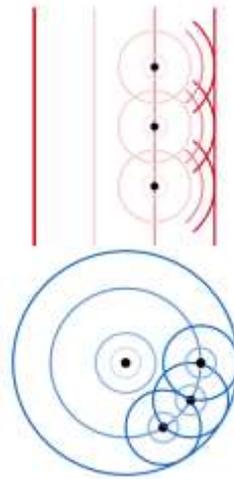
Принцип Гюйгенса позволяет построить новое положение фронта, проводя огибающую к элементарным волнам, возникшим около каждой точки положения фронта в предыдущий момент. Такое построение указывает на загибание волн за преграды. На рисунке представлена плоская волна BB'



падающая на преграду AA' с отверстием a . Часть фронта этой волны достигает отверстия a , в результате чего каждая точка отверстия становится источником элементарных полусферических волн. Огибающая этих элементарных волн лишь в средней части является плоской и загибается по краям. В соответствии с этим и лучи (нормали к волновым поверхностям) загибаются – дифрагируют – у отверстия.

Т.о. явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса

Каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового



фронта в следующий момент времени

Однако описание, даваемое принципом Гюйгенса, далеко не полно: оно не позволяет найти амплитуды колебаний, распространяющихся в различных направлениях. Так как энергия колебаний дается квадратом амплитуды, то интенсивность загибающихся волн остается неопределенной.

Дополнения к принципу Гюйгенса

1. Все **вторичные** источники фронта волны, исходящей из одного источника, **когерентны** между собой.

2. Равные по площади участки волновой поверхности излучают **равные интенсивности** (мощности).

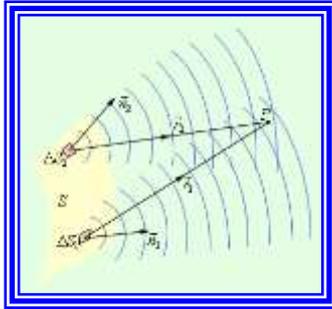
3. Каждый вторичный источник излучает свет преимущественно **в направлении внешней нормали** к волновой поверхности в этой точке.

4. Для вторичных источников справедлив принцип суперпозиции: **излучение одних участков** волновой поверхности **не влияет** на излучение других.

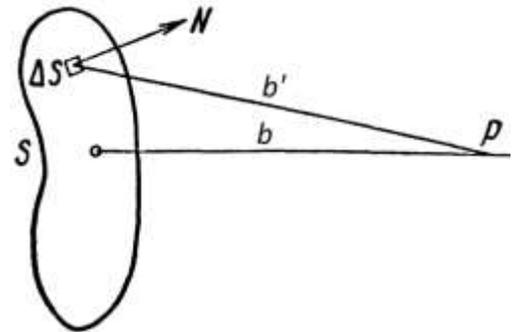
Этот недостаток принципа Гюйгенса устраняется методом расчета, предложенным Френелем и базирующимся на более углубленном представлении о волновом процессе с учетом амплитуд и фаз колебаний.

Принцип Гюйгенса – Френеля

Каждая точка любой воображаемой поверхности, окружающей один или несколько источников света, является центром **вторичных световых волн**, которые **когерентны**, и интенсивность света в любой точке пространства есть результат **интерференции** этих вторичных волн.

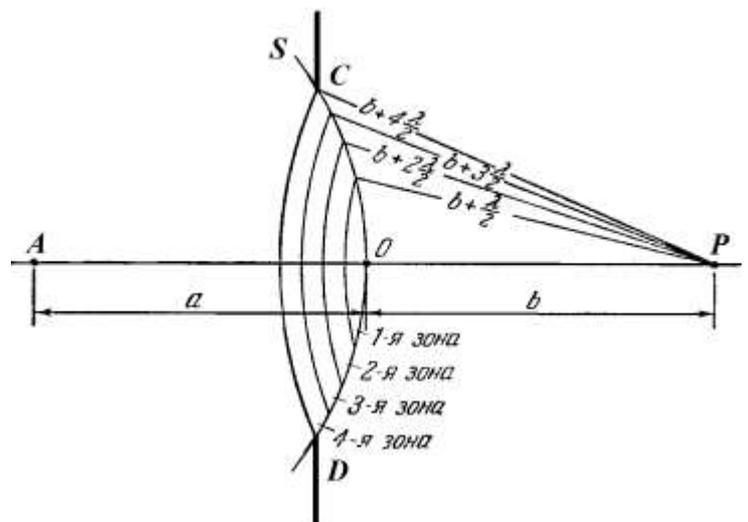


Пусть поверхность S представляет собой положение волнового фронта в некоторый момент времени. Для того чтобы определить колебания в точке P , лежащей перед фронтом на расстоянии b , надо, по Френелю, определить колебания, приходящие в точку P от всех элементов поверхности S , и затем сложить их, учитывая их амплитуды и фазы.



Амплитуда колебаний, приходящих в точку P от элемента поверхности ΔS , зависит от размеров этого элемента, от расстояния r и от угла, который направление r составляет с нормалью к поверхности N . Фаза колебаний определяется длиной пути b' , пройденного волнами. Суммирование таких элементарных колебаний является задачей интегрального исчисления и, вообще говоря, может быть весьма сложным. Но в простейших случаях, обладающих симметрией, как показал Френель, интегрирование может быть заменено простым алгебраическим или графическим сложением.

Рассмотрим случай прохождения света через круглое отверстие. Пусть A – точечный источник света, CD – круглое отверстие в непрозрачном экране. Это отверстие пропустит лишь часть сферической волны, исходящей из A . Определим действие этой волны в точке P , лежащей на прямой AP проходящей через центр отверстия CD . Для этого



мысленно разделим волновую поверхность S на кольцевые зоны (зоны Френеля), построенные таким образом, чтобы расстояния от краев соседних зон до точки P различались на половину длины волны. Легко видеть, что расстояние b_m от края m -ой зоны до точки P можно представить следующим образом:

$$b_m = b + m \frac{\lambda}{2},$$

где b – расстояние от вершины волновой поверхности O до точки P .

Тогда колебания, приходящие в точку P от соответствующих частей соседних зон, будут иметь разность хода $\lambda/2$, т. е. придут в точку P в противоположных фазах.

Амплитуда колебаний, приходящих от отдельной зоны, зависит от площади зоны, от расстояния b_m от зоны до точки P и от угла наклона между b_m и нормалью к поверхности зоны (отрезком OP).

При b , значительно превышающем радиус отверстия CD , углы, образуемые прямыми b_m с нормалью, очень малы и поэтому можно считать, что амплитуды волн, исходящих из разных зон и достигающих точки P , равны между собой.

Так как все зоны имеют практически одну и ту же площадь, то действие двух соседних зон в точке P взаимно уничтожается. Отсюда следует, что светлыми будут те точки P , которые находятся от точки O на таком расстоянии, что в отверстии уложится нечетное число зон Френеля. При этом действие всего отверстия будет равно действию одной некомпенсированной зоны Френеля. Наоборот, точки P , для которых число зон, умещающихся в отверстии, четное, должны быть темными, так как в этом случае действие одной половины зон компенсирует действие другой половины (именно этот случай изображен на рисунке).

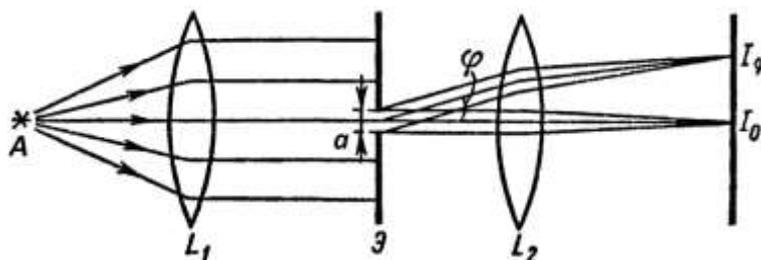
Таким образом, если мы поставим за отверстием белый экран, который будем приближать к отверстию или удалять от него, то центр экрана будет становиться по мере перемещения то темным, то светлым. Из закона сохранения энергии можно далее заключить, что и боковые точки (расположенные в стороне от оси OP) должны быть попеременно, то светлыми, то темными: центральное пятно будет окружено рядом светлых и темных колец.

Разобранный случай дифракции наблюдается без помощи каких-либо оптических приборов: на пути фронта световой волны располагается лишь

непрозрачный экран, частично загораживающий фронт. Данный вид дифракции называется дифракцией Френеля.

Иной способ наблюдения дифракционных явлений дал Фраунгофер. Он наблюдал картину, возникшую в главной фокальной плоскости линзы, собирающей плоские световые волны, частично загороженные тем или иным непрозрачным экраном. Данный вид дифракции называется дифракцией Фраунгофера.

Рассмотрим частный случай дифракции Фраунгофера – дифракцию от одной щели. Принципиальная схема наблюдения дифракции плоских волн (дифракция Фраунгофера) представлена на рисунке. Излучение точечного источника A превращается линзой L_1 в плоскую волну, которая проходит через щель в непрозрачном экране \mathcal{E} . Линза L_2 собирает в различных участках своей главной фокальной плоскости все лучи, прошедшие через щель, в том числе и отклонившиеся на угол φ от первоначального направления в результате дифракции. Исследуя распределение освещенности в фокальной плоскости линзы L_2 , можно определить видимость дифракционной картины.



Применение метода Гюйгенса – Френеля в данном случае весьма просто. Будем считать, что воображаемая поверхность S совпадает с плоскостью непрозрачного экрана и целиком закрывает щель. В наиболее простом случае – нормальное падение исходной волны на поверхность экрана – дополнительная разность хода лучей от различных участков щели определяется углом наблюдения φ .

Для того чтобы определить разность хода между двумя колебаниями, достаточно из точки на поверхности щели, через которую проходит один луч, опустить перпендикуляр на другой луч. Тогда расстояние по этому второму лучу от плоскости щели до основания перпендикуляра и будет искомой разностью хода. В данном случае зоны Френеля, очевидно, будут иметь вид прямоугольных полосок, параллельных краям щели. Число зон Френеля будет зависеть от ширины щели a , угла наблюдения φ и длины волны λ . Поскольку разность хода между лучами, проходящими через края одной зоны Френеля, равна $\lambda/2$, из геометрических соображений легко получить,

что ширина зоны будет равна $\frac{\lambda}{2 \sin \varphi}$ (разность хода – катет, ширина зоны – гипотенуза). Число зон Френеля n , укладывающихся в щели, будет равно:

$$n = a : \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} = \frac{2a \sin \varphi}{\lambda}.$$

Мы видим, что n при постоянных a и λ зависит от угла наблюдения φ . Чем больше угол наблюдения, тем больше число зон Френеля укладывается в щели.

Следует указать, что когда наблюдение ведется с помощью линзы, то при положении экрана в главном фокусе различным углом φ соответствуют отдельные точки экрана. Поэтому мы можем говорить о наблюдении под различными углами, понимая под этим различные точки экрана. Когда n равно целому четному числу ($n=2m$, где m – целое число), то все зоны можно разбить на $n/2$ пар; в результате интерференции действие двух соседних зон Френеля равно нулю, а, следовательно, равно нулю и действие всей щели.

Таким образом, под углами φ , соответствующими четным n , мы будем наблюдать темноту. Формула, определяющая эти углы, имеет следующий вид:

$$a \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2},$$

где m – целое число.

Когда n равно целому нечетному числу ($n=2m+1$), то действие щели эквивалентно действию одной зоны Френеля, ибо действие остальных зон взаимно компенсируется. В этом случае мы наблюдаем максимум света.

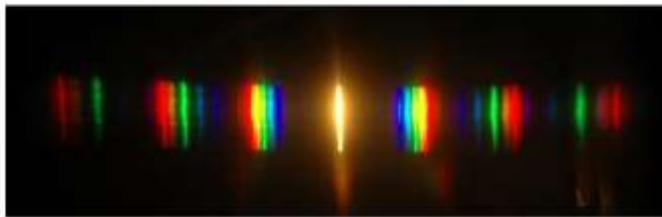
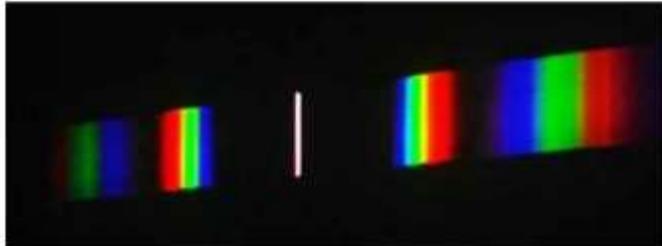
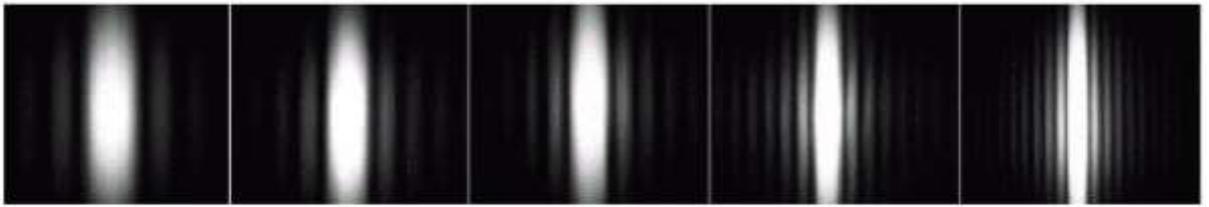
Формула, определяющая направление максимумов света, имеет следующий вид:

$$a \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Смысл последних двух формул заключается в следующем: если разность хода между крайними лучами, проходящими сквозь щель, равна четному числу полуволн, то мы наблюдаем темноту; если разность хода между этими лучами равна нечетному числу полуволн, то мы наблюдаем максимум света.

Мы видим, что в пространстве за щелью вместо геометрического силуэта щели получаются полосы, которые легко наблюдать на опыте.

Дифракция Фраунгофера на одной щели

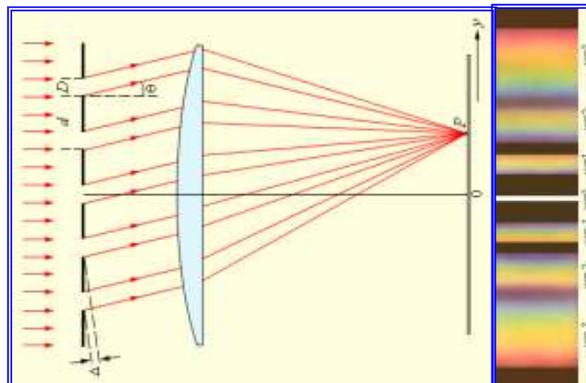


Таким образом, расчет освещенности дифракционной картины свелся к учету интерференции между фиктивными элементарными источниками, заполняющими изучаемое отверстие в непрозрачном экране.

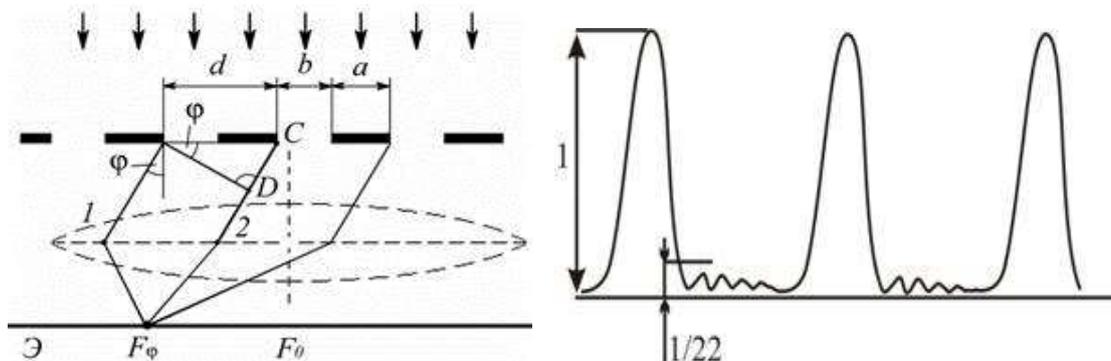
Дифракция света на дифракционной решетке

Одномерная дифракционная решетка представляет собой систему из большого числа N одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей в экране, разделенных также одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками.

Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т.е. в дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей.



Обозначим: b - ширина щели решетки; a - расстояние между щелями; $d=a+b$ - постоянная дифракционной решетки, ϕ - угол дифракции. Линза собирает все лучи, падающие на нее под одним углом.



Условие максимума для дифракционной решетки будет иметь вид:

$$d \sin \phi = \pm m \lambda \quad \text{где } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Максимумы, соответствующие этому условию, называются главными максимумами.

Значение величины m , соответствующее тому или иному максимуму называется порядком дифракционного максимума.

В точке F_0 всегда будет наблюдаться нулевой или центральный дифракционный максимум.

Так как свет, падающий на экран, проходит только через щели в дифракционной решетке, то условие минимума для щели и будет условием главного дифракционного минимума для решетки:

$$b \sin \phi = \pm m \lambda$$

При большом числе щелей, могут образовываться побочные дифракционные максимумы и минимумы.

Условие для дополнительных минимумов.

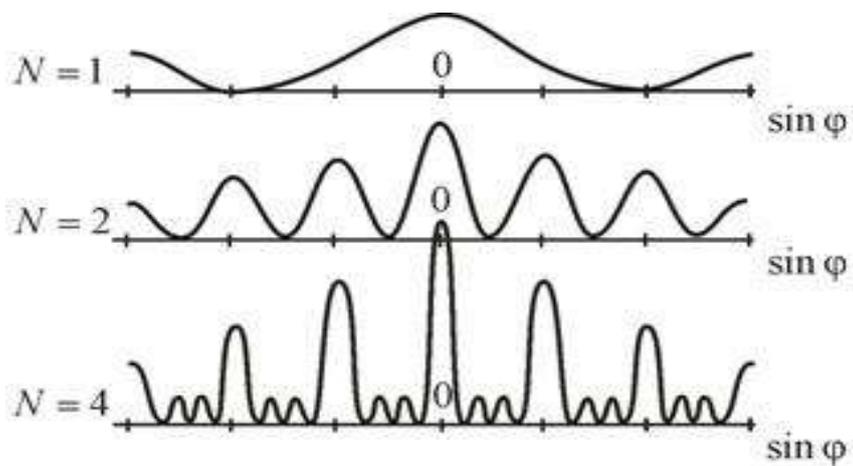
$$\Delta = d \sin \phi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Количество щелей определяет световой поток через решетку.

Чем больше число щелей:

- тем большая энергия переносится волной через нее.
- тем больше дополнительных минимумов помещается между соседними максимумами.

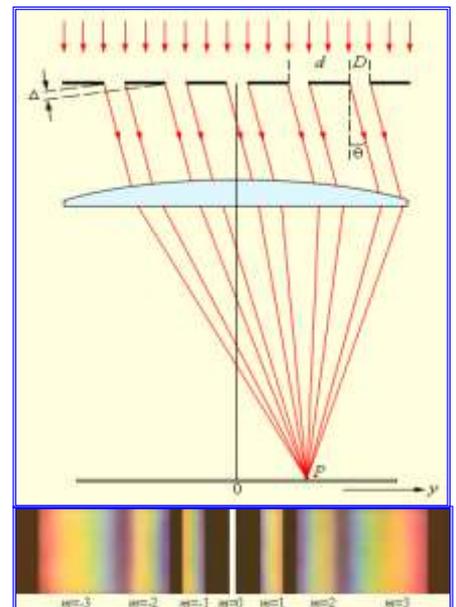
Следовательно, максимумы будут более узкими и более интенсивными.



Между дополнительными минимумами располагаются слабые вторичные максимумы (дополнительные).

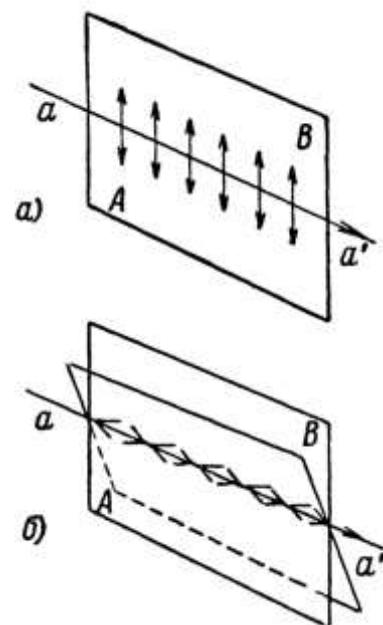
Число таких тах, приходящиеся на промежуток между соседними главными тах, равно $(N - 2)$

Угол дифракции пропорционален длине волны λ . Значит, дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие, причем отклоняет свет с большей длиной волны (красный) на больший угол (в отличие от призмы, где все происходит наоборот).

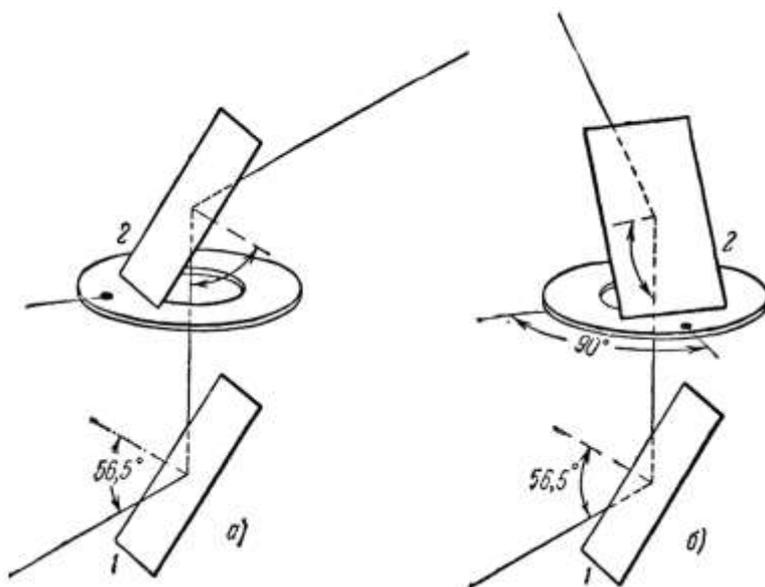


Поляризация света.

Явления интерференции и дифракции в одинаковой степени могут быть объяснены как допущением, что световые волны поперечны, так и допущением, что они продольны. Однако существуют процессы, в которых проявляется различие между поперечными и продольными волнами. В поперечной волне, распространяющейся в направлении aa' (рис. а), все точки вещества совершают колебания в определенной плоскости AB . Следовательно, поперечная волна по отношению к различным плоскостям, проведенным через направление ее распространения, обладает различными свойствами. В продольной же волне колебания совершаются вдоль направления распространения волны aa' и ее свойства по отношению к любой плоскости AB (рис. б), проведенной через направление ее распространения, одинаковы.



Свет, испускаемый большинством источников света, например, раскаленными твердыми телами, непосредственно не обнаруживает таких свойств, которые выявляли бы поперечный характер его колебаний. Поперечность световых колебаний удается обнаружить лишь после того, как свет испытывает некоторые изменения, например отражение от границы прозрачной среды. Пусть луч отражается от стеклянной плоской поверхности 1 под некоторым углом (например, $56,5^\circ$), а затем вторично отражается от другой стеклянной плоской поверхности 2 под тем же углом (рис. а). При поворачивании поверхности 2 около оси, совпадающей по направлению с падающим на нее лучом (рис. б), угол падения остается неизменным, а меняется лишь положение плоскости падения света на поверхность 2 по отношению к плоскости падения на поверхность 1. Опыт показывает, что интенсивность



изменения, например отражение от границы прозрачной среды. Пусть луч отражается от стеклянной плоской поверхности 1 под некоторым углом (например, $56,5^\circ$), а затем вторично отражается от другой стеклянной плоской поверхности 2 под тем же углом (рис. а). При поворачивании поверхности 2 около оси, совпадающей по направлению с падающим на нее лучом (рис. б), угол падения остается неизменным, а меняется лишь положение плоскости падения света на поверхность 2 по отношению к плоскости падения на поверхность 1. Опыт показывает, что интенсивность

луча, отраженного от поверхности 2, зависит от относительного положения обеих плоскостей падения: отраженный луч имеет максимальную интенсивность, когда плоскости падения параллельны друг другу (рис. а), и минимальную интенсивность, когда они взаимно перпендикулярны (рис. б).

Таким образом, после первого отражения свет стал обнаруживать зависимость интенсивности отраженных лучей от ориентации плоскости падения. Свет, обладающий таким свойством, носит название поляризованного света.

При определенном значении угла падения луч вовсе не отражается от второй пластинки, если плоскости падения на обе пластинки взаимно перпендикулярны. В этом случае свет называется полностью поляризованным. По закону, открытому Брюстером, свет полностью поляризуется при угле падения i (на рисунке этот угол есть $56,5^\circ$), удовлетворяющем условию:

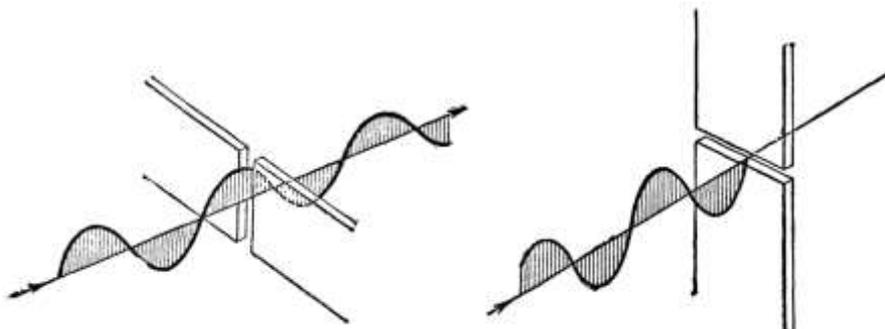
$$\operatorname{tgi} = n,$$

где n – коэффициент преломления вещества, от поверхности которого происходит отражение. Условно считать свет, отраженный от прозрачной поверхности под углом, удовлетворяющим закону Брюстера, поляризованным в плоскости падения. Введя такое понятие о плоскости поляризации, можно сказать: поляризованные лучи отражаются с максимальной интенсивностью, когда плоскость поляризации совпадает с плоскостью падения; они вовсе не отражаются, когда плоскость поляризации перпендикулярна к плоскости падения.

Приведем сначала механическую аналогию данного явления. Волны, бегущие по веревке, раскачиваемой в вертикальной плоскости, будут свободно проходить сквозь вертикальную щель между двумя досками.

Если же мы повернем щель на 90° , то этим приостановим колебания, т. е. как бы потушим их.

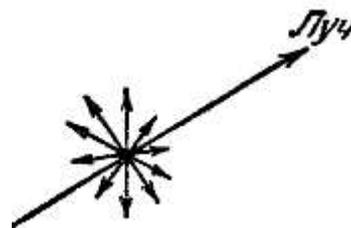
В случае световых колебаний оказывается возможным создавать подобие такой щели (стеклянное зеркало и служит такой



«щелью»), пропускающей световые колебания, лежащие только в определенной плоскости. Если угол между этой «щелью» и плоскостью

световых колебаний равен 90° , то она задержит свет полностью. Другими словами, расположенные перпендикулярно друг другу зеркала аналогичны скрещенным щелям.

Указанные факты легко истолковываются, если допустить поперечность световых волн. В световых волнах, испускаемых большинством источников света, колебания не упорядочены – они совершаются в различных направлениях, перпендикулярных к лучу (см. рис.). Свет, представляющий собою такие колебания, называется естественным. В частично поляризованном свете колебания совершаются преимущественно в одной плоскости; в полностью поляризованном свете колебания совершаются только в одной определенной плоскости. Интенсивность, с которой отражаются волны от границы прозрачного вещества, зависит от того, какой угол составляет плоскость колебаний с плоскостью падения.



Получать поляризованный свет можно не только при отражении, но и при прохождении сквозь некоторые кристаллы. Например, пластинки, вырезанные определенным образом из кристалла турмалина, пропускают световые колебания только одного направления, гася все остальные.

Все приборы, дающие поляризованный свет, носят название поляризаторов. В случае плоского зеркала мы видели, что те же приборы могут служить и для обнаружения поляризации света. В этом последнем случае их называют анализаторами.

Релятивистская механика

1905 г. А.Эйнштейн создал СТО, которая представляет собой физическую теорию пространства и времени для случая пренебрежимо слабых гравитационных полей.

1. Принцип относительности Эйнштейна: не только механические, но и любые другие эксперименты (оптические, электрические, магнитные) не могут отличить одну ИСО от другой. Уравнения, выражающие законы природы, инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца

2. Принцип постоянства скорости света- скорость света в вакууме не зависит от движения источников света и одинакова (инвариантна) во всех ИСО.

В СТО преобразования Галилея заменяются на более общие преобразования
Лоренца:

i_1

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = \frac{t' + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

показывающие связь между координатами движущейся (x' , y' , z') и неподвижной (x , y , z) систем отсчета (v – относительная скорость систем вдоль оси x).

Механику, в которой необходимо учитывать наличие предельной скорости c , называют **релятивистской**.

Важные следствия СТО: относительность одновременности событий в разных системах отсчета, изменение длины тел в различных инерциальных системах, замедление хода движущихся часов рассмотрим на практических занятиях

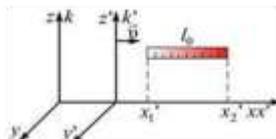
Следствия из преобразований Лоренца

1. Изменение длины движущегося тела

Пусть стержень покоится в системе K' , которая движется относительно системы K со скоростью V .
Длина стержня в системе K'

$$\ell_0 = x_2' - x_1' = \frac{x_2 - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{x_1 - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{\ell}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$



- **Лоренцево сокращение** означает, что длина стержня в системе отсчета, которая движется со скоростью V , меньше, чем длина неподвижного стержня.
- В направлении движения **линейные размеры тела сокращаются** тем больше, чем больше скорость движения.
- Поперечные размеры тела не изменяются.



Промежуток времени между событиями

- Пусть в системе K' в некоторой точке x' произошли два последовательных события в моменты времени t_1' и t_2' .
- **Собственное время** - промежуток между этими двумя событиями $\tau_0 = t_2' - t_1'$
- Промежуток времени между этими же **событиями** в системе K $\tau = t_2 - t_1$

$$\tau = \frac{t_2' - \frac{V}{c^2} x_0'}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{t_1' - \frac{V}{c^2} x_0'}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Время замедляется в движущейся СО

1. $V=0,8c = 240\,000 \text{ км/с}$ $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} = \frac{\tau_0}{0,6}$

2. Нестабильные частицы – мюоны, рождаются на высоте 20-30 км. Собственное время – время распада на позитрон (e^+) и 2 нейтрино составляет $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$

Т.о. расстояние $S_0 = c\tau_0 \approx 660 \text{ м}$

Закон сложения скоростей в СТО

$$V_x' = \frac{x'}{t'}$$

$$V_x = \frac{x}{t} = \frac{x' + Vt'}{t' + \frac{V}{c^2}x'} = \frac{V_x' + V}{1 + \frac{V_x'V}{c^2}}$$

При $V < c$, закон сложения в СТО переходит в закон сложения Галилея

Релятивистские энергия и импульс

Из соображений размерности и инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца были найдены выражения для релятивистской энергии

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

и импульса частицы

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

В предельном случае при $v \ll c$, следует классическое выражение $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.

а при $v = 0$ вытекает, что $E_0 = mc^2$

Таким образом, свободная частица обладает в состоянии покоя запасом энергии $E_0 = mc^2$, эту величину часто называют энергией покоя.

В релятивистском случае также имеет место выполнение законов сохранения энергии и импульса

Релятивистский импульс и энергия

$$\vec{p} = \frac{m \vec{V}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

E – полная энергия,

E_0 – энергия покоя

$$E_0 = mc^2$$

$$E_k = E - E_0 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - mc^2$$

Кинетическая энергия

- Законы ньютоновской механики не допускают существование частиц с нулевой массой.
- В релятивистской механике частица с $m=0$ может обладать отличными от нуля импульсом и энергией, если $V=c$
- К числу частиц с $m=0$ принадлежит световая частица – фотон.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Что называют интерференцией света?
2. Какие волны называют когерентными?
3. Сформулируйте условие максимумов и минимумов интерференции.
4. Что такое оптический и геометрический путь света?
5. Как объяснить цвета тонких пленок?
6. Что называют дифракцией света? При каких условиях она наблюдается?
7. Объясните дифракцию на круглом отверстии.
8. Объясните дифракцию на одной щели.
9. Какой свет называют естественным? поляризованным?
10. Сформулируйте закон Брюстера.

11. Какие способы получения поляризованного света вам известны?
12. Что называют дисперсией света?
13. Что такое спектр?
14. Сформулируйте постулаты специальной теории относительности.
15. Что такое релятивистская энергия и импульс?

Лекция 6

Предмет и задачи квантовой физики. Квантовая гипотеза Планка. Внешний фотоэлектрический эффект.

Тепловое излучение — излучение, испускаемое нагретыми телами. Тепловое излучение, являясь самым распространенным в природе, совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества, т. е. за счет его внутренней энергии. Оно возникает не только при высокой температуре, а свойственно всем телам при температуре выше 0 К.

Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. При высоких температурах излучаются короткие электромагнитные волны, при низких — преимущественно длинные. Естественно, что каждое тело не только излучает, но и поглощает излучение.

Тепловое излучение является равновесным, т.е. через какое-то время тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать — наступит тепловое равновесие, определяемое законом сохранения энергии.

Чтобы количественно охарактеризовать способность тела излучать при данной температуре T , **вводят спектральную плотность энергетической светимости**:

$$R_{\lambda,T} = \frac{\Delta W_{\lambda,\lambda+\Delta\lambda}^{\text{изл}}}{\Delta\lambda}$$

— величину, определяемую энергией электромагнитного излучения за 1 с (мощность излучения) с 1 м² поверхности тела при данной длине волны.

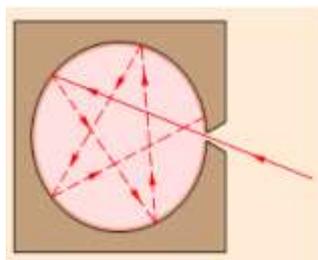
Единица спектральной плотности энергетической светимости — ватт на квадратный метр (Вт/м²).

Способность тела поглощать падающее на него излучение характеризуют *спектральной поглощательной способностью* $A_{\lambda,T}$ показывающей какая доля энергии, приносимая за 1 с на 1 м² площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами определенной длины, поглощается телом; $A_{\lambda,T}$ - величина безразмерная.

Такие тела, как сажа, бархат, черная бумага, хорошо поглощают свет. Тело, которое способно полностью поглощать все падающее на него излучение любой длины волны при любой температуре, называют *черным*• черным тела $A_{\lambda,T} = 1$.

В природе а.ч.т. не существует, но есть близкие им по свойствам (сажа, черный бархат). Моделью а.ч.т. служит полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена.

Луч света, попадая через отверстие внутрь полости, многократно отражается, в результате свет внутри полости практически полностью поглощается, и отверстие снаружи кажется черным (рис. 272).



Примером служат открытые окна домов, рассматриваемые с улицы. Так как размеры окон обычно гораздо меньше размеров комнаты, то даже при солнечном освещении с улицы окна домов кажутся черными.

При изучении теплового излучения вводят *энергетическую светимость*, равную сумме спектральных плотностей энергетической светимости *по всей совокупности длин волн*.

Тепловое излучение подчиняется закону Кирхгофа (1859 г.).

Закон Кирхгофа: отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел универсальной функцией длины волны (частоты) и температуры.

$$\frac{R_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}$$

Для черного тела $A_{\lambda,T} = 1$ поэтому из закона Кирхгофа следует, что для черного тела $R_{\lambda,T} = r_{\lambda,T}$. Следовательно, *универсальная функция Кирхгофа есть плотность энергетической светимости черного тела*.

Закон Стефана-Больцмана

Экспериментально зависимость энергетической светимости R_e абсолютно чёрного тела от температуры была установлена Стефаном, а теоретически – Больцманом, которая получило название **закона Стефана-Больцмана**:

$$R_e = \sigma T^4$$

энергетическая светимость абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана не даёт ответа относительно распределения энергии излучения абсолютно чёрного тела по спектру.

Законы Вина

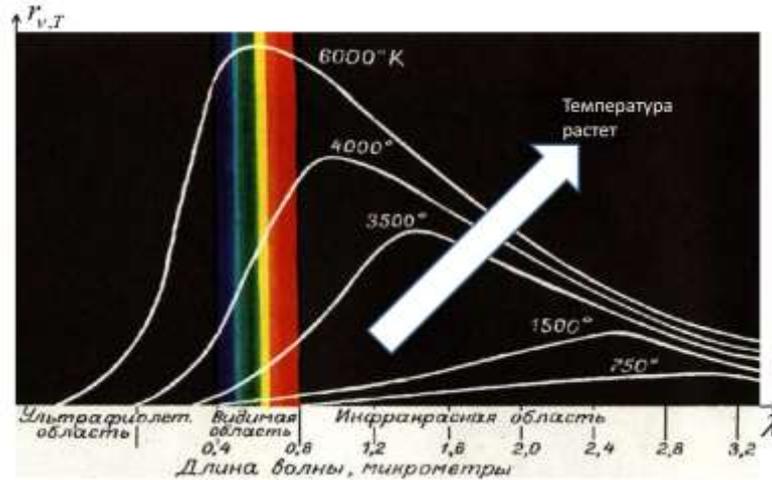
Вин в 1893 году показал, что чем выше температура источника излучения, тем на более коротковолновый участок спектра приходится максимум энергии теплового излучения тела.

Этот закон получил название **закон смещения Вина**:

длина волны, на которую приходится максимум теплового излучения абсолютно чётного тела λ_{\max} , обратно пропорциональна его абсолютной температуре.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

Где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная Вина.



На рис. в качестве примера приведена качественная зависимость спектральной плотности энергетической светимости черного тела от длины волны λ при различных температурах.

Площадь, ограниченная каждой кривой и осью абсцисс, определяет полную энергию, которая переносится волнами всех длин, излучаемую с 1 м^2 поверхности черного тела за 1 с, т. е. энергетическую светимость R_e черного тела. Из рисунка следует, что эта площадь увеличивается с повышением температуры, что естественно, так как энергетическая светимость R_e черного тела пропорциональна T^4 .

Из рис также следует, что все кривые проходят через максимум, причем с увеличением температуры, как это и определяется законом Вина, максимумы функции $r_{\nu,T}$ смещаются в сторону коротких длин волн.

Наглядным примером, подтверждающим уменьшение λ_{\max} с ростом температуры тела, является постепенное изменение цвета свечения нагреваемого металла от красного при невысоких температурах, до белого при высоких.

Гипотеза Планка. Фотоны

Законы теплового излучения черного тела не смогли количественно описать спектральный состав излучения черного тела. Попытки найти на основе классических приближений теоретическую зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны были не только неудачными, но и привели к результатам, которые противоречили фундаментальному закону сохранения энергии.

В 1900 г. немецкий физик М. Планк предположил следующее: *энергия испускается телом не непрерывно, как это предполагалось в классической физике, а отдельными дискретными порциями – квантами, энергия E которых пропорциональна частоте колебаний:*

$$E = h\nu.$$

Здесь $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, или квант действия.

Любое тело состоит из большого числа атомов. Каждый из атомов излучает электромагнитные волны. Согласно гипотезе Планка, энергия атома может изменяться лишь определенными порциями – квантами, кратными некоторой энергии, т. е. принимать значения $E, 2E, 3E, \dots, nE$.

Зная постоянную Планка, можно найти кванты энергии для колебаний с различными частотами. Эта энергия очень мала. Даже для частоты 10^{10} Гц она равна $h\nu = 6,62 \cdot 10^{-24}$ Дж, так что с макроскопической точки зрения энергия колебаний представляется изменяющейся непрерывно. Однако в микромире, где приходится иметь дело с малыми величинами, эти энергии оказываются весьма заметными.

Развитие гипотезы Планка привело к созданию представлений о квантовых свойствах света. Кванты света получили название **фотоны**. Согласно закону пропорциональности массы и энергии и гипотезе Планка, **энергия фотона** определяется по формулам

$$E = mc^2, \quad E = h\nu.$$

Приравняв правые части уравнений, получим выражение для **массы фотона**:

$$m = \frac{h\nu}{c^2},$$

или, учитывая, что $c = \lambda\nu$,

$$m = \frac{h}{c\lambda}.$$

Импульс фотона – это произведение его массы на скорость: $p = mc$. С

учетом выражения для массы фотона получим $p = \frac{h\nu}{c}$, или

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Масса покоя фотона равна нулю. Квант электромагнитного излучения распространяется со скоростью света, обладая при этом

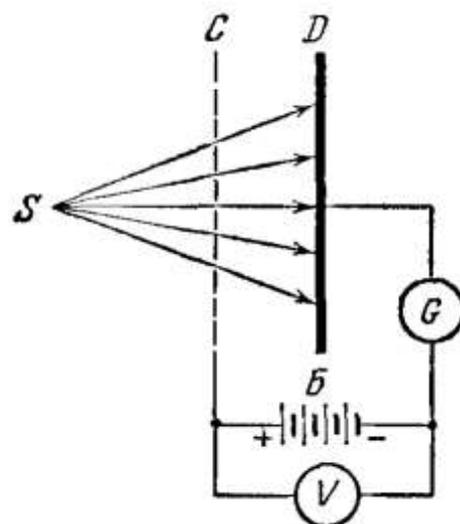
конечными значениями энергии и импульса. В монохроматическом свете с частотой ν все фотоны имеют одинаковую энергию, импульс и массу.

Фотоэффект

Квантовая гипотеза Планка и изучение фотоэлектрического эффекта явились основанием для создания квантовой теории света.

Фотоэлектрический эффект – вырывание электронов из атомов или молекул вещества под действием света (излучения) – впервые был обнаружен Г. Герцем, а исследован А. Г. Столетовым.

На рисунке представлена схема опытов Столетова. В электрическую сеть включался конденсатор, положительной обкладкой которого была медная сетка C , а отрицательной цинковая пластина D . Когда от источника света S лучи направлялись на отрицательно заряженную пластину D , в цепи возникал электрический ток. Когда пластина D заряжалась положительно, а сетка C отрицательно, гальванометр G не обнаруживал электрического тока.



Опыты Столетова доказали, что под действием света металл теряет отрицательно заряженные частицы. В дальнейшем измерения удельного заряда этих частиц показали, что они представляют собой электроны.

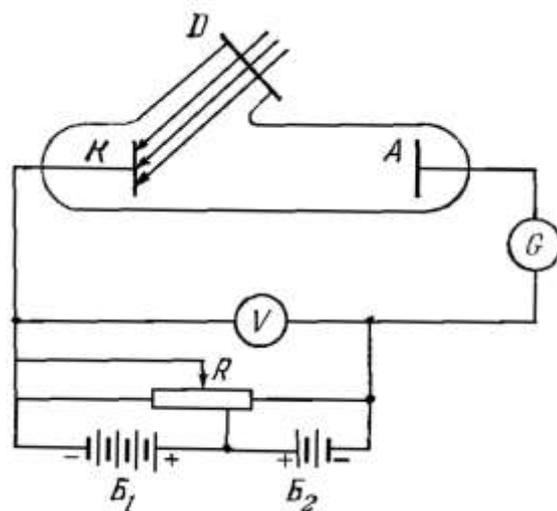
Явление вырывания электронов из твердых и жидких тел под действием света называется внешним фотоэлектрическим эффектом (или просто фотоэффектом). Электрический ток, возникший в цепи при освещении пластины D , называется фототоком.

Явление фотоэффекта можно попытаться объяснить с точки зрения электромагнитной теории света. Если считать, что электромагнитная волна падает на металл и «раскачивает» его электроны, то они, в конце концов, отрываются от металла. Однако в этом случае из теории вынужденных колебаний следует, что чем больше амплитуда световой волны, тем больше будет скорость вылетевшего электрона. За счет этой энергии электрон сможет преодолеть силы, удерживающие его внутри металла, и покинуть металл. Тогда следует считать, что скорость электронов, покинувших металл, и их кинетическая энергия должны зависеть от амплитуды колебаний вектора

напряженности электрического поля в электромагнитной волне, т. е. от интенсивности волны. Опыты не подтвердили этого.

Величина фототока зависит от числа электронов, которые под действием света вылетают из металла за единицу времени. Они называются фотоэлектронами. Опыты показали, что фототок зависит от химической природы металла и состояния его поверхности. Малейшие загрязнения поверхности изменяют условия вылета электронов из металла и изменяют величину фототока.

Для изучения фотоэффекта используется трубка, изображенная на рисунке. Катод K покрывается металлом, фотоэффект с которого изучается. Через окошко, закрытое кварцевым стеклом D , ультрафиолетовые лучи падают на катод и вызывают фотоэффект на его поверхности. Электроны, вылетевшие из катода, ускоряются электрическим полем, действующим между катодом и анодом A . Напряжение U между катодом и анодом регулируется потенциометром R и измеряется вольтметром V . Две батареи B_1 и B_2 включены навстречу друг другу и позволяют с помощью потенциометра изменять не только абсолютную величину, но и знак напряжения U . При некотором достаточном ускоряющем напряжении U все фотоэлектроны, вылетевшие из катода, достигнут анода. При этом гальванометр G измерит наибольший ток, который возможен при данном освещении и данной температуре катода. Его величина определяется числом электронов, которые вылетели за единицу времени с поверхности катода. Такой фототок называется фототоком насыщения и является основной количественной характеристикой фотоэффекта.



Электроны, которые вылетают из катода, имеют некоторую кинетическую энергию. Это позволяет им совершать работу против сил задерживающего электрического поля при отрицательном напряжении между катодом и анодом. Поэтому электроны могут и в этом случае достигнуть анода, и фототок будет наблюдаться.

Если v – начальная скорость электрона с массой m , то его кинетическая энергия будет $\frac{mv^2}{2}$. За счет этой энергии электрон может преодолеть

тормозящее электрическое поле. Если $(-U_0)$ – наибольшее тормозящее напряжение в трубке, при котором еще наблюдается фотоэффект, то, очевидно,

$$\frac{mv^2}{2} = eU_0.$$

При $U > U_0$ фототок будет отсутствовать. С увеличением напряжения фототок I постепенно возрастает, так как все большее число электронов достигает анода. Наибольшее значение величины фототока будет фототоком насыщения $I_{нас}$. Он соответствует таким значениям U , при которых, как указано выше, все электроны, выбиваемые из катода, достигают анода:

$$I_{нас} = en,$$

где n – число электронов, вылетающих из катода за единицу времени.

Опытным путем установлены три закона фотоэффекта:

1) Начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

2) Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. такая наименьшая частота света ν_k , при которой еще возможен внешний фотоэффект.

3) Число фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени (фототок насыщения), прямо пропорционально интенсивности света.

Заметим, что первый и второй законы фотоэффекта находятся в противоречии с тем объяснением явления фотоэффекта, которое вытекает из электромагнитной теории света.

Трудности в объяснении законов фотоэффекта на основе волновой теории света были преодолены Эйнштейном на основе его квантовой теории света.

Известно, что для выхода из металла электрон должен преодолеть потенциальный барьер на границе металл вакуум. Для этого электрон должен совершить работу выхода A . Рассмотрим поглощение фотона электроном металла. В результате поглощения фотона его энергия $h\nu$ целиком будет передана электрону. Если $h\nu \geq A$, то электрон сможет совершить работу выхода и вырваться из металла. Кинетическую энергию, которую сможет приобрести фотоэлектрон, можно найти по закону сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A.$$

Данное уравнение называется **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**. Его можно переписать иначе:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Энергия поглощенного фотона расходуется на совершение электроном работы выхода и приобретение им кинетической энергии.

Уравнения Эйнштейна правильно объясняют все законы фотоэффекта. Так, из этих уравнений следует, что кинетическая энергия фотоэлектрона, а, следовательно, и его начальная скорость зависят от частоты света ν и работы выхода A , но не зависят от интенсивности света. Это есть первый закон фотоэффекта. Далее, из тех же уравнений следует, что фотоэффект возможен лишь при условии, что $h\nu \geq A$. Энергии фотона должно, по меньшей мере, хватить на то, чтобы оторвать электрон от металла и не сообщить ему кинетической энергии ($v = 0$). Обозначив через ν_k наименьшую частоту света, при которой возможен фотоэффект (красная граница фотоэффекта)

$$h\nu_k = A$$

или

$$\nu_k = \frac{A}{h}.$$

Красная граница фотоэффекта зависит только от величины работы выхода электрона, т. е. от химической природы металла и состояния его поверхности. Таким образом объясняется второй закон фотоэффекта.

Наконец, общее число n фотоэлектронов, покидающих за единицу времени поверхность металла, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за это же время на поверхность, т. е. интенсивности света.

Внутренний фотоэффект.

Внутренний фотоэффект в кристаллических полупроводниках и некоторых диэлектриках состоит в том, что под действием света электропроводимость этих веществ увеличивается за счет возрастания в них числа свободных носителей тока — электронов проводимости и дырок.

Явление внутреннего фотоэффекта часто называют **фотопроводимостью**.

Механизм фотопроводимости объясняется следующим образом. При освещении поверхности полупроводника фотон, поглощенный в полупроводнике, отдает энергию валентным электронам. Если энергия

фотона больше ширины запрещенной зоны, то электрон переходит в зону проводимости и становится электроном проводимости, а в заполненной зоне образуется дырка. Образовавшаяся дырка может быть заполнена одним из ближайших соседних электронов, но тогда освободится место, которое только что занимал электрон, т.е. появится новая дырка, и т.д. В возникшем процессе электрон будет перемещаться против направления электрического поля, а свободное место, заполняемое электронами, — дырка — перемещается им навстречу по направлению поля. В электрических и магнитных полях дырка ведет себя аналогично положительному заряду, величина которого равна заряду электрона. Таким образом, один поглощенный фотон освобождает пару электрон-дырка, при освещении полупроводника увеличивается количество носителей тока, увеличивается ток при неизменном напряжении, что эквивалентно уменьшению сопротивления.

При освещении светом, для которого $h\nu < \Delta E$, фотоэффект не возникает.

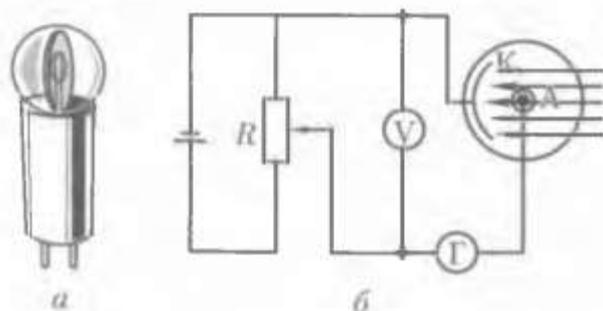
Фотоэлементы

1) С внешним фотоэффектом.

2) Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом

С внешним фотоэффектом

Широкое применение в технике получили фотоэлементы — приборы, действие которых основано на использовании фотоэффекта. К ним относятся *вакуумные фотоэлементы, практически не обладающие инерционностью, и газонаполненные фотоэлементы, обладающие большой инерционностью и большой чувствительностью.* На рис.



показаны внешний вид и схема фотоэлемента, состоящего из стеклянной или кварцевой колбы, внутренняя часть поверхности которой покрыта слоем светочувствительного металла К. В качестве светочувствительного слоя, как правило, используются щелочные металлы, имеющие малую работу выхода. Воздух из колбы тщательно удален.

Внутри колбы имеется металлическое кольцо (или сетка) А. Как от светочувствительного слоя, так и от кольца наружу сделаны выводы, с помощью которых фотоэлемент присоединяется к батарее так, чтобы металлический слой был катодом, а кольцо — анодом. В цепь включен также гальванометр Г для измерения тока. Свет, попадая на катод, выбивает из него электроны, которые летят к аноду. В цепи идет фототок, обнаруживаемый гальванометром. Применяемые в настоящее время фотоэлементы реагируют не только на видимый свет, но даже на инфракрасные лучи.

Чувствительность вакуумных фотоэлементов невелика (не превышает нескольких десятков микроампер на люмен), т.е. ток в цепи вакуумного фотоэлемента мал. Для усиления тока (повышения чувствительности) в колбу вводится разреженный газ. В газонаполненных фотоэлементах электроны, вырываемые светом из катода, при достаточных напряжениях между катодом и анодом приобретают такую скорость, что оказываются в состоянии ионизовать частицы газа, наполняющего фотоэлемент; возникает ударная ионизация. Образовавшиеся при этом ионы, в свою очередь, приходят в движение и ионизуют нейтральные частицы газа; в результате к аноду устремляется всевозрастающая лавина электронов, фототок значительно увеличивается, чувствительность фотоэлемента растет.

Основное техническое применение фотоэлементы находят в фототелеграфии (передача изображения на расстояние по проводам), в телевидении и звуковом кино. Кроме того, фотоэлементы широко применяются в фотореле, с помощью которых автоматически приводят в действие самые разнообразные механизмы. В фотореле использована безынерционность фотоэффекта, т.е. способность фотоэлемента практически мгновенно реагировать на световое воздействие или его изменение. Фотореле может работать либо при попадании света на элемент, либо при прекращении освещения фотоэлемента.

Применения фотореле разнообразны. Фотореле могут в нужное время включать и выключать уличные фонари в городах, свет маяков и бакенов, сортировать различные детали по цвету и форме, пускать в ход или останавливать электродвигатели, станки и т.д.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом.

К ним относят **фотосопротивления и вентильные фотоэлементы.**

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом *обладают значительно большей инерционностью* по сравнению с фотоэлементами, основанными на внешнем фотоэффекте.

Фотосопротивлениями называют полупроводниковые приборы, сопротивление которых зависит от интенсивности падающего на них света.

Принцип действия фотосопротивления заключается в следующем. В освещенном фотосопротивлении в слое полупроводника образуются дополнительные свободные электроны и дырки. В связи с этим его проводимость увеличивается, ток в цепи (его называют световым) тоже увеличивается.

Фотосопротивления широко применяются в звуковом кино, телевидении, автоматике, телемеханике, для сигнализации.

Вентильные фотоэлементы, т. е. элементы с запирающим слоем. Вентильный эффект возникает в тех полупроводниках, у которых между металлом и полупроводником или между полупроводниками *p*- и *n*-типа вблизи поверхности контакта создается запирающий слой, обладающий односторонней проводимостью

В результате внутреннего фотоэффекта при освещении происходит нарушение равновесного распределения носителей тока в области контакта, изменяется по сравнению с равновесной контактная разность потенциалов, т. е. возникает фотоэлектродвижущая сила. Возникающая ЭДС пропорциональна световому потоку.

Корпускулярно-волновая природа света

С конца XVII в. существовали две теории света — корпускулярная и волновая. Опыты Юнга, Френеля и теория Максвелла (XIX в.), казалось бы, приводили к единственному выводу: **свет — это электромагнитная волна.**

Однако из представлений Эйнштейна, опытов Комптона, а также других исследований вроде бы однозначно следовало, что **свет — это поток фотонов (квантов) — частиц**, обладающих энергией и импульсом.

Возник естественный вопрос — какой теории следует отдать предпочтение?

Свет обнаруживает единство непрерывных (волновых) и дискретных (квантовых) свойств

Кроме того, дальнейшие исследования привели к выводу, что эти казалось бы, взаимоисключающие свойства (непрерывность и дискретность) не следует противопоставлять друг другу. Свет *одновременно* обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Двойственная корпускулярно-волновая природа света, так называемый *корпускулярно-волновой дуализм свойств света* находит отражение в формулах, связывающих корпускулярные свойства электромагнитного излучения (энергия и импульс) с волновыми характеристиками (частота или длина волны):

$$E = h\nu,$$

$$p = h\nu/c = h/\lambda$$

Согласно формулам чем больше длина волны, *тем* меньше энергия и импульс фотона т. е. труднее обнаружить квантовые свойства света. Наоборот, чем длина волны меньше, тем больше энергия и импульс фотона, т. е. труднее *обнаружить* волновые свойства света-

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Что означает равновесность теплового излучения?
2. Что называют черным телом? Почему это понятие является физической абстракцией?
3. Приведите примеры моделей черного тела.
4. В двух одинаковых медных чайниках — один закопченный, другой чистый — содержится равное количество горячей воды. Который из чайников остынет быстрее? Почему?
5. На двух стеклышках — одно синее, другое красное — прикреплены одинаковые кусочки воска. От какого из них воск отпадет быстрее, если стекла поместить одновременно под электрическую лампу? Почему?
6. Почему открытые окна домов в солнечную погоду со стороны улицы кажутся черными?
7. Запишите формулу Планка, пояснив смысл его квантовой гипотезы.
8. Запишите формулу для импульса фотона; энергии фотона.
9. Каковы основные характеристики фотона? Которые из них определяют его волновые свойства? корпускулярные свойства?
10. Назовите виды фотоэффекта и дайте их определения.
11. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
12. От чего зависит сила фототока?
13. Как по задерживающему напряжению определить максимальную скорость фотоэлектронов?
14. От чего зависит (не зависит) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов?
15. Чем определяется красная граница фотоэффекта?
16. Сформулировав и записав уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, объясните на его основе законы фотоэффекта.
17. В чем заключается безынерционность фотоэффекта? Как объяснить это свойство?

18. Интенсивность света, падающего на фотокатод, уменьшилась. Что можно сказать о скорости фотоэлектронов? силе фототока?
19. Что такое красная граница фотоэффекта?
20. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм свойств света?
21. В каких явлениях проявляются волновые свойства света?
22. В каких явлениях проявляются квантовые свойства света?

Лекция 7 Физика атома

Введение в физику атома и атомного ядра

Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества возникло еще в античные времена, но только в XVIII в., трудами А. Лавуазье', М. В. Ломоносова^o и других ученых была доказана реальность существования атомов. Но вопрос об их внутреннем устройстве даже не возникал, и атомы по-прежнему считались неделимыми частицами. В XIX в. изучение атомистического строения вещества существенно продвинулось вперед. В 1833 г. при исследовании явления электролиза М. Фарадей' установил, что ток в растворе электролита это упорядоченное движение заряженных частиц — ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом. Его приближенное значение оказалось равным $e = 1,6 \times 10^{19}$ М.

На основании исследований Фарадея можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

Большую роль в развитии атомистической теории сыграл выдающийся русский химик Д. И. Менделеев⁴, разработавший в 1869 г. периодическую систему элементов, в которой впервые был поставлен вопрос о единой природе атомов.

В начале XIX в. были открыты дискретные спектральные линии в излучении атомов водорода в видимой части спектра. Впоследствии, в 1885 г. И. Бальмером были установлены математические закономерности, связывающие длины волн этих линий.

В 1896 г. А. Беккерель обнаружил явление испускания атомами невидимых проникающих излучений, названное *радиоактивностью*. В последующие годы явление радиоактивности изучалось многими учеными (М. Склодовская-Кюри, П. Кюри, Э. Резерфорд и др.). Было обнаружено, что атомы радиоактивных веществ испускают три вида излучений различной физической природы (альфа-, бета- и гамма-лучи). Альфа-лучи оказались потоком ионов гелия, бета-лучи — потоком электронов, а гамма-лучи — потоком квантов жесткого рентгеновского излучения.

В 1897 году Дж. Томсон" открыл электрон и измерил отношение e/m заряда электрона к массе. Опыты Томсона подтвердили вывод о том, что электроны входят в состав атомов.

В декабре 1938 года их физики О. Ган¹ и Фриц Штрассман^{1o} впервые в мире осуществили искусственное расщепление ядра атома урана.

24 апреля в 1939 г. нацистская Германия приступила к созданию атомного оружия как победу в войне.

17 сентября 1943 г. в США приступили к проекту Манхэттен по созданию атомной бомбы под руководством Р. Опенгеймера.

29 августа 1949 года первая советская атомная бомба, разработанная под руководством ученого, была взорвана на Семипалатинском полигоне. Под руководством И. В. Курчатова" в 1946 году был запущен второй в мире и первый в Европе атомный реактор. Он послужил своеобразной экспериментальной площадкой, на базе которой получили массу интересных результатов, которые в дальнейшем применялись в развитии ядерной физики.

XX век принес много неожиданностей и вряд ли сегодня мы можем предсказать, что готовит нам век XXI.

Модели атомов .

К началу XX в. основе изучения электрических явлений и радиоактивности считалось доказанным, что:

- 1) внутри атома заключены электроны;
- 2) силы взаимодействия атомов и молекул имеют электрическое происхождение;

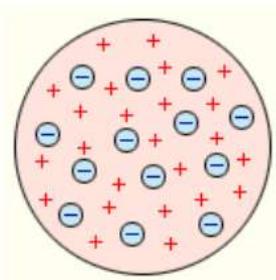
3) существует сходство в материальной основе атомов такое, что атом одного элемента может превращаться в атом другого элемента.

Оставалось, однако, неясным, какую роль играет во внутреннем строении атома положительное электричество.

В 1904 г. Появились первые публикации о строении атома. Одна из моделей атома была предложена Дж. Томсоном.

Дж. Томсон считал, что атом представляет собой электронейтральную систему шарообразной формы радиусом, примерно равным 10^{-10} м.

Положительный заряд атома равномерно распределен по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него



Модель атома Дж. Томсона

Для объяснения линейчатых спектров испускания атомов Томсон пытался определить расположение электронов в атоме и рассчитать частоты их колебаний около положений равновесия. Однако эти попытки не увенчались успехом.

В 1911 г. из опытов Резерфорда обнаружилось, что теория Томсона в самом существенном пункте неверна, а именно ошибочным оказалось

предположение, что положительное электричество распределено равномерно по объему атома.

Резерфорд предложил применить зондирование атома с помощью альфа-частиц, которые возникают при радиоактивном распаде радия и некоторых других элементов. Масса — частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду. В своих опытах Резерфорд использовал альфа-частицы с кинетической энергией около 5 МэВ (скорость таких частиц очень велика — порядка 10^7 м/с, но все же значительно меньше скорости света), альфа-частицы — полностью ионизированные атомы гелия. Они были открыты Резерфордом в 1899 г. при изучении явления радиоактивности. Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию альфа-частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения альфа-частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома.

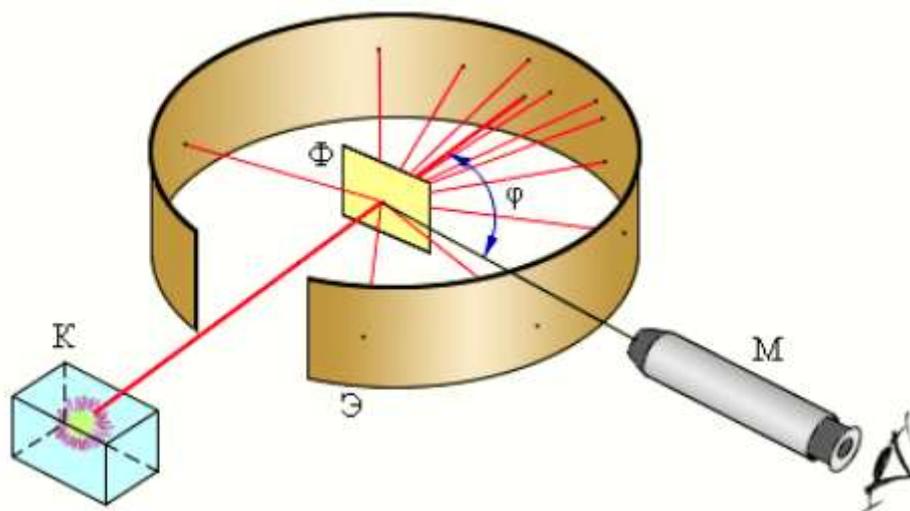
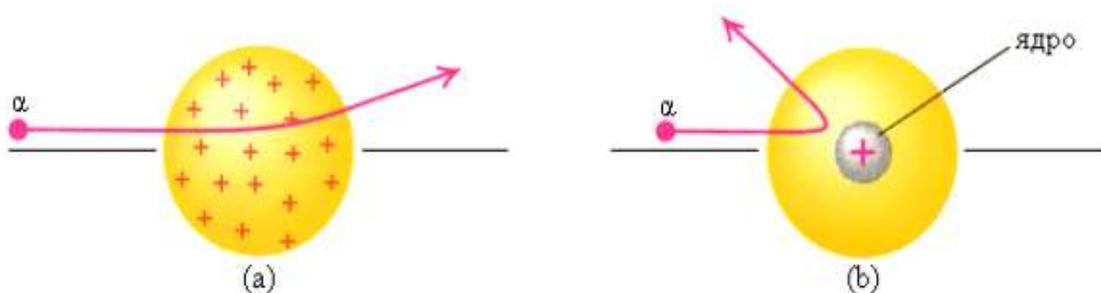


Схема опыта Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. К— свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э—экран, покрытый сернистым цинком, Ф— золотая фольга, М— микроскоп.

От радиоактивного источника, заключенного в свинцовый контейнер, альфа-частицы направлялись на тонкую металлическую фольгу. Рассеянные частицы попадали на экран, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц. Сцинтилляции (вспышки) на экране наблюдались глазом с помощью микроскопа. Наблюдения рассеянных альфа-частиц в опыте Резерфорда можно было проводить под различными углами φ к первоначальному направлению пучка. Было обнаружено, что большинство альфа-частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие 30° . Очень редкие альфа-

частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к 180° .

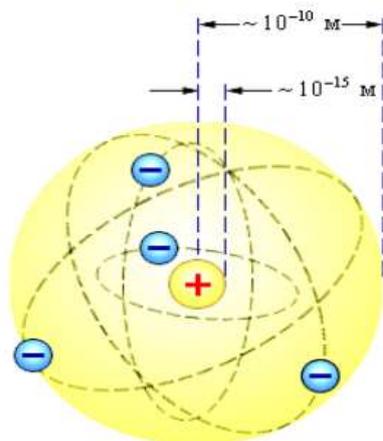
Полученный результат противоречил экспериментам Дж. Томсона. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить альфа-частицы назад. Электрическое поле однородного заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля по мере приближения к центру шара. Если бы радиус шара, в котором сосредоточен весь положительный заряд атома, уменьшился в n раз, то максимальная сила отталкивания, действующая на альфа-частицу, по закону Кулона возросла бы в n^2 раз. Следовательно, при достаточно большом значении n альфа-частицы могли бы испытать рассеяние на большие углы вплоть до 180° . Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его положительный заряд сосредоточен в малом объеме. Эту часть атома Резерфорд назвал атомным ядром.



Рассеяние альфа-частицы в атоме Томсона (a) и в атоме Резерфорда (b).

На основании результатов этих опытов Резерфордом была предложена ядерная модель атома (*планетарную модель атома*). Согласно этой модели, в ядре атома – малой по сравнению с объемом всего атома области с линейными размерами $10^{-15} - 10^{-14}$ м – сосредоточен весь его положительный заряд и практически вся масса атома. Вокруг ядра в области с линейными размерами $\sim 10^{-10}$ м движутся электроны, масса которых составляет лишь весьма малую долю массы ядра.

Статическая ядерная модель атома, в которой электроны были бы неподвижны, физически бессмысленна. В результате действия кулоновских сил притяжения электроны сразу же упали бы на ядро. Чтобы этого не произошло, электроны должны двигаться около ядра по орбитам, зависящим от энергии электронов



Планетарная модель атома Резерфорда. Показаны круговые орбиты четырех электронов

Попытка применения классической электродинамики к ядерной модели атома привело к полному противоречию с экспериментальными фактами. Согласно классической теории, должны иметь место:

- а) непрерывная потеря электроном энергии в виде излучения электромагнитных волн и неустойчивость атома;
- б) существование только непрерывного спектра. Спектральных линий существовать не должно.

В действительности оказывается, что:

- а) атом является устойчивой системой;
- б) атом излучает энергию лишь при определенных условиях;
- в) излучение атома имеет линейчатый спектр.

Модель атома водорода по Бору

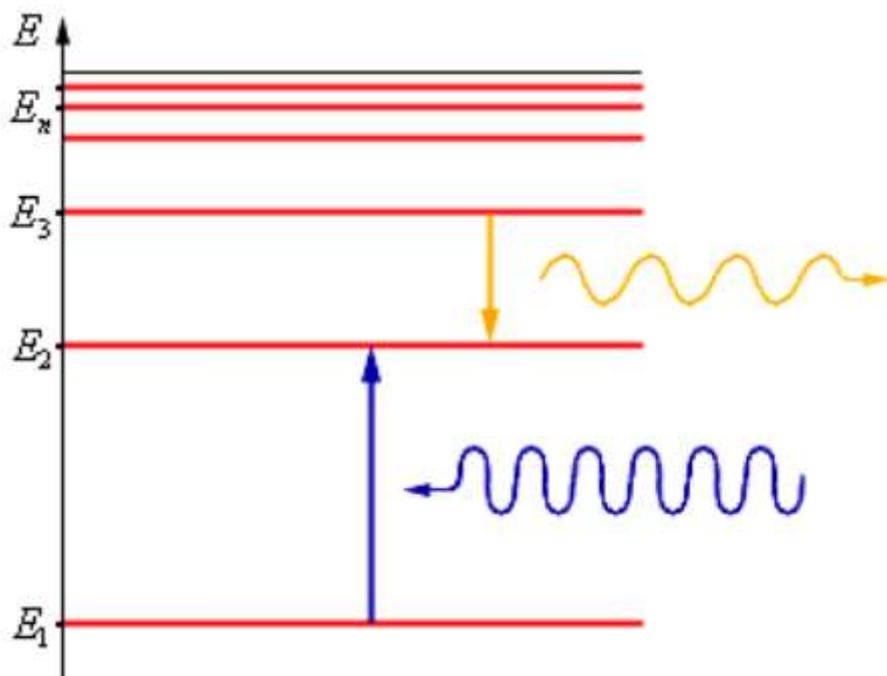
Правильный вывод из затруднений теории был сделан в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором. Бор предположил, что обычные законы электродинамики неприменимы к внутриатомным процессам, и показал, что внутриатомные процессы подчинены законам теории квантов, выдвинутой еще в 1900 г. Планком.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.

Сформулированный постулат противоречит классической механике (согласно которой энергия движущегося электрона может быть любой) и электродинамикой (так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн).

Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой **энергетических уровней**, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию. Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положительно заряженного ядра,

отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии $E_n < 0$. При $E_n \geq 0$ электрон удаляется от ядра, т.е. происходит ионизация. Величина $|E_1|$ называется **энергией ионизации**. Состояние с энергией E_1 называется **основным состоянием атома**.



Энергетические уровни атома и условное изображение процессов поглощения и испускания фотонов.

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

где h – постоянная Планка ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж · с).

Второй постулат Бора также противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучения определяется только изменением энергии атома и никак не зависит от характера движения электрона.

Теория Бора при описании поведения атомных систем не отвергла полностью законы классической физики. В ней сохранились представления об орбитальном движении электронов в кулоновском поле ядра. Исходя из этого теорию Бора иногда называют **полуклассической**.

Простейший из атомов, атом водорода явился своеобразным тестобъектом для **теории Бора**. Ко времени создания теории он был хорошо изучен экспериментально. Было известно, что он содержит единственный электрон. Ядром атома является **протон** – положительно заряженная частица, заряд которой равен по модулю заряду электрона, а масса в 1836 раз превышает массу электрона. Еще в начале XIX в. были открыты дискретные спектральные линии в видимой области излучения атома водорода (так называемый **линейчатый спектр**). Впоследствии закономерности, которым подчиняются длины волн (или частоты) линейчатого спектра, были хорошо

изучены количественно (И. Бальмер, 1885 г.). Совокупность спектральных линий атома водорода в видимой части спектра была названа **серией Бальмера**. Позже аналогичные серии спектральных линий были обнаружены в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. В 1890 г. Й. Ридберг получил эмпирическую формулу для частот спектральных линий:

$$\nu_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где R – постоянная Ридберга ($R = 3,29 \times 10^{15} \text{ Гц}$)

Для серии Бальмера $m = 2, n = 3, 4, 5, \dots$. Для ультрафиолетовой серии (серия Лаймана) $m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$

Правило квантования, приводящее к согласующимся с опытом значениям энергий стационарных состояний атома водорода, Бором было угадано. Он предположил, что момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка. Для круговых орбит правило квантования Бора записывается в виде:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \text{ где } n=1; 2; 3; \dots$$

Здесь m – масса электрона, v – скорость электрона, r – радиус его орбиты, h – постоянная Планка.

С помощью данных постулатов нетрудно найти круговые стационарные орбиты водородоподобного атома и соответствующие энергии. В атоме водорода электрон с зарядом e вращается вокруг ядра с зарядом e . Масса ядра много больше массы электрона. Поэтому ядро можно считать неподвижным, а электрон – движущимся вокруг ядра по окружности радиуса r .

Центростремительное ускорение электрона создается его кулоновым притяжением к ядру:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

отсюда

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

т. е. при движении электрона по орбите кинетическая энергия $E_k = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ электрона по абсолютной величине равна половине его

потенциальной энергии $E_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ (по знаку эти энергии противоположны,

так как потенциальная энергия сил притяжения отрицательна).

Последнее уравнение можно переписать в следующем виде:

$$mv^2 r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0};$$

сопоставляя это уравнение со вторым постулатом:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

получаем простое выражение для скорости v_n электрона на n -й стационарной орбите:

$$v_n = \frac{e^2}{2nh\epsilon_0}$$

и радиус стационарной орбиты:

$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi Z m e^2} n^2.$$

Радиус первой орбиты ($n = 1$) в атоме водорода ($Z = 1$) равен

$$a_0 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

и называется первым боровским радиусом.

Энергия E_n электрона, находящегося на n -й стационарной орбите, равна полной энергии электрона

$$E = E_k + E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r},$$

где под r следует понимать радиус r_n n -й орбиты. Следовательно,

$$E_n = -\frac{mZ^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}.$$

где целое число $n = 1, 2, 3, \dots$ называется в квантовой физике атома **главным квантовым числом**.

Состояние атома с наименьшей энергией ($n = 1$) называется основным.

Согласно второму постулату Бора, при переходе электрона с одной стационарной орбиты с энергией E_n на другую стационарную орбиту с энергией $E_m < E_n$ атом испускает квант света, частота ν_{nm} которого равна

$$\Delta E_{nm} / h.$$

Частота кванта, который излучается при переходе с орбиты n на орбиту m , может быть найдена по формуле:

$$\nu_{nm} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Эта формула в точности совпадает с эмпирической формулой Ридберга для спектральных серий атома водорода, если положить постоянную R

$$R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 3,29 \times 10^{15} \text{ Гц}$$

равной:

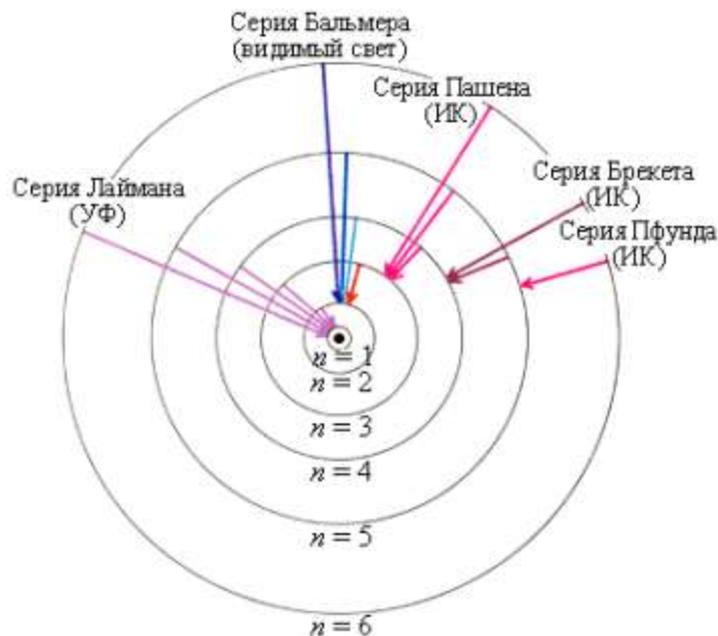
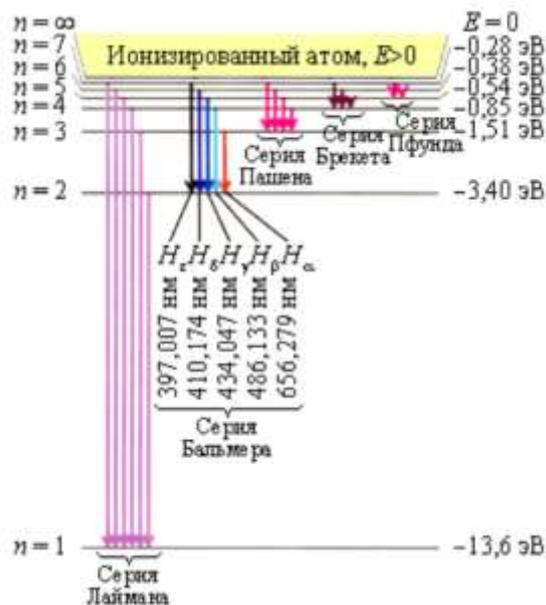


Рисунок иллюстрирует образование спектральных серий в излучении атома водорода при переходе электрона с высоких стационарных орбит на более низкие.

Диаграмма энергетических уровней атома водорода с указанием переходов, соответствующих различным спектральным сериям имеет вид:



Боровская теория атома подходит только для атома водорода Бор не смог дать физическую интерпретацию правилу квантования.

Позже де Бройль на основе представлений о волновых свойствах частиц предложил, что каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по окружности около ядра атома. Стационарная орбита возникает в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра. Другими словами, стационарная орбита соответствует круговой стоячей волне де Бройля на длине орбиты (рис. 1.3.3).

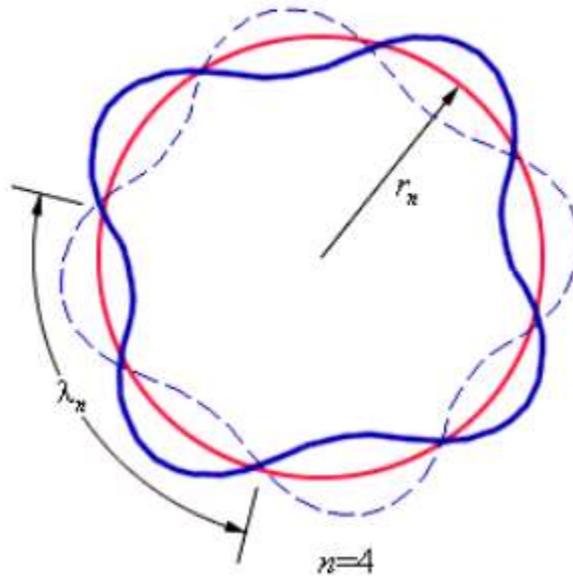


Иллюстрация идеи де Бройля возникновения стоячих волн на стационарной орбите для случая $n = 4$.

Это явление очень похоже на стационарную картину стоячих волн в струне с закрепленными концами.

В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн λ , т.е:

$$n\lambda_n = 2\pi r_n$$

Соотношение длину волны де Бройля $\lambda = h/p$, где $p = m_e v$ – импульс электрона, получим:

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

Боровское правило квантования связано с волновыми свойствами электронов.

Атомы – это квантовые системы, а энергетические уровни стационарных состояний атомов дискретны.

Дискретность энергетических состояний атома была продемонстрирована в 1913 г., в опыте Д. Франка и Г. Герца, в котором исследовалось столкновение электронов с атомами ртути. Оказалось, что если энергия электронов меньше 4,9 эВ, то их столкновение с атомами ртути происходит по закону абсолютно упругого удара. Если же энергия электронов равна 4,9 эВ, то столкновение с атомами ртути приобретает характер неупругого удара, т.е. в результате столкновения с неподвижными атомами ртути электроны полностью теряют свою кинетическую энергию. Это означает, что атомы ртути поглощают энергию электрона и переходят из основного состояния в первое возбужденное состояние: $E_2 - E_1 = 4,9 \text{ эВ}$.

Согласно боровской концепции, при обратном самопроизвольном переходе атома ртути должна испускать кванты с частотой:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = 1,2 \times 10^{15} \text{ Гц}$$

Спектральная линия с такой частотой действительно была обнаружена в ультрафиолетовой части спектра излучения атомов ртути.

Представление о дискретных состояниях противоречит классической физике.

Квантовая физика не отменила фундаментальных классических законов сохранения энергии, импульса, электрического заряда и т.д. Согласно сформулированному Н. Бором *принципу соответствия*, квантовая физика включает в себя законы классической физики, и при определенных условиях можно обнаружить плавный переход от квантовых представлений к классическим. Это можно видеть на примере энергетического спектра атома водорода. При больших квантовых числах $n \gg 1$ дискретные уровни постепенно сближаются, и возникает плавный переход в область непрерывного спектра, вытекающего из классической физики.

Лазеры

Лазеры или *оптические квантовые генераторы* – современные источники когерентного излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств.

К настоящему времени создано большое количество лазеров с различными характеристиками – газовых, твердотельных, полупроводниковых, излучающих свет в различных оптических диапазонах. Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до 10^{12} – 10^{13} Вт (в импульсном режиме). Лазеры находят широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту и т.д.

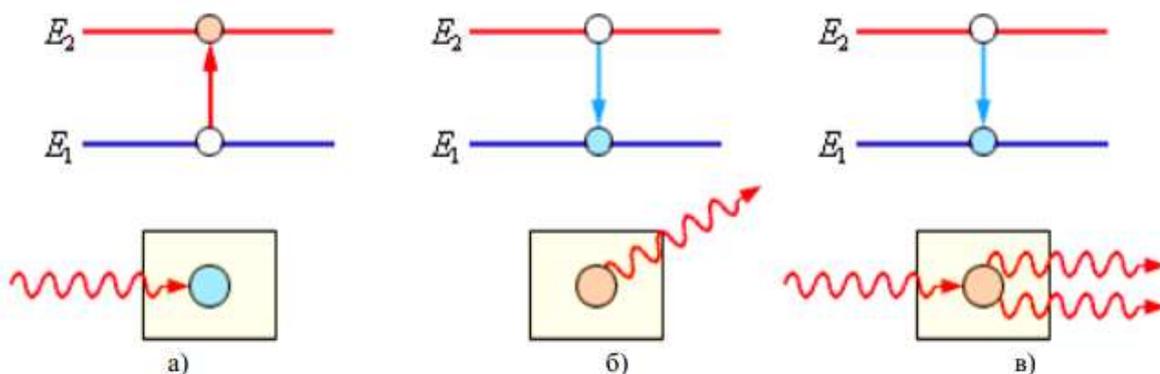
Одним из важнейших свойств лазерного излучения является чрезвычайно высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении нелазерных источников. Это и все другие уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества. Атом может находиться в различных энергетических состояниях с энергиями E_1 , E_2 и т.д. В теории Бора эти состояния называются стабильными. На самом деле стабильным состоянием, в котором атом в отсутствие внешних возмущений может находиться бесконечно долго, является только состояние с наименьшей энергией. Это состояние называют основным. Все другие состояния нестабильны. Возбужденный атом может пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка 10^{-8} с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант

света, частоту которого можно определить из второго постулата Бора. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называют *спонтанным*. На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно большее время, порядка 10^{-3} с. Такие уровни называются *метастабильными*.

Переход атома в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях. Переходы между энергетическими уровнями атома не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом может приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с другими атомами или столкновений с электронами. Такие переходы называются *безизлучательными*.

В 1916 г. А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют *вынужденным* или *индуцированным*.

Индукцированное излучение является физической основой работы лазеров. На рисунке схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта света.



Условное изображение процессов (а) поглощения, (б) спонтанного испускания и (в) индуцированного испускания кванта.

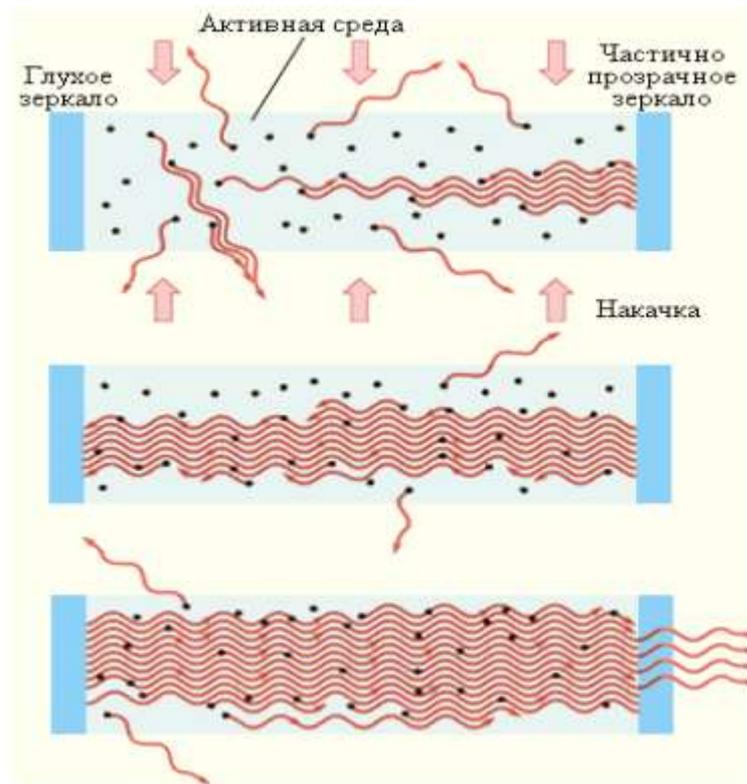
Рассмотрим слой прозрачного вещества, атомы которого могут находиться в состояниях с энергиями E_1 и $E_2 > E_1$. Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода $\nu = \Delta E/h$. Согласно распределению Больцмана, при термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через n_1 и $n_2 < n_1$. При распространении

резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображенные на рисунке выше. Эйнштейн показал, что процесс (а) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (в) индуцированного испускания кванта возбужденным атомом имеют одинаковые вероятности. Так как $n_2 < n_1$ поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате прошедшее через слой вещества излучение будет ослабляться.

Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых $n_2 > n_1$, т.е. создать **инверсную населенность уровней**. Такая среда является термодинамически неравновесной. Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления впервые была высказана В. А. Фабрикантом²⁰ в 1940 г. В 1954 г. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них Ч. Таунс использовали явление индуцированного испускания для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1,27$ см.

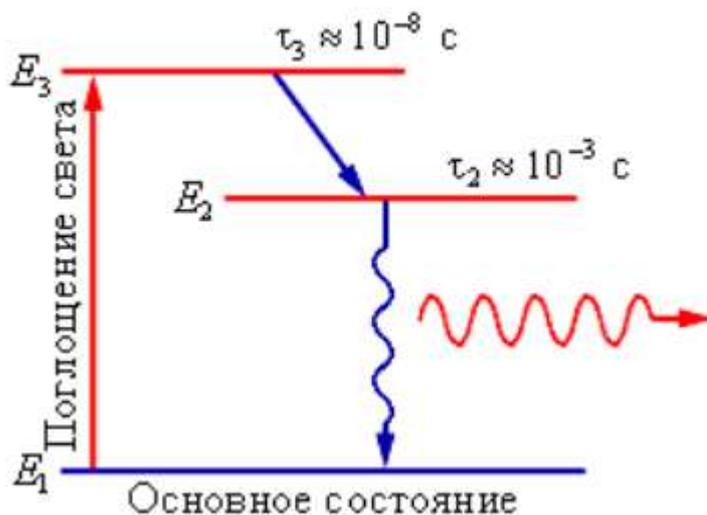
Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется **активной**. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Чтобы возникла генерация света, необходимо использовать **обратную связь**. Для этого активную среду нужно расположить между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет строго назад так, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней, которая называется накачкой.

Начало лавинообразному процессу в такой системе при определенных условиях может положить случайный спонтанный акт, при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы. Через некоторое время в такой системе возникает стационарный режим генерации. Это и есть лазер. Лазерное излучение выводится наружу через одно (или оба) из зеркал, обладающее частичной прозрачностью. На рисунке схематически представлено развитие лавинообразного процесса в лазере.



Развитие лавинообразного процесса генерации в лазере.

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка, атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы – накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. В рубиновом лазере накачка производится через выше расположенный третий уровень



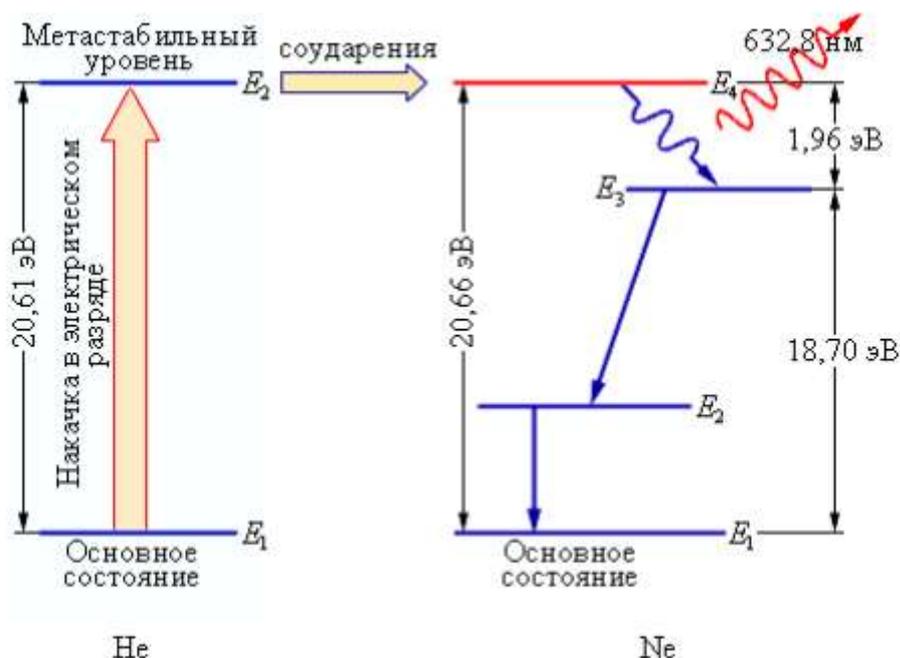
Трехуровневая схема оптической накачки. Указаны «времена жизни» уровней E_2 и E_3 . Уровень E_2 – метастабильный. Переход между уровнями E_3 и E_2 безызлучательный. Лазерный переход осуществляется между уровнями E_2 и E_1 . В кристалле рубина уровни E_1 , E_2 и E_3 принадлежат примесным атомам хрома.

После вспышки мощной лампы, расположенной рядом с рубиновым стержнем, многие атомы хрома, входящего в виде примеси в кристалл рубина (около 0,05%), переходят в состояние с энергией E_3 , а через промежуток $\tau \approx 10^{-8}$ с они переходят в состояние с энергией E_2 . Перенаселенность возбужденного уровня E_2 по сравнению с невозбужденным уровнем E_1 возникает из-за относительно большого времени жизни уровня E_2 .

Лазер на рубине работает в импульсном режиме на длине волны 694 нм (темно-вишневый свет), мощность излучения может достигать 10^6 – 10^9 Вт в импульсе. Исторически это был первый действующий лазер, построенный американским физиком Т. Майманом в 1960 г.

Одним из самых распространенных в настоящее время является газовый лазер на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка 10^2 Па при соотношении компонент He и Ne примерно 10:1. Активным газом, на котором в непрерывном режиме возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет), является неон. Гелий – буферный газ, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона. Излучение He – Ne лазера обладает исключительной, непревзойденной монохроматичностью.

Первый гелийнеоновый лазер был создан в 1961 г. На рисунке представлена упрощенная схема уровней гелия и неона и механизм создания инверсной населенности лазерного перехода.



Накачка лазерного перехода $E_4 \rightarrow E_3$ в неоне осуществляется следующим образом. В высоковольтном электрическом разряде вследствие соударений с электронами значительная часть атомов гелия переходит в верхнее метастабильное состояния E_2 . Возбужденные атомы гелия неупруго сталкиваются с атомами неона, находящимися в основном состоянии, и передают им свою энергию. Уровень E_4 неона расположен на 0,05 эВ выше метастабильного уровня E_2 гелия. Недостаток энергии компенсируется за

счет кинетической энергии соударяющихся атомов. На уровне E_4 неона возникает инверсная населенность по отношению к уровню E_3 , который сильно обедняется за счет спонтанных переходов на ниже расположенные уровни. При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия и неона начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов. Если кювета со смесью газов помещена между высокоотражающими зеркалами, то возникает лазерная генерация. На рис. изображена схема гелий-неонового лазера.

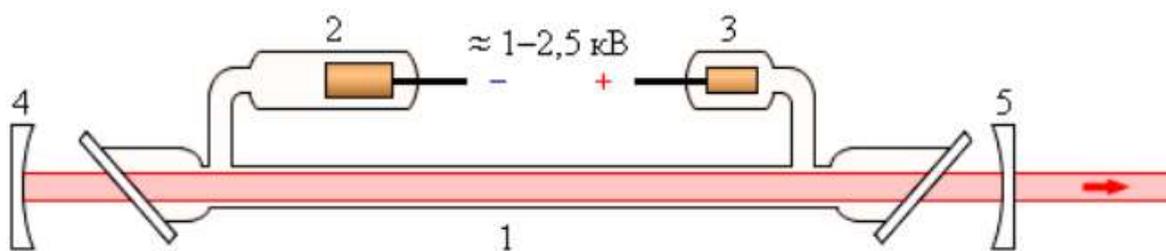


Схема гелий-неонового лазера: 1 – стеклянная кювета со смесью гелия и неона, в которой создается высоковольтный разряд; 2 – катод; 3 – анод; 4 – глухое сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1%; 5 – сферическое зеркало с пропусканием 1–2%.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Расскажите о закономерностях в атомных спектрах водорода.
2. Объясните обобщенную формулу Бальмера.
3. Что доказали опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц.
4. Сформулируйте постулаты Бора.
5. Объясните на основании теории Бора наличие линейчатых спектров у атома водорода.
6. В чем недостатки теории Бора?
7. Что такое квантовые генераторы. Где применяются лазеры?
8. Опишите принцип действия рубинового лазера. Охарактеризуйте основные особенности лазерного излучения.

Лекция 8

Состав и строение атомного ядра. Изотопы. Ядерные силы. Дефект массы и энергия связи ядра.

Состав и строение атомного ядра. Изотопы

К 20-м годам XX в. физики уже не сомневались в том, что атомные ядра, открытые Э. Резерфордом в 1911 г., также как и сами атомы, имеют сложную структуру. В этом их убеждали многочисленные экспериментальные факты, накопленные к этому времени: открытие радиоактивности, экспериментальное доказательство ядерной модели атома, измерение отношения e/m для электрона, альфа-частицы и для так называемой Н-частицы – ядра атома водорода, открытие искусственной радиоактивности и ядерных реакций, измерение зарядов атомных ядер и т.д.

Установлено, что атомные ядра различных элементов состоят из частиц двух видов – протонов и нейтронов.

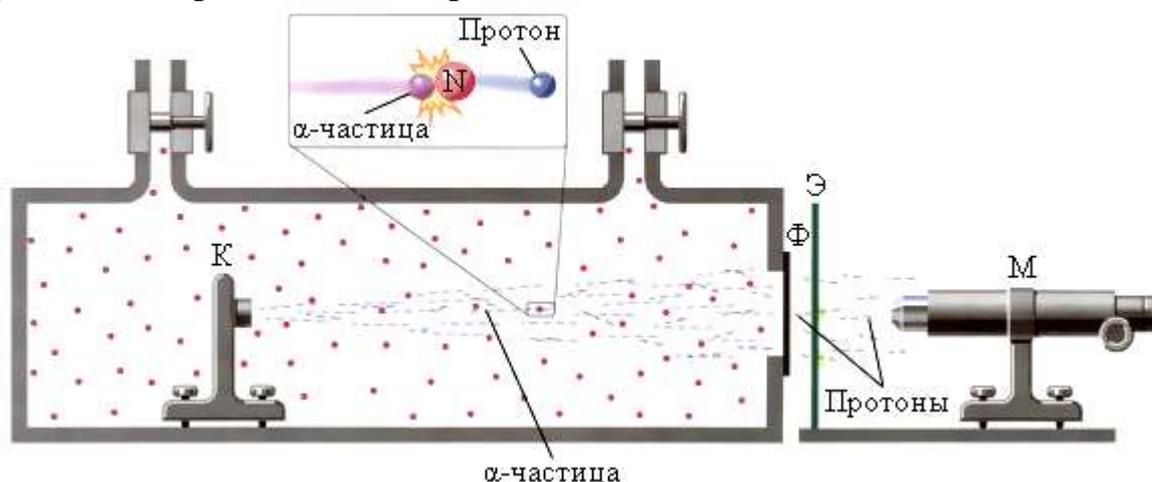


Схема опытов Резерфорда по обнаружению протонов в продуктах расщепления ядер. К – свинцовый контейнер с радиоактивным источником альфа-частиц, Ф – металлическая фольга, Э – экран, покрытый сульфидом цинка, М – микроскоп.

Первая из этих частиц представляет собой атом водорода, из которого удален единственный электрон. Эта частица наблюдалась уже в 1907 г. в опытах Дж. Томсона, которому удалось измерить у нее отношение e/m . В 1919 г. Э. Резерфорд обнаружил ядра атома водорода в продуктах расщепления ядер атомов многих элементов. Резерфорд назвал эту частицу протоном. Он высказал предположение, что протоны входят в состав всех атомных ядер.

Прибор Резерфорда состоял из вакуумированной камеры, в которой был расположен контейнер К с источником альфа-частиц. Окно камеры было закрыто металлической фольгой Ф, толщина которой была подобрана так, чтобы альфа-частицы не могли через нее проникнуть. За окном располагался экран Э, покрытый сернистым цинком. С помощью микроскопа М можно было наблюдать сцинтилляции (т.е. световые вспышки) в точках попадания на экран тяжелых заряженных частиц. При заполнении камеры азотом низкого давления на экране возникали световые вспышки, указывающие на появление потока каких-то частиц, способных проникать через фольгу Ф,

практически полностью задерживающую поток альфа-частиц. Отодвигая экран Э от окна камеры, Резерфорд измерил **среднюю длину свободного пробега** наблюдаемых частиц в воздухе. Она оказалась приблизительно равной 28 см, что совпадало с оценкой длины пробега Н-частиц, наблюдавшихся ранее Дж. Томсоном. Исследования действия на частицы, выбиваемые из ядер азота, электрических и магнитных полей показали, что эти частицы обладают положительным элементарным зарядом и их масса равна массе ядра атома водорода. Впоследствии опыт был выполнен с целым рядом других газообразных веществ. Во всех случаях было обнаружено, что из ядер этих веществ альфа-частицы выбивают Н-частицы или протоны.

По современным измерениям, положительный заряд протона в точности равен элементарному заряду $e = 1,60217733 \times 10^{-19}$ Кл, то есть равен по модулю отрицательному заряду электрона. В настоящее время равенство зарядов протона и электрона проверено с точностью 10^{-22} . Такое совпадение зарядов двух непохожих друг на друга частиц вызывает удивление и остается одной из фундаментальных загадок современной физики.

Масса протона, равна $m_p = 1,672 \times 10^{-27}$ кг. В ядерной физике массу частицы часто выражают в атомных единицах массы (а.е.м.), равной 1/12 массы атома углерода с массовым числом 12:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

Следовательно, $m_p = 1,007276$ а.е.м. Во многих случаях массу частицы удобно выражать в эквивалентных значениях энергии в соответствии с формулой $E = mc^2$. Так как $1 \text{ эВ} = 1,60218 \times 10^{-19}$ Дж, в энергетических единицах масса протона равна 938,272331 МэВ.

В опыте Резерфорда было открыто явление расщепления ядер азота и других элементов при ударах быстрых – частиц и показано, что *протоны входят в состав ядер атомов*.

После открытия протона было высказано предположение, что ядра атомов состоят из одних протонов. Однако это предположение оказалось несостоятельным, так как отношение заряда ядра к его массе не остается постоянным для разных ядер, как это было бы, если бы в состав ядер входили одни протоны. Для более тяжелых ядер это отношение оказывается меньше, чем для легких, т.е. при переходе к более тяжелым ядрам масса ядра растет быстрее, чем заряд.

В 1920 г. Резерфорд высказал гипотезу о существовании в составе ядер жестко связанной компактной протон-электронной пары, представляющей собой электрически нейтральное образование – частицу с массой, приблизительно равной массе протона. Он даже придумал название этой гипотетической частице – **нейтрон**. Это была очень красивая, но, как выяснилось впоследствии, ошибочная идея. Электрон не может входить в состав ядра. Квантово-механический расчет на основании соотношения неопределенностей показывает, что электрон, локализованный в ядре, т.е.

области размером $R \approx 10^{-13}$ см, должен обладать колоссальной кинетической энергией, на много порядков превосходящей энергию связи ядер в расчете на одну частицу. Однако идея о существовании тяжелой нейтральной частицы казалась Резерфорду настолько привлекательной, что он незамедлительно предложил группе своих учеников во главе с Дж. Чедвиком¹ заняться ее поиском. В 1932 г. Чедвик экспериментально исследовал излучение, возникающее при облучении бериллия альфа-частицами, и обнаружил, что это излучение представляет собой поток нейтральных частиц с массой, примерно равной массе протона. Так был открыт нейтрон. На рис. приведена упрощенная схема установки для обнаружения нейтронов.

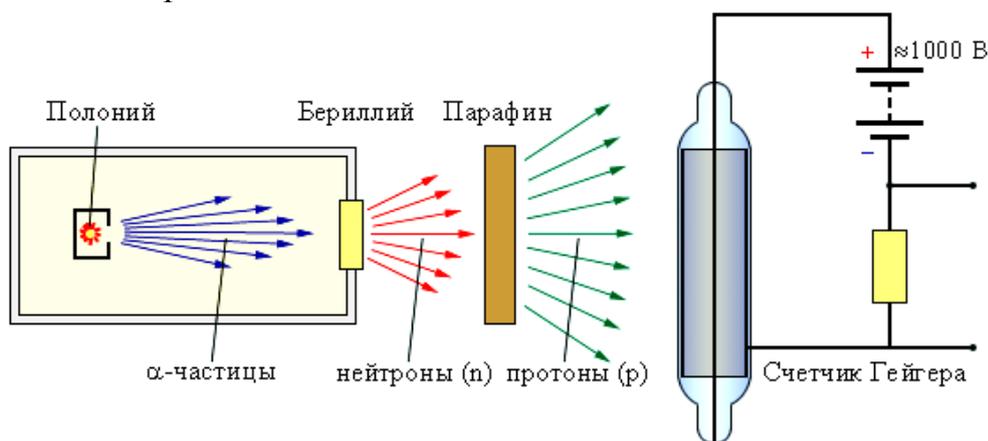


Схема установки для обнаружения нейтронов.

При бомбардировке бериллия альфа-частицами, испускаемыми радиоактивным полонием, возникает сильное проникающее излучение, способное преодолеть такую преграду, как слой свинца толщиной в 10 – 20 см. Это излучение почти одновременно с Чедвиком наблюдали супруги Ирен² и Фредерик Жолио-Кюри³, но они предположили, что это гамма-лучи большой энергии. Они обнаружили, что если на пути излучения бериллия поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко возрастает. Они доказали, что излучение бериллия выбивает из парафина протоны, которые в большом количестве имеются в этом водородосодержащем веществе. По длине свободного пробега протонов в воздухе они оценили энергию гамма-квантов, способных при столкновении сообщить протонам необходимую скорость. Она оказалась огромной – порядка 50 МэВ.

Дж. Чедвик в 1932 г. выполнил серию экспериментов по всестороннему изучению свойств излучения, возникающего при облучении бериллия альфа-частицами. В своих опытах использовал различные методы исследования ионизирующих излучений. На рисунке изображен **счетчик Гейгера**,

¹ Джеймс Чедвик (1891 – 1974) – английский физик, известный за открытие нейтрона и фотоядерной реакции.

² Ирен Жолио-Кюри (1897 – 1956) – французский физик, старшая дочь Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри, жена Фредерика Жолио-Кюри.

³ Фредерик Жолио-Кюри (до брака – Фредерик Жолио; 1900 – 1958) – французский физик и общественный деятель.

предназначенный для регистрации заряженных частиц. Он состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой нити, идущей вдоль оси трубки (анод). Трубка заполняется инертным газом (обычно аргоном) при низком давлении. Заряженная частица, пролетая в газе, вызывает ионизацию молекул. Появившиеся в результате ионизации свободные электроны ускоряются электрическим полем между анодом и катодом до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и через счетчик проходит короткий разрядный импульс тока. Другим важнейшим прибором для исследования частиц является так называемая **камера Вильсона**⁴, в которой быстрая заряженная частица оставляет след (трек). Траекторию частицы можно наблюдать непосредственно или фотографировать. Действие камеры Вильсона, созданной в 1912 г., основано на конденсации перенасыщенного пара на ионах, образующихся в рабочем объеме камеры вдоль траектории заряженной частицы. С помощью камеры Вильсона можно наблюдать искривление траектории заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.

Дж. Чедвик наблюдал в камере Вильсона треки ядер азота, испытавших столкновение с бериллиевым излучением. На основании этих опытов он сделал оценку энергии гамма-кванта, способного сообщить ядрам азота наблюдаемую в эксперименте скорость. Она оказалась равной 100 – 150 МэВ. Такой огромной энергией не могли обладать гамма-кванты, испущенные бериллием. На этом основании Чедвик заключил, что из бериллия под действием альфа-частиц вылетают не безмассовые гамма-кванты, а достаточно тяжелые частицы. Эти частицы обладали большой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ в счетчике Гейгера, следовательно, они были электронейтральны.

Нейтрон – элементарная частица. Ее не следует представлять в виде компактной протон-электронной пары, как первоначально предполагал Резерфорд.

Масса нейтрона $m_n = 1,675 \times 10^{-27}$ кг. В энергетических единицах масса нейтрона равна 939,56563 МэВ. Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона.

Сразу же после открытия нейтрона российский ученый Д. Д. Иваненко⁵ и немецкий физик В. Гейзенберг⁶ выдвинули гипотезу о **протонно-нейтронном** строении атомных ядер, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями. Протоны и нейтроны принято называть **нуклонами**.

Для характеристики атомных ядер вводится ряд обозначений. Число протонов, входящих в состав атомного ядра, обозначают символом Z и называют **зарядовым числом** или **атомным номером** (это порядковый

⁴ Чарлз Томсон Риз Вильсон (1869 – 1959) – шотландский физик

⁵ Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904 – 1994) – российский и советский физик-теоретик.

⁶ Вернер Карл Гейзенберг (1901 – 1976) – немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики.

номер в периодической таблице Менделеева). Заряд ядра равен Ze , где e – элементарный заряд. Число нейтронов обозначают символом N .

Общее число нуклонов (т.е. протонов и нейтронов) называют **массовым числом** A :

$$A = Z + N$$

Ядра химических элементов обозначают символом A_ZX , где X – химический символ элемента. Например, 1_1H – водород, 4_2He – гелий, ${}^{12}_6C$ – углерод, ${}^{16}_8O$ – кислород, ${}^{238}_{92}U$ – уран.

Ядра одного и того же химического элемента могут отличаться числом нейтронов. Такие ядра называются **изотопами**. У большинства химических элементов имеется несколько изотопов. Например, у водорода их три: 1_1H – обычный водород, 2_1H – дейтерий и 3_1H – тритий.

У углерода – 6 изотопов, у кислорода – 3. Химические элементы в природных условиях обычно представляют собой смесь изотопов. Существование изотопов определяет значение атомной массы природного элемента в периодической системе Менделеева.

Изотопы представляют собой ядра с одинаковым числом протонов Z . Для каждого химического элемента имеется постоянное процентное содержание различных изотопов. Поэтому каждый химический элемент имеет определенную атомную массу, представляющую собой среднее значение атомных масс всех его изотопов. Этим объясняется то, что атомные массы элементов в ряде случаев заметно отклоняются от целых чисел.

Ядра с одинаковым массовым числом A называются **изобарами**. Изобары большей частью встречаются среди тяжелых ядер, причем парами и триадами. В настоящее время известно 59 устойчивых изобарных пар и 5 изобарных триад. Примерами устойчивых изобарных пар являются аргон ${}^{40}_{18}Ar$ и кальций ${}^{40}_{20}Ca$, рутений ${}^{104}_{44}Ru$ и палладий ${}^{104}_{46}Pd$. Примером изобарной триады может служить цирконий ${}^{96}_{40}Zr$, молибден ${}^{96}_{42}Mo$ и рутений ${}^{96}_{44}Ru$. В качестве примера можно привести аргон ${}^{40}_{18}Ar$ и кальций ${}^{40}_{20}Ca$.

Ядра с одинаковым числом нейтронов $N = A - Z$ носят название **изотонов** (углерод ${}^{13}_6C$ и азот ${}^{14}_7N$). Наконец, существуют радиоактивные ядра с одинаковыми Z и A , отличающиеся периодом полураспада. Они называются **изомерами**. Например, имеется два изомера ядра брома ${}^{80}_{35}Br$, у одного из них период полураспада равен 18 мин, а у другого – 4,4 часа.

Радиус ядра довольно точно определяется формулой:

$$r = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{\frac{1}{3}} \text{ м.}$$

Из данного соотношения следует, что объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре.

Нуклоны ядер находятся в состояниях, существенно отличающихся от их свободных состояний. Это связано с тем, что во всех ядрах, кроме ядра обычного водорода, имеется, по крайней мере, не менее двух нуклонов, между которыми осуществляется особое ядерное взаимодействие.

Энергия связи

Наличие между нуклонами особого ядерного взаимодействия, имеющего характер сил притяжения, вытекает из того, что ядра, содержащие положительно заряженные протоны и нейтроны, лишенные заряда, представляют собой устойчивые образования.

Устойчивость атомных ядер означает, что между нуклонами в ядрах существует определенная связь. Изучение этой связи может быть проведено в известных пределах энергетическими методами без привлечения сведений о характере и свойствах ядерных сил. Такой подход, основанный на законе сохранения энергии, позволяет сделать ряд важных выводов о специфике связей, удерживающих нуклоны в ядре друг возле друга. Введем понятие об энергии связи отдельного нуклона в ядре. **Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления данного нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.** *Полная энергия связи ядра соответственно определяется той работой, которую нужно совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.* *Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра из составляющих его нуклонов должна выделяться та же энергия, которую необходимо затратить при расщеплении ядра на составляющие его частицы.* **Очевидно, что энергией связи атомного ядра можно назвать разность между суммарной энергией свободных нуклонов, составляющих данное ядро, и их энергией в ядре.**

Измерения масс ядер показывают, что масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов. Уменьшение суммарной массы нуклонов при образовании из них ядра можно объяснить выделением энергии связи при образовании ядра; **данное уменьшение, называемое дефектом массы, равно**

$$\Delta m = \frac{\Delta W_{св}}{c^2},$$

где $\Delta W_{св}$ – энергия, выделяющаяся при образовании ядра, c – скорость света в вакууме.

Если ядро с массой M образовано из Z протонов с массой m_p и из $A - Z$ нейтронов с массой m_n , то

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M .$$

Величина Δm служит мерой энергии связи:

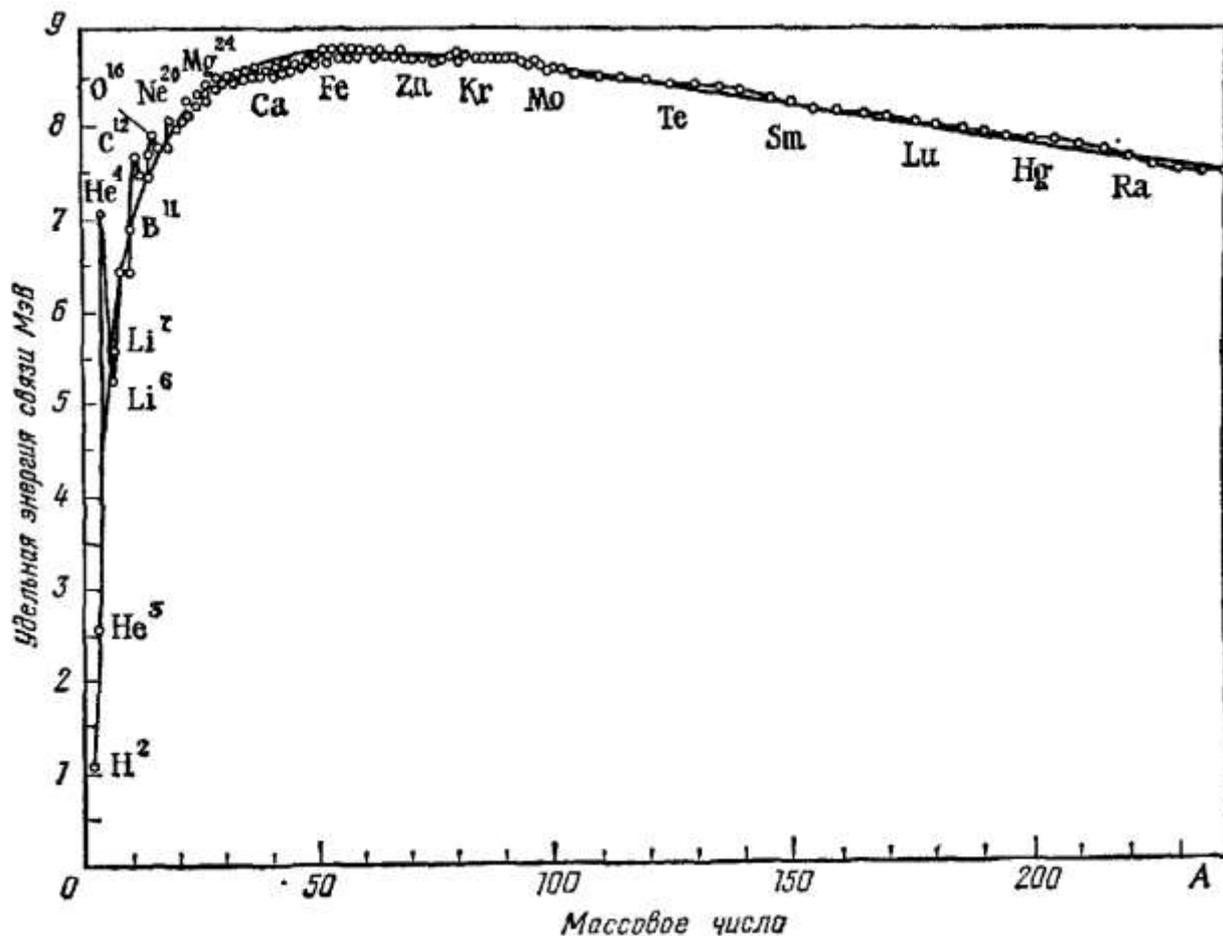
$$\Delta W_{св} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M]c^2 .$$

В ядерной физике для вычисления энергий применяется специальная единица – атомная единица энергии (а. е. э.), соответствующая одной атомной единице массы:

$$1 \text{ а. е. э.} = c^2 \cdot 1 \text{ а. е. м.} = 931,5016 \text{ МэВ},$$

так как $1 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

Таким образом, для получения энергии связи $\Delta W_{св}$ ядра в МэВ необходимо разность суммарной массы частиц в ядре и массы ядра (в а. е. м.) умножить на 931,5016.



Среднюю энергию связи, приходящуюся на один нуклон (удельную энергию связи), можно рассчитать по формуле

$$\Delta w_{св} = \frac{\Delta W_{св}}{A}.$$

На рисунке приведена кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа A . Кривая указывает на различие величины $\Delta w_{св}$ у разных ядер, т. е. на различие прочности связей нуклонов в ядрах в зависимости от массового числа. **Наиболее прочно связанными являются нуклоны в ядрах средней части периодической системы Менделеева, приблизительно при $28 < A < 138$, т. е. от кремния ${}_{14}^{28}\text{Si}$ до бария ${}_{56}^{138}\text{Ba}$.** В этих ядрах удельная энергия связи близка к 8,7 МэВ. По мере дальнейшего увеличения числа нуклонов в ядре удельная энергия связи убывает. Для ядер, расположенных в конце периодической системы (например, для урана), $\Delta w_{св} = 7,6$ МэВ. *Этот факт объясняет выделение энергии при делении тяжелых ядер.* Минимумы для энергии связи на один нуклон наблюдаются при небольших массовых числах.

Ядерные силы

Прочная связь, существующая между нуклонами в ядре, свидетельствует о наличии в атомных ядрах особых, так называемых ядерных сил. **Легко убедиться в том, что эти силы не сводятся ни к одному из типов сил, рассмотренных в предыдущих частях курса физики.** В самом деле, если предположить, например, что между нуклонами в ядрах действуют гравитационные силы, то легко подсчитать по известным массам протона и нейтрона, что энергия связи на одну частицу окажется ничтожной – она будет в 10^{38} раз меньше той, которая наблюдается экспериментально. Отпадает также и предположение об электрическом характере ядерных сил. Действительно, в этом случае невозможно представить себе устойчивого ядра, состоящего из одного заряженного протона и не имеющего заряда нейтрона. Между тем такое ядро существует у тяжелого водорода – дейтерия ${}^2_1\text{D}$. Это ядро – дейтрон – устойчивая система, состоящая из протона и нейтрона, с энергией связи около 2,2 МэВ.

Наконец, ядерные силы не могут быть и магнитного происхождения, несмотря на то, что и протон и нейтрон имеют магнитные моменты. Можно подсчитать, что энергия взаимодействия магнитных моментов протона и нейтрона составляет всего около 0,1 МэВ, что не идет ни в какое сравнение с действительной энергией связи в дейтроне.

Теоретические расчеты и опыты по рассеянию протонов на протонах показывают, что ядерные силы притяжения действуют лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами в ядре ($\sim 2,2 \cdot 10^{-15}$ м). Это дало основание называть **ядерные силы короткодействующими**. Расстояние $2,2 \cdot 10^{-15}$ м называется **радиусом действия ядерных сил**.

Особое значение для свойств ядерных сил имеет обнаруженная в них **зарядовая независимость**: *ядерные силы притяжения, действующие между двумя нуклонами, одинаковы независимо от того, в каком зарядовом состоянии, протонном или нуклонном, находятся взаимодействующие частицы*. Но ядерные силы зависят от ориентации спинов взаимодействующих между собой нуклонов.

Для ядерных сил характерна насыщенность, проявляющаяся в том, что каждый нуклон в ядре взаимодействует лишь с ограниченным числом ближайших к нему соседей-нуклонов. Насыщенность ядерных сил обнаруживает известное сходство этих сил с химическими силами, обладающими характерной для них особенностью – каждый атом в зависимости от своей валентности способен вступать в связь с ограниченным числом других атомов.

Наконец, необходимо отметить, что **ядерные силы не являются центральными силами**, т. е. такими, которые можно представить действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Ядерные частицы – нуклоны – являются источниками особого ядерного поля, характеризующего ядерные силы. Ядерное поле следует определить как особую форму материи, обуславливающую ядерные взаимодействия нуклонов. Квантами ядерного поля являются особые частицы – π -мезоны. В названии этих частиц подчеркивается, что масса их должна быть промежуточной между массами электрона и протона («мезо» – средний, промежуточный).

Ядерные силы имеют характер обменных сил. Другими словами, взаимодействие между двумя нуклонами в ядре осуществляется путем обмена третьей частицей – π -мезоном.

Вопросы для самоподготовки и повторения:

1. Дайте характеристику протону.
2. Дайте характеристику нейтрону..
3. Расскажите о модели ядра по Иваненко - Гейзенбергу.
4. Что называют массовым числом?

5. Что называют зарядовым числом ?
6. Что такое изотопы, изобары, изотоны?
7. Как определяют дефект массы и энергию связи ядра?
8. Назовите свойства ядерных сил

Лекция 9

Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Ядерные реакции, реакции деления и синтеза реакции

Радиоактивные излучения

Явлением естественной радиоактивности называется самопроизвольное превращение, одних атомных ядер в другие, сопровождающееся испусканием особого вида излучения – радиоактивного излучения и некоторых элементарных частиц. Вещества, испускающие новые излучения, называются радиоактивными.

Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

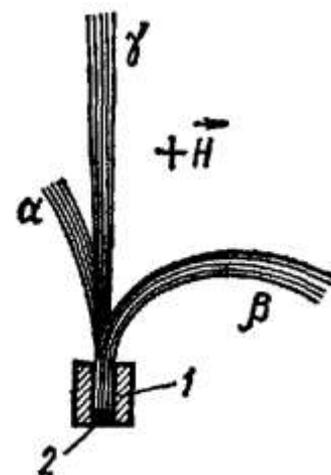
Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций

Излучение, испускаемое радиоактивными элементами, неоднородно – оно состоит из трех видов: α , β и γ . Анализ состава излучения был произведен по отклонению радиоактивных излучений в магнитном поле. На рисунке изображена схема разделения α -, β - и γ -лучей в магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости рисунка (1 – толстостенный сосуд из свинца, 2 – радиоактивный элемент Ra). Характер отклонения лучей в магнитном поле показывает, что α -лучи несут положительный заряд, β -лучи – отрицательный, а γ -лучи не заряжены.

Дальнейшие исследования показали, что α -лучи представляют собой поток ядер гелия. Эти лучи вызывают почернение фотопластинок, производят сильное ионизирующее действие при прохождении через газы и обладают относительно малой проникающей способностью.

β -лучи по своей природе оказались потоком быстро летящих электронов, скорость которых превышает скорости обычных катодных (электронных) лучей. Энергия β -частиц может достигать 10 МэВ, что соответствует их скорости, приближающейся к скорости света в вакууме.

Гамма-лучи представляют собой жесткое электромагнитное излучение, обладающее наибольшей из всех радиоактивных излучений проникающей способностью. Они вызывают относительно слабую ионизацию вещества, через которое они проходят. Также было установлено, что они отличаются



еще большими частотами, чем рентгеновские излучения. Это означает, что их квантовые свойства проявляются еще в большей степени, чем у рентгеновского излучения.

Опытным путем было установлено, что все радиоактивные излучения:

а) в той или иной степени обладают химическими действиями, в частности вызывают почернение фотопластинок;

б) вызывают ионизацию газов, а иногда и конденсированных тел, сквозь которые они проходят;

в) возбуждают флуоресцентное свечение ряда твердых тел и жидкостей.

Эти свойства лежат в основе экспериментальных методов обнаружения и исследования свойств радиоактивных излучений. Калориметрические исследования показали, что радиоактивные излучения могут сопровождаться выделением энергии.

Закон радиоактивного распада

При изучении явления радиоактивности оказалось, что протекание радиоактивных процессов во времени совершенно не зависит от внешних условий, а также от концентрации радиоактивных атомов. Наконец, было установлено, что распад, например, радия в солях RaCl_2 и RaBr_2 зависит лишь от числа атомов радия в этих соединениях, т. е. скорость процесса не зависит от того, распадается ли вещество в виде химически чистого элемента или соединения.

Перечисленные факты привели к выводу, что *радиоактивные превращения есть свойство атомных ядер, которые могут самопроизвольно подвергаться таким превращениям.*

Естественные радиоактивные превращения ядер, происходящие самопроизвольно, называют радиоактивным распадом или просто распадом. Атомное ядро, претерпевающее радиоактивный распад, называется материнским. Ядро, возникшее в результате распада, называется дочерним ядром. Ввиду самопроизвольности этого процесса естественно предположить, что число ядер ΔN , распадающихся за интервал времени от t до $t + \Delta t$, пропорционально промежутку времени Δt и числу N наличных ядер, еще не распавшихся к моменту времени t :

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t.$$

Здесь λ – постоянная величина, которую называют постоянной распада или радиоактивной постоянной. Из последнего соотношения следует, что

постоянная распада представляет собой относительную убыль числа ядер, подвергающихся распаду, за единицу времени.

Иными словами, постоянная распада характеризует долю ядер, распадающихся за единицу времени, т. е. определяет скорость радиоактивного распада. Ввиду самопроизвольного характера процесса распада λ не зависит от внешних условий, а определяется лишь внутренними свойствами ядра,

Если в начальный момент $t = 0$ первоначальное число ядер равно N_0 , то в момент времени t число оставшихся радиоактивных атомов

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Данное выражение называется законом радиоактивного распада.

Самопроизвольный характер радиоактивного распада означает, что различные атомные ядра, претерпевающие распад, имеют разную продолжительность жизни. Средняя продолжительность жизни всех первоначально существовавших ядер равна $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

Постоянная распада λ , выражаемая в с^{-1} является обратной величиной средней продолжительности жизни τ данного радиоактивного элемента.

Поэтому закон радиоактивного распада можно записать в виде

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Практически для характеристики устойчивости ядер относительно распада, для оценки продолжительности жизни данного радиоактивного изотопа вводится понятие о **периоде полураспада T** . Так называется время, в течение которого первоначальное количество ядер данного вещества распадается наполовину. Из определения T и последней

формулы следует, что $\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\frac{T}{\tau}}$. Отсюда получаем

$$T = \tau \ln 2 = 0,693\tau.$$

Период полураспада постоянен для данного изотопа. Периоды полураспада различных радиоактивных изотопов изменяются в очень широких пределах: от 4,56 млрд лет у урана до $1,5 \cdot 10^{-4}$ с у изотопа полония. Постоянство периода полураспада данных атомов изотопа подтверждает статистический характер радиоактивных превращений.

Правила смещения

Естественная радиоактивность наблюдается у ядер атомов тяжелых химических элементов, расположенных за свинцом в периодической таблице Менделеева. Естественная радиоактивность легких и средних ядер – сравнительно редкое явление, наблюдаемое у ядер ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{37}^{87}\text{Rb}$, ${}_{49}^{115}\text{In}$, ${}_{57}^{138}\text{La}$, ${}_{62}^{147}\text{Sm}$, ${}_{71}^{179}\text{Lu}$, ${}_{75}^{187}\text{Re}$.

Опытным путем было установлено, что при радиоактивном распаде ядер соблюдается закон сохранения электрических зарядов. Если через $Z_{\text{я}}$ обозначить заряд ядра, претерпевающего распад, а через Z_i – заряды ядер и частиц, возникших в результате радиоактивного распада, то этот закон может быть записан следующим образом:

$$Z_{\text{я}} = \sum Z_i .$$

Кроме того, установлено, что при естественном радиоактивном распаде выполняется правило сохранения массовых чисел. Если приписать нуклонам (протонам и нейтронам) массовые числа, равные единице (это соответствует их массам в а. е. м.), а электрону – массовое число, равное нулю, то сохранение массовых чисел при радиоактивном распаде можно записать в виде

$$A_{\text{я}} = \sum A_i ,$$

где $A_{\text{я}}$ – массовое число материнского ядра; A_i – массовое число ядра или частицы, получившейся в результате радиоактивного распада.

Последние два соотношения при радиоактивном распаде обычно формулируются в виде так называемых правил смещения, позволяющих установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра. При этом различают правила смещения для случаев возможного α - или β -распада.

Если ${}^A_Z X$ есть материнское ядро, претерпевающее распад, то правила смещения записываются соответственно следующим образом:

$$\text{при } \alpha\text{-распаде } {}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He} ,$$

$$\text{при } \beta\text{-распаде } {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e .$$

Здесь Y – символ дочернего ядра, ${}^4_2 \text{He}$ – ядро гелия, т. е. α -частица; ${}^0_{-1} e$ – символическое обозначение электрона, имеющего заряд, равный -1 , и нулевое массовое число.

Из последних выражений видно, что ядро, претерпевающее α -распад, смещается на два места левее в периодической системе элементов

Менделеева в связи с вылетом двух положительных зарядов. Вылет α -частицы сопровождается уменьшением массового числа на четыре единицы. При β -распаде положительный заряд ядра увеличивается на одну единицу и ядро смещается на одно место правее в периодической системе. При этом не происходит изменения массового числа ядра.

Из правил смещения следует, что в результате радиоактивного α - или β -распада ядра атомов радиоактивных элементов превращаются в ядра изотопов других химических элементов. В ряде случаев дочернее ядро оказывается также радиоактивным и возникает цепочка радиоактивных превращений. Естественнорadioактивные ядра образуют три радиоактивных семейства, называемых по родоначальнику семейства – наиболее долгоживущему изотопу с наибольшим периодом полураспада. Это семейства урана (${}^{238}_{92}\text{U}$), тория (${}^{232}_{90}\text{Th}$) и актиния (${}^{235}_{89}\text{Ac}$). Существует, кроме того, еще одно радиоактивное семейство, полученное искусственным путем и начинающееся от трансуранового элемента нептуния (${}^{237}_{93}\text{Np}$). Переход от одного члена каждого из естественнорadioактивных семейств к другому осуществляется цепочкой α - и β -распадов и заканчивается на устойчивых ядрах изотопов свинца: семейство тория – на ядре ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, семейство урана – на ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, семейство актиния – на ${}^{207}_{82}\text{Pb}$. Семейство нептуния заканчивается на ядре висмута ${}^{209}_{83}\text{Bi}$.

Гамма-излучение не вызывает изменения заряда и массового числа ядер, а поэтому не описывается никакими правилами смещения. Установлено, что γ -лучи как самостоятельный вид естественной радиоактивности не встречаются и обычно сопровождают α - и β -распады. Опытным путем установлено, что γ -лучи испускаются не материнским, а дочерним ядром, которое в момент своего образования оказывается возбужденным и обладает избыточной энергией по сравнению с обычным, нормальным энергетическим состоянием ядра. За весьма малое время (порядка 10^{-13} – 10^{-14} с), значительно меньшее, чем время жизни возбужденного атома ($\sim 10^{-8}$ с), дочернее ядро переходит в нормальное или менее возбужденное состояние и при этом испускает γ -излучение, имеющее дискретный, линейчатый спектр.

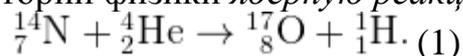
Ядерные реакции, деление и синтез ядер.

Наблюдения радиоактивного распада в изменяющихся внешних условиях — а именно, при различных давлениях и температурах, в электрических и магнитных полях — показали, что скорость радиоактивного распада от этих условий не зависит. Никаких превращений химических элементов друг в друга все эти факторы вызвать не способны. Очевидно, изменения энергии тут слишком малы, чтобы повлиять на атомное ядро — так ветер, обдувающий кирпичный дом, не в состоянии его разрушить.

Но разрушить дом можно артиллерийским снарядом. И Резерфорд в 1919 году решил воспользоваться наиболее мощными «снарядами», которые имелись тогда в распоряжении. Это были α -частицы, вылетающие с энергией около 5 МэВ при радиоактивном распаде урана. (Как вы помните, это те самые снаряды, которыми он восемь лет назад бомбардировал лист золотой фольги в своих знаменитых опытах, породивших планетарную модель атома.)

Правда, превращений золота в другие химические элементы в тех экспериментах не наблюдалось. Ядро золота $^{197}_{79}\text{Au}$ само по себе весьма прочное, да и к тому же содержит довольно много протонов; они создают сильное кулоновское поле, отталкивающее α -частицу и не подпускающее её слишком близко к ядру. А ведь для разбивания ядра α -снаряд должен сблизиться с ядром настолько, чтобы включились ядерные силы! Что ж, раз большое количество протонов мешает — может, взять ядро полегче, где протонов мало?

Резерфорд подверг бомбардировке ядра азота $^{14}_7\text{N}$ и в результате осуществил первую в истории физики ядерную реакцию:



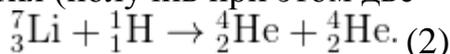
В правой части (1) мы видим *продукты реакции* — изотоп кислорода и протон.

Стало ясно, что для изучения ядерных реакций нужно располагать частицами-снарядами высоких энергий. Такую возможность дают *ускорители* элементарных частиц. Ускорители имеют два серьёзных преимущества перед естественными «радиоактивными пушками».

1. В ускорителях можно разгонять любые заряженные частицы. В особенности это касается протонов, которые при естественном распаде ядер не появляются. Протоны хороши тем, что несут минимальный заряд, а значит — испытывают наименьшее кулоновское отталкивание со стороны ядер-мишеней.

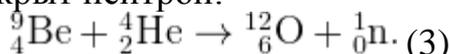
2. Ускорители позволяют достичь энергий, на несколько порядков превышающие энергию α -частиц при радиоактивном распаде. Например, в Большом адронном коллайдере протоны разгоняются до энергий в несколько ТэВ; это в миллион раз больше, чем 5 МэВ у α -частиц в реакции (1), осуществлённой Резерфордом.

Так, с помощью протонов, прошедших через ускоритель, в 1932 году удалось разбить ядро лития (получив при этом две α -частицы):

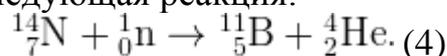


Ядерные реакции дали возможность искусственного превращения химических элементов.

Кроме того, в продуктах реакций стали обнаруживаться новые, не известные ранее частицы. Например, при облучении бериллия α -частицами в том же 1932 году был открыт нейтрон:



Нейтроны замечательно подходят для раскалывания ядер: не имея электрического заряда, они беспрепятственно проникают внутрь ядра. (При этом ускорять нейтроны не надо — медленные нейтроны легче проникают в ядра. Нейтроны, оказывается, нужно даже замедлять, и делается это пропусканием нейтронов через обычную воду.) Так, при облучении азота нейтронами протекает следующая реакция:



Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом: $X + a \rightarrow Y + b$ или $X(a,b)Y$.

где X и Y – исходные и конечные ядра,

a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

Важнейшую роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло предположение **М. Бора** (1936 г.) о том, что **ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме: $X + a \rightarrow C \rightarrow Y + b$**

Первая стадия – это **захват ядром X частицы a** , приблизившийся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м), и **образование промежуточного ядра C** , называемого **составным (или компаунд – ядром)**.

Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в **возбуждённом состоянии**.

При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон или α -частица) может получить энергию, достаточную для вылета из ядра.

В результате наступает вторая стадия ядерной реакции – распад составного ядра на ядро Y и частицу b

Так как время жизни составного ядра $10^{-16} - 10^{-12}$ с, а характерное ядерное время – время, необходимое для пролета частицей расстояния порядка величины равной диаметру ядра ($d \approx 10^{-15}$ м) - $\tau \approx 10^{-22}$ с, то характер

распада составного ядра (испускаемые им частицы b) – вторая стадия ядерной реакции – не зависит от способа образования составного ядра – первой стадии.

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями (например, реакция вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

1. по роду участвующих в них частиц

- реакции под действием нейтронов;
- реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц);
- реакции под действием γ -квантов;

2. по энергии вызывающих их частиц

- **реакции при малых энергиях** (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов;
- **реакции при средних энергиях** (порядка до нескольких МэВ), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протон, α -частицы);
- **реакции происходящие при высоких энергиях** (сотни и тысячи МэВ), приводящие к образованию отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющих большое значение для их изучения;

3. по роду участвующих в них ядер – реакции на лёгких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжёлых ядрах ($A > 100$);

4. по характеру происходящих ядерных превращений –

- реакции с испусканием нейтронов;
- реакции с испусканием заряженных частиц;
- реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переход в основное состояние, испуская один или несколько γ -квантов).

В любой ядерной реакции выполняются: законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.

Выполняются также

- **законы сохранения энергии,**
- **импульса,**
- **момента импульса.**

В отличие от радиоактивного распада, который всегда протекает с выделением энергии, **ядерные распады могут быть как**

• **экзотермические (с выделением энергии), так и эндотермические (с поглощением энергии).**

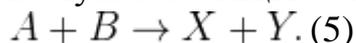
Энергетический выход ядерной реакции

Обсуждая энергию связи, мы видели, что в результате ядерных процессов масса системы частиц не остаётся постоянной. Это, в свою очередь, приводит к тому, что кинетическая энергия продуктов ядерной реакции отличается от кинетической энергии исходных частиц.

Прежде всего напомним, что полная энергия E частицы массы m складывается из её энергии покоя mc^2 и кинетической энергии K :

$$E = mc^2 + K.$$

Пусть в результате столкновения частиц A и B происходит ядерная реакция, продуктами которой служат частицы X и Y :



Полная энергия системы частиц сохраняется:

$$E_A + E_B = E_X + E_Y,$$

то есть

$$(m_A c^2 + K_A) + (m_B c^2 + K_B) = (m_X c^2 + K_X) + (m_Y c^2 + K_Y). (6)$$

Кинетическая энергия исходных частиц равна $K_A + K_B$. Кинетическая энергия продуктов реакции равна $K_X + K_Y$.

Энергетический выход Q ядерной реакции — это разность кинетических энергий продуктов реакции и исходных частиц:

$$Q = (K_X + K_Y) - (K_A + K_B).$$

Из (6) легко получаем:

$$Q = (m_A + m_B - m_X - m_Y)c^2. (7)$$

Если $Q > 0$, то говорят, что реакция идёт с *выделением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *больше* кинетической энергии исходных частиц. Из (7) мы видим, что в этом случае суммарная масса продуктов реакции *меньше* суммарной массы исходных частиц.

Если же $Q < 0$, то реакция идёт с *поглощением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *меньше* кинетической энергии исходных частиц. Суммарная масса продуктов реакции в этом случае *больше* суммарной массы исходных частиц.

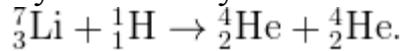
Таким образом, термины «выделение» и «поглощение» энергии не должны вызывать недоумение: они относятся только к *кинетической* энергии частиц. Полная энергия системы частиц, разумеется, в любой реакции остаётся неизменной.

Чтобы посчитать энергетический выход Q ядерной реакции (5), действуем по следующему алгоритму.

1. С помощью таблицы масс нейтральных атомов находим m_A, m_B, m_X и m_Y , выраженные в а. е. м. (для нахождения массы ядра не забываем вычесть из массы нейтрального атома массу электронов).
2. Вычисляем массу $m_1 = m_A + m_B$ исходных частиц, массу $m_2 = m_X + m_Y$ продуктов реакции и находим разность масс $\Delta m = m_1 - m_2$.

3. Умножаем Δm на 931,5 и получаем величину Q , выраженную в МэВ. Мы сейчас подробно рассмотрим вычисление энергетического выхода Q на двух примерах бомбардировки ядер лития ${}^7_3\text{Li}$: сначала — протонами, затем — α -частицами.

В первом случае имеем уже упоминавшуюся выше реакцию (2):



Масса атома лития ${}^7_3\text{Li}$ равна 7,01601 а. е. м. Масса электрона равна 0,000548 а. е. м. Вычитая из массы атома массу трёх его электронов, получаем *массу ядра лития* ${}^7_3\text{Li}$:

$$7,01601 - 3 \cdot 0,000548 = 7,01437 \text{ а. е. м.}$$

Масса протона равна 1,00728 а. е. м., так что масса исходных частиц:

$$m_1 = 7,01437 + 1,00728 = 8,02165 \text{ а. е. м.}$$

Переходим к продуктам реакции. Масса атома гелия равна 4,00260 а. е. м.

Вычитаем массу электронов и находим *массу ядра гелия* ${}^4_2\text{He}$:

$$4,00260 - 2 \cdot 0,000548 = 4,00150 \text{ а. е. м.}$$

Умножая на 2, получаем массу продуктов реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00150 = 8,00300 \text{ а. е. м.}$$

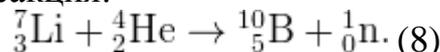
Масса, как видим, уменьшилась ($m_2 < m_1$); это означает, что наша реакция идёт с выделением энергии. Разность масс:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 8,02165 - 8,00300 = 0,01865 \text{ а. е. м.}$$

Выделившаяся энергия:

$$Q = 0,01865 \cdot 931,5 = 17,4 \text{ МэВ.}$$

Теперь рассмотрим второй пример. При бомбардировке ядер лития α -частицами происходит реакция:



Массы исходных ядер нам уже известны; остаётся сосчитать их суммарную массу:

$$m_1 = 7,01437 + 4,00150 = 11,01587 \text{ а. е. м.}$$

Из таблицы берём массу атома бора ${}^{10}_5\text{B}$ (она равна 10,01294 а. е. м.); вычитаем массу пяти электронов и получаем массу ядра атома бора:

$$10,01294 - 5 \cdot 0,000548 = 10,01020 \text{ а. е. м.}$$

Масса нейтрона равна 1,00867 а. е. м. Находим массу продуктов реакции:

$$m_2 = 10,01020 + 1,00867 = 11,01887 \text{ а. е. м.}$$

На сей раз масса увеличилась ($m_2 > m_1$), то есть реакция идёт с поглощением энергии.

Разность масс равна:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -0,0030 \text{ а. е. м.}$$

Энергетический выход реакции:

$$Q = -0,0030 \cdot 931,5 = -2,8 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, в реакции (8) поглощается энергия 2,8 МэВ. Это означает, что суммарная кинетическая энергия продуктов реакции (ядра бора и нейтрона) на 2,8 МэВ меньше, чем суммарная кинетическая энергия

исходных частиц (ядра лития и α -частицы). Поэтому чтобы данная реакция в принципе осуществилась, энергия исходных частиц должна быть не меньше 2,8 МэВ.

В ядерной физике рассматриваются два процесса: - синтеза и деления ядер.

Если соединить два легких ядра, то масса суммарного ядра будет меньше суммы масс первоначальных ядер на ΔM (дефект масс).

При соединении легкие ядра сольются с выделением энергии ΔMc^2 . Этот процесс называется синтезом ядер. Разность масс может превышать 0,5%.

Энергия водородной бомбы – это энергия, выделяющаяся при ядерном синтезе.

У тяжелых ядер существует тенденция к делению на два более легких ядра с выделением энергии.

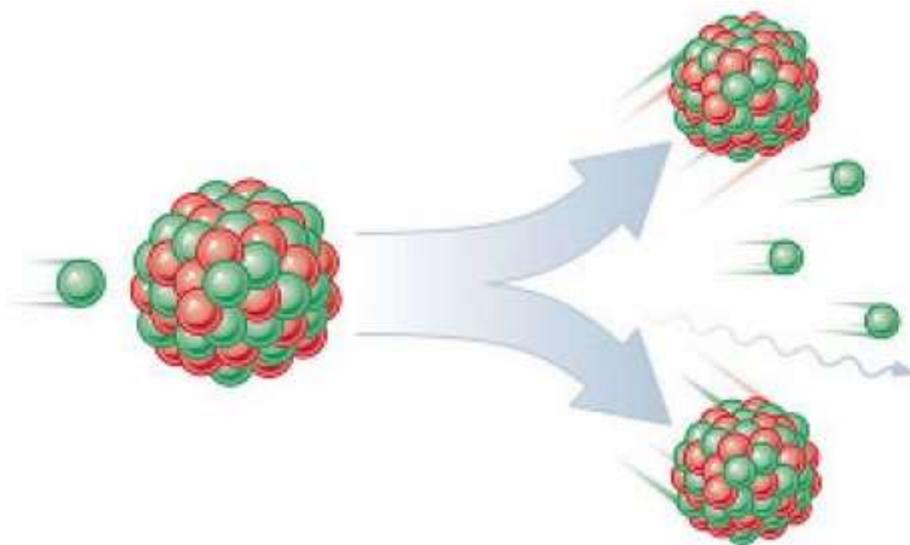
Если расщепляется тяжелое ядро на два более легких ядра, то их масса будет меньше массы родительского ядра на 0,1%.

Энергия атомной бомбы и ядерного реактора представляет собой энергию, высвобождающуюся при делении ядер.

Деление ядер

Бомбардируя ядра урана медленным нейтронами, немецкие физики Ган и Штрассман обнаружили появление элементов средней части периодической системы: бария, криптона, стронция, рубидия, цезия и т. д. Так было открыто *деление ядер урана*.

На рисунке мы видим процесс деления ядра (изображение с сайта our.co.uk). Захватывая нейтрон, ядро урана делится на два *осколка*, и при этом освобождаются два-три нейтрона.



Осколки являются ядрами радиоактивных изотопов элементов середины таблицы Менделеева. Обычно один из осколков больше другого. Например, при бомбардировке урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ могут встречаться такие комбинации осколков (как говорят, реакция идёт по следующим каналам).

- Барий и криптон: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3{}^1_0\text{n}$.
- Цезий и рубидий: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{140}_{55}\text{Cs} + 2{}^1_0\text{n}$.
- Ксенон и стронций: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + 2{}^1_0\text{n}$.

В каждой из этих реакций выделяется очень большая энергия — порядка 200 МэВ. Сравните эту величину с найденным выше энергетическим выходом реакции (2), равным 17,4 МэВ! Откуда берётся такое количество энергии?

Деление 1 г урана сопровождается выделением $\sim 9 \cdot 10^{10}$ Дж. Это почти в 3 млн раз превосходит энергию сжигания 1 г угля ($2,9 \cdot 10^4$ Дж).

Стоимость 1 Дж энергии, полученной сжиганием угля, оказывается в 400 раз выше, чем в случае уранового топлива.

Начнём с того, что из-за большого числа протонов (92 штуки), упакованных в ядре урана, кулоновские силы отталкивания, распирающие ядро, очень велики. Ядерные силы, конечно, ещё в состоянии удерживать ядро от распада, но могучий кулоновский фактор готов сказать своё слово в любой момент. И такой момент настаёт, когда в ядре застревает нейтрон (рис. 2 - изображение с сайта investingreenenergy.com).

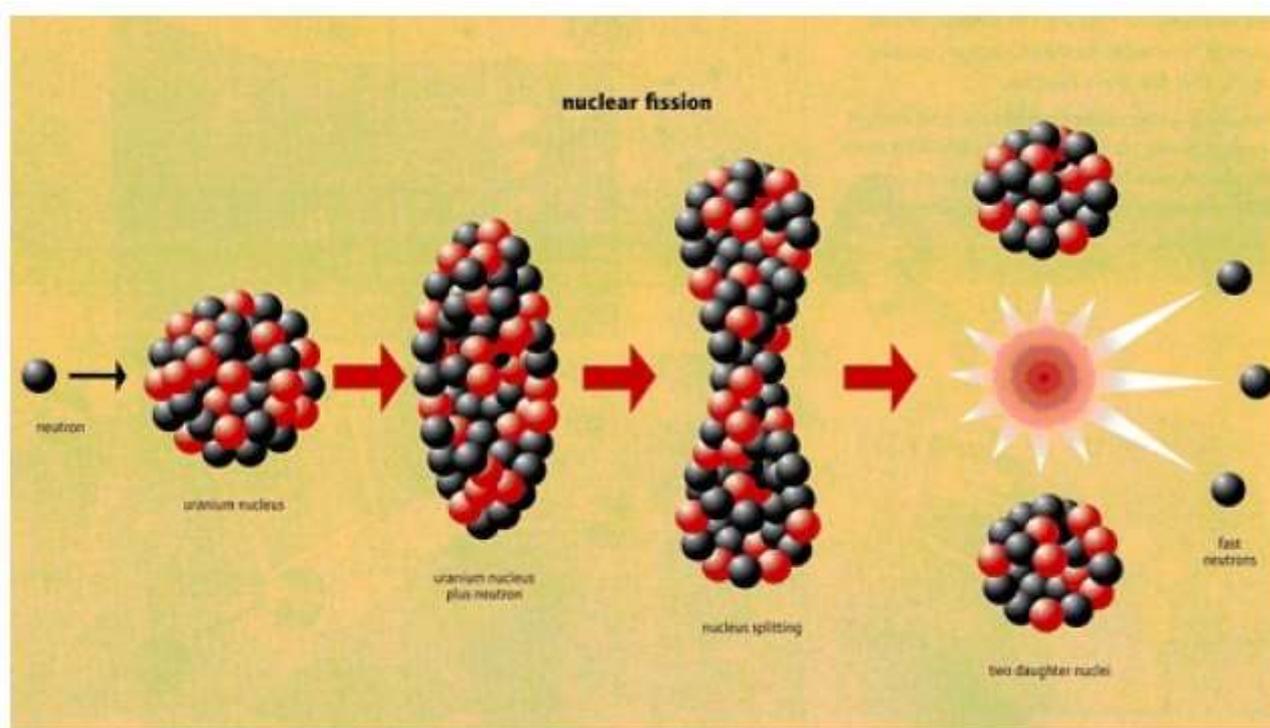


Рис. 2. Деформация, колебания и разрыв ядра

Застрявший нейтрон вызывает деформацию ядра. Начнутся колебания формы ядра, которые могут стать столь интенсивными, что ядро вытянется в «гантельку». Короткодействующие ядерные силы, скрепляющие небольшое число соседних нуклонов перешейка, не справятся с силами электрического отталкивания половинок гантельки, и в результате ядро разорвётся.

Осколки разлетятся с огромной скоростью — около $1/30$ скорости света. Они и унесут большую часть высвобождающейся энергии (около 170 МэВ из 200).

Деление тяжёлых ядер можно истолковать с точки зрения уже известного нам графика зависимости удельной энергии связи ядра от его массового числа (рис. 3).

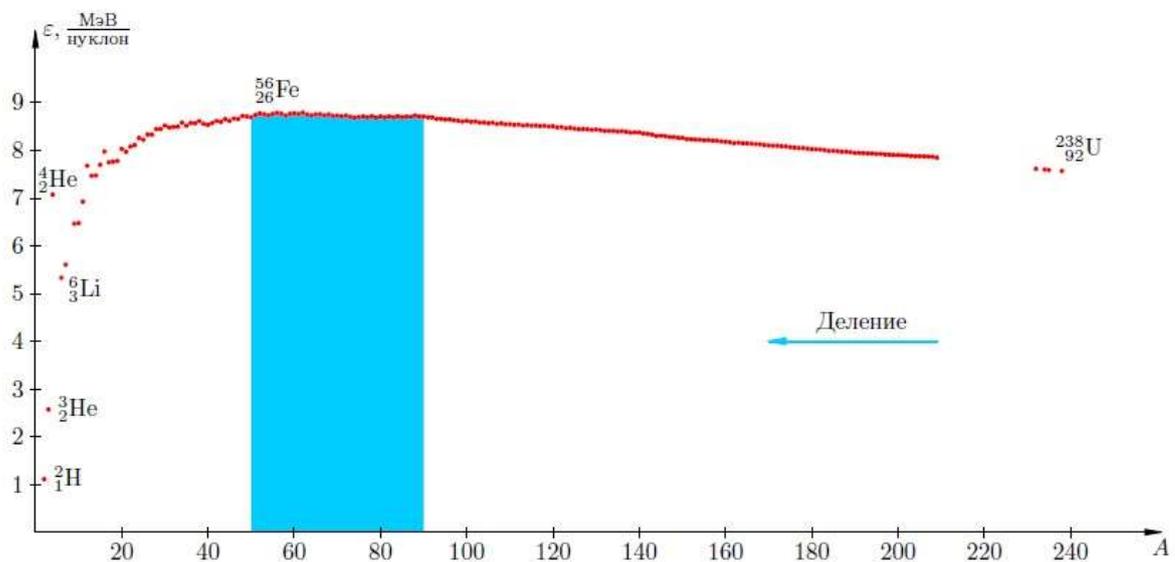


Рис. 3. Деление тяжёлых ядер энергетически выгодно

Цветом выделена область $50 \leq A \leq 90$, в которой удельная энергия связи достигает наибольшего значения 8,7 МэВ/нуклон. Это область наиболее устойчивых ядер. Справа от этой области удельная энергия связи плавно уменьшается до 7,6 МэВ/нуклон у ядра урана.

Процесс превращения менее устойчивых ядер в более устойчивые является энергетически выгодным и сопровождается выделением энергии. При делении ядра урана, как видим, удельная энергия связи повышается примерно на 1 МэВ/нуклон; эта энергия как раз и выделяется в процессе деления. Умножив это на число нуклонов в ядре урана, получим приблизительно те самые 200 МэВ энергетического выхода, о которых говорилось выше.

Цепная ядерная реакция

Появление двух-трёх нейтронов в процессе деления ядра урана — важнейший факт. Эти нейтроны «первого поколения» могут попасть в новые ядра и вызвать их деление; в результате деления новых ядер возникнут нейтроны «второго поколения», которые попадут в следующие ядра и вызовут их деление; возникнут нейтроны «третьего поколения», которые приведут к делению очередных ядер и т. д. Так идёт *цепная ядерная реакция*, в ходе которой высвобождается колоссальное количество энергии.

Для протекания цепной ядерной реакции необходимо, чтобы число N_i высвободившихся нейтронов в очередном поколении было не меньше числа N_{i-1} нейтронов в предыдущем поколении. Величина

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

называется *коэффициентом размножения нейтронов*. Таким образом, цепная реакция идёт при условии $k > 1$. Если $k < 1$, то цепная реакция не возникает.

В случае $k > 1$ происходит лавинообразное нарастание числа освобождающихся нейтронов, и цепная реакция становится *неуправляемой*. Так происходит взрыв атомной бомбы.

В ядерных реакторах происходит *управляемая* цепная реакция деления с коэффициентом размножения $k = 1$. Стационарное течение управляемой цепной реакции обеспечивается введением в активную зону реактора (то есть в ту область, где протекает реакция) специальных управляющих стержней, поглощающих нейтроны. При полностью введённых стержнях поглощение ими нейтронов настолько велико, что $k < 1$ и реакция не идёт. В процессе запуска реактора стержни постепенно выводят из активной зоны, пока выделяемая мощность не достигнет требуемого уровня. Этот уровень тщательно контролируется, и при его превышении включаются устройства, вводящие управляющие стержни назад в активную зону.

Цепная реакция в уране с повышенным содержанием урана-235 может развиваться только тогда, когда масса урана превосходит так называемую **критическую массу**.

Критическую массу урана можно во много раз уменьшить, если использовать так называемые **замедлители** нейтронов.

Наилучшим замедлителем нейтронов является **тяжелая вода**. Обычная вода при взаимодействии с нейтронами сама превращается в тяжелую воду.

Тяжелая вода – изотопная разновидность воды, в молекулах которой атомы водорода заменены атомами дейтерия.

Используется цепная реакции деления в двух направлениях:

- управляемая ядерная реакция деления – создание атомных реакторов;
- неуправляемая ядерная реакция деления – создание ядерного оружия.

В 1942 г. под руководством Э. Ферми в США был построен первый ядерный реактор.

Массу Pu и U можно также сделать **надкритической**.

В этом случае **возникающие при делении нейтроны будут вызывать несколько вторичных делений**.

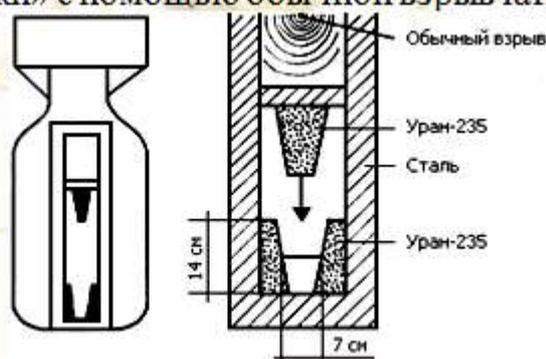
Поскольку нейтроны движутся со скоростями, превышающими 10^8 см/с, надкритическая сборка может полностью прореагировать (или разлететься) быстрее, чем за тысячную долю секунды.

Такое устройство называется **атомной бомбой**

На рис. изображена **схема атомной бомбы «Малыш»**, сброшенной на Хиросиму.

Ядерной взрывчаткой в бомбе служил ^{235}U разделенный на две части, масса которых была меньше критической.

Необходимая для взрыва критическая масса ^{235}U создавалась в результате соединения обеих частей «методом пушки» с помощью обычной взрывчатки.



При взрыве 1 т тринитротолуола (ТНТ) высвобождается 10^9 кал, или $4 \cdot 10^9$ Дж. При взрыве атомной бомбы, расходующей 1 кг плутония, высвобождается около $8 \cdot 10^{13}$ Дж энергии.

Это почти в 20 000 раз больше, чем при взрыве 1 т ТНТ. Такая бомба называется 20-килотонной бомбой.

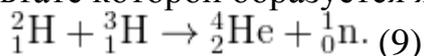
Современные бомбы мощностью в мегатонны в миллионы раз мощнее обычной ТНТ-взрывчатки

Термоядерная реакция

Наряду с реакцией деления тяжёлых ядер энергетически возможным оказывается и обратный в некотором смысле процесс — *синтез лёгких ядер*, то есть слияние ядер лёгких элементов (расположенных в начале периодической таблицы) с образованием более тяжёлого ядра.

Чтобы началось слияние ядер, их нужно сблизить вплотную — чтобы вступили в действие ядерные силы. Для такого сближения нужно преодолеть кулоновское отталкивание ядер, резко возрастающее с уменьшением расстояния между ними. Это возможно лишь при очень большой кинетической энергии ядер, а значит — при очень высокой температуре (в десятки и сотни миллионов градусов). Поэтому реакция ядерного синтеза называется *термоядерной реакцией*.

В качестве примера термоядерной реакции приведём реакцию слияния ядер дейтерия и трития (тяжёлого и сверхтяжёлого изотопов водорода), в результате которой образуется ядро гелия и нейтрон:



Эта реакция идёт с выделением энергии, равной 17,6 МэВ (попробуйте сами провести расчёты и получить данную величину). Это очень много, если учесть, что в реакции участвуют всего 5 нуклонов! В самом деле, в расчёте на один нуклон в реакции (9) выделяется энергия примерно 3,5 МэВ, в то время как при делении ядра урана выделяется «всего» 1 МэВ на нуклон.

Таким образом, термоядерные реакции служат источником ещё большего количества энергии, чем реакции деления ядер. С физической точки зрения это понятно: энергия реакции 6 ядерного деления есть в основном кинетическая энергия осколков, разогнанных электрическими силами отталкивания, а при ядерном синтезе энергия высвобождается в результате разгона нуклонов навстречу друг другу под действием куда более мощных ядерных сил притяжения.

Проще говоря, при делении ядер высвобождается энергия электрического взаимодействия, а при синтезе ядер — энергия сильного (ядерного) взаимодействия.

В недрах звёзд достигаются температуры, подходящие для синтеза ядер. Свет Солнца и далёких звёзд несёт энергию, выделяющуюся в термоядерных реакциях — при слиянии ядер водорода в ядра гелия и последующем слиянии ядер гелия в ядра более тяжёлых элементов, расположенных в средней части периодической системы. Направление термоядерного синтеза показано на рис. 4; синтез лёгких ядер энергетически выгоден, так как направлен в сторону увеличения удельной энергии связи ядра.

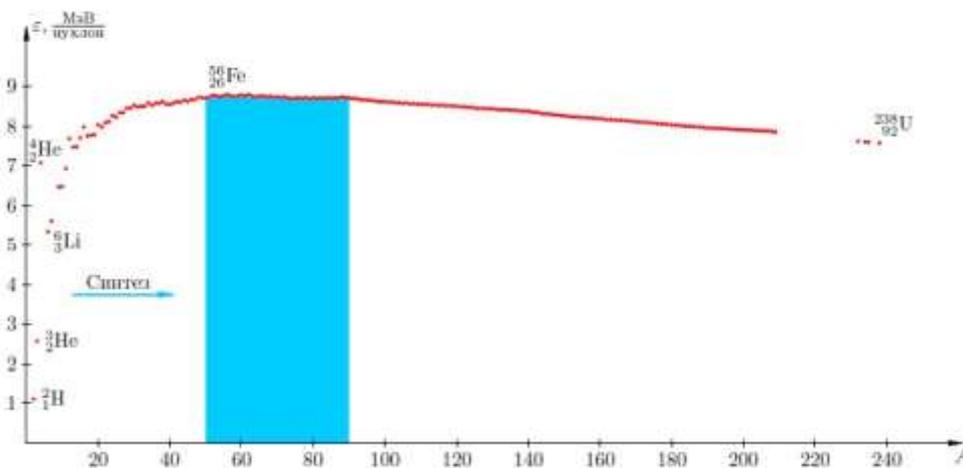


Рис. 4. Синтез лёгких ядер энергетически выгоден

Неуправляемая термоядерная реакция осуществляется при взрыве водородной бомбы. Сначала взрывается встроенная атомная бомба — это нужно для создания высокой температуры на первой ступени термоядерного

взрыва. При достижении необходимой температуры в термоядерном горючем бомбы начинаются реакции синтеза, и происходит взрыв собственно водородной бомбы.

Осуществление управляемой термоядерной реакции остаётся пока нерешённой проблемой, над которой физики работают уже более полувека. Если удастся добиться управляемого течения термоядерного синтеза, то человечество получит в своё распоряжение фактически неограниченный источник энергии. Это чрезвычайно важная задача, стоящая перед нынешним и будущими поколениями — в свете угрожающей перспективы истощения нефтегазовых ресурсов нашей планеты.

Биологическое действие ионизирующих излучений и способы защиты от них

Различают два вида эффекта воздействия на организм ионизирующих излучений: **соматический и генетический**

При соматическом эффекте последствия проявляются непосредственно у облучаемого, при генетическом – у его потомства.

Соматические эффекты могут быть ранними или отдалёнными.

Ранние возникают в период от нескольких минут до 30–60 суток после облучения. К ним относят покраснение и шелушение кожи, помутнение хрусталика глаза, поражение кроветворной системы, лучевая болезнь.

Острая лучевая болезнь легкой степени тяжести развивается при воздействии излучения в дозе 1–2.5 Гр.

Первичная реакция (первые 2–3 дня) – головокружение, тошнота. Латентный период (около 1 месяца) – постепенное снижение первичных признаков. Восстановление полное.

Острая лучевая болезнь средней степени тяжести развивается при воздействии излучения в дозе 2.5–4 Гр.

Первичная реакция (первые 1–2 часа) – головокружение, тошнота, рвота. Латентный период (около 25 дней) – наличие изменения слизистых оболочек, инфекционных осложнений, возможен летальный исход.

Острая лучевая болезнь тяжелой степени развивается при воздействии излучения в дозе 4–10 Гр. Первичная реакция (первые 30–60 минут) – головная боль, повторная рвота, повышение температуры тела. Латентный период (около 15 дней) – инфекционные поражения, поражения слизистых оболочек, лихорадка. Частота летальных исходов выше, чем при средней степени тяжести.

Острая лучевая болезнь крайне тяжелой степени развивается при воздействии излучения в дозе более 10 Гр. Летальный исход почти неизбежен.

Несмотря на ту опасность, которую представляет атомная энергетика, она является той экологически чистой индустрией, на которую возлагает свои надежды все передовое человечество.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. В чем заключается явление радиоактивности?
2. Какова природа радиоактивного излучения?
3. Перечислите и охарактеризуйте основные виды радиоактивных излучений?
4. Напишите закон радиоактивного распада.
5. Что называют периодом полураспада?
6. Что позволяют определить правила смещения?
7. Как осуществить искусственные превращения ядер?
8. Опишите механизм деления ядра урана и периода полураспада.
9. Что такое коэффициент размножения?
10. При каком условии возникает неуправляемая цепная реакция деления ядер?
11. Почему термоядерная реакция происходит только при высоких температурах?
12. В чем трудность получения управляемой термоядерной реакции?
13. Каким образом можно осуществить управляемый термоядерный синтез?

Лекция 10

Элементарные частицы.

Способы наблюдения и регистрации элементарных частиц.

В древние времена считалось, что весь материальный мир построен из четырех основных субстанций — земли, воздуха, огня и воды. Это были своего рода «элементарные частицы» природы. В начале 30-х годов нашего столетия современная наука смогла найти более приемлемое описание строения вещества на основе четырех типов элементарных частиц — протонов, нейтронов, электронов и фотонов. Это была чрезвычайно простая и привлекательная схема: с помощью всего лишь четырех типов элементарных частиц, следуя законам квантовой механики, удалось объяснить природу химических элементов, их соединений и испускаемых ими излучений. Добавление пятой частицы — нейтрино — позволило объяснить также процессы радиоактивного распада. Казалось, что названные элементарные частицы являются в конечном счете основными кирпичами мироздания.

Но эта кажущаяся простота вскоре исчезла. Не прошло и года после открытия нейтрона, как был обнаружен позитрон. В 1936 г. среди продуктов взаимодействия космических лучей с веществом был открыт первый мезон. В 1947 г. был обнаружен мезон второго типа, и вскоре после этого удалось наблюдать мезоны иной природы, а также другие необычные частицы. Эти частицы рождались под действием космических лучей столь редко, что поначалу нельзя было провести детальных исследований их свойств и взаимодействий. Однако после того, как были построены ускорители, позволяющие получать частицы все больших энергий, удалось не только выполнить ряд таких исследований, но и одновременно открыть множество новых частиц.

В настоящее время известно более сотни различных мезонов и других частиц со странными свойствами. Их массы лежат в пределах от 200 электронных масс до масс, в несколько раз превышающих массу протона. Существование всех этих новых частиц скоротечно, ни одна из них не живет дольше нескольких микросекунд, а многие частицы распадаются примерно через 10^{-23} с после своего образования. Конечные продукты распадов этих частиц — обычные составные части вещества, т.е. протоны, электроны и фотоны, а также нейтрино.

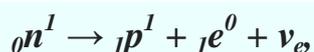
Необходимо отметить, что позитроны и антипротоны в свободном состоянии устойчивы, но при взаимодействии с обычным веществом они аннигилируют.

Элементарными следует называть микрочастицы, относительно которых нет доказательств, что они являются составными. Это электроны, протоны, нейтроны и многие другие частицы. Впрочем, ситуация с определением элементарности усложнилась после того, как выяснилось, что многие из этих частиц имеют внутреннюю структуру.

Несмотря на последнее обстоятельство, за этими частицами сохранили название элементарных. И это в какой-то степени оправдано: во всех наблюдавшихся до сих пор явлениях каждая такая частица ведет себя как единое целое. Они могут рождаться и превращаться друг в друга, но не расщепляться на какие-то составляющие.

Поэтому теперь в ядерной физике под термином «элементарные частицы» понимается общее название для всех субатомных частиц, отличных от атомов и атомных ядер.

Итак, частицы, которые мы называем элементарными, ведут себя как единое целое и обладают способностью к рождению и взаимопревращению. Например, распад нейтрона:



где нейтрон превращается в протон, электрон и нейтрино. Продукты распада нейтрона возникают только в самом этом процессе. До распада их не было совсем, и они не входили в состав нейтрона.

Для элементарных частиц весьма характерна их многочисленность. В настоящее время открыто несколько сотен частиц, подавляющее большинство которых нестабильно.

Источниками заряженных частиц высоких энергий являются в основном ускорители. Вместе с детекторами они позволяют исследовать процессы в которых образуются и взаимодействуют различные элементарные частицы. Вот почему физику элементарных частиц часто называют **физикой высоких энергий**.

Виды фундаментальных взаимодействий

Современной науке известны четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное.

Сильное взаимодействие осуществляется между нуклонами в атомных ядрах. Оно присуще также большому количеству элементарных частиц, так называемых адронов (протоны, нейтроны, гипероны, мезоны и др.).

Электромагнитное взаимодействие осуществляется между электрическими зарядами. К электромагнитным взаимодействиям сводятся обычно воспринимаемые нами силы: химические, молекулярные, упругие, вязкие и др.

Слабые взаимодействия вызывают β -распад радиоактивных ядер и вместе с электромагнитными силами присущи лептонам – элементарным частицам, не участвующим в сильных взаимодействиях и обладающих спином $\frac{1}{2}$ (электрон, мюон, нейтрино и др.). Нейтральные лептоны не участвуют в электромагнитных взаимодействиях.

Гравитационное взаимодействие присуще всем частицам.

Энергетика взаимодействий связана со временем их протекания. Для сравнения скоростей взаимодействий обычно берут частицы с одной и той же энергией например, принимают кинетическую энергию сталкивающихся

частиц равной 1 ГэВ, характерную для физики элементарных частиц. При таких энергиях сильные взаимодействия осуществляются за времена порядка 10^{-23} с, электромагнитные – 10^{-20} с, слабые – 10^{-9} с.

Вид взаимодействия, присущий определенной частице, определяет и такой параметр, как длина её свободного пробега в веществе. Чем интенсивнее тип взаимодействия, тем меньше длина свободного пробега. Так нейтрино с энергией 10 МэВ может пройти слой железа толщиной 10^9 км.

Сильные и слабые взаимодействия являются короткодействующими. Радиус действия сильных взаимодействий имеет порядок 10^{-13} см (1 ферми), а слабых – $2 \cdot 10^{-16}$ см. **Электромагнитные силы являются дальнедействующими.** Их интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими частицами. Аналогичному закону подчиняются и гравитационные силы. Количественно соотношения интенсивности типов взаимодействий представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Интенсивность различных типов взаимодействия.

<i>Тип взаимодействия</i>	<i>Объекты взаимодействия</i>	<i>Радиус действия</i>	<i>Интенсивность взаимодействия по отношению к сильному</i>
<i>Сильное</i>	<i>Адроны</i>	<i>см</i>	<i>1</i>
<i>Электромагнитное</i>	<i>Заряженные частицы</i>	∞	$10^{-3}-10^{-2}$
<i>Слабое</i>	<i>Все частицы</i>	<i>см</i>	$10^{-16}-10^{-15}$
<i>Гравитационное</i>	<i>Масса</i>	∞	$10^{-40}-10^{-38}$

Остановимся более подробно на характеристике этих взаимодействий.

1. Сильные взаимодействия удерживают нуклоны в атомных ядрах, они же присущи большинству адронов (протон, нейтрон, гипероны, мезоны и др.). Эти взаимодействия короткодействующие: на расстояниях свыше 10^{-13} см они прекращаются, вследствие чего сильные взаимодействия не способны создавать структуры макроскопических размеров.

2. Электромагнитные взаимодействия осуществляются через электромагнитное поле. Они значительно слабее сильных взаимодействий, однако из-за дальнедействия электромагнитные силы во многих случаях оказываются главными. Именно эти силы вызывают разлет осколков, которые образуются при делении атомных ядер. Эти силы ответственны за все электрические и магнитные явления, наблюдаемые нами в различных формах их проявления: оптических, механических, тепловых, химических и т.д.

3. Слабые взаимодействия весьма малы по сравнению с сильными и электромагнитными. Слабые взаимодействия являются универсальными: они присутствуют во всех взаимодействиях.

4. Гравитационные взаимодействия самые слабые. Они универсальны. Но для элементарных частиц эти взаимодействия никакого значения не имеют, поэтому современная физика элементарных частиц – это физика без гравитации. В связи с этим в дальнейшем под фундаментальными мы будем понимать только сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия.

Практически все элементарные частицы являются нестабильными (за исключением фотона, электрона и трех нейтрино). Время жизни таких частиц варьируется в пределах от 10^{-18} до 10^{-11} с (у так называемых резонансов еще меньше). Но в некоторых случаях оно оказывается весьма продолжительным: например, среднее время жизни свободного нейтрона составляет 11.7 мин.

Систематика элементарных частиц

Время жизни τ

Практически все элементарные частицы, как уже говорилось, являются нестабильными, распадаясь на другие частицы. По времени жизни различают стабильные, квазистабильные и т.н. резонансы. *Резонансами* называют частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия с временем жизни $\sim 10^{-23}$ с. *Нестабильные частицы* с временем жизни, превышающим 10^{-20} с, распадаются за счет электромагнитного или слабого взаимодействия. По сравнению с характерным ядерным временем (10^{-23} с) время 10^{-20} с следует считать большим. По этой причине их и называют квазистабильными. *Стабильными частицами* ($\tau \rightarrow \infty$) являются только фотон, электрон, протон и нейтрино.

Переносчики взаимодействия

Это особая группа элементарных частиц, в которую входят *фотоны* (переносчики электромагнитного взаимодействия), родственные им *W- и Z-бозоны* (переносчики слабого взаимодействия), так называемые *глюоны* (переносчики сильного взаимодействия) и гипотетические *гравитоны*.

Все остальные частицы подразделяют по характеру взаимодействий, в которых они участвуют, на *лептоны* и *адроны*.

Лептоны

Это частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях и имеющие спин $\frac{1}{2}$. К ним относятся электроны, мюоны, таоны и соответствующие им нейтрино. Лептоны принимают участие в слабых взаимодействиях. За исключением нейтрино, лептоны участвуют и в электромагнитных взаимодействиях.

Все лептоны можно отнести к истинно элементарным частицам, поскольку у них, в отличие от адронов, не обнаружена внутренняя структура.

Адроны

Так называют элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Как правило, они участвуют и в электромагнитном, и в слабом взаимодействиях. Эти частицы образуют самую многочисленную группу частиц (свыше 400). Адроны подразделяют на мезоны и барионы. *Мезоны* – это адроны с нулевым или целочисленным спином (т.е. бозоны). К ним относятся π -, K - и η -мезоны, а также множество мезонных резонансов, т.е. мезонов с временем жизни $\sim 10^{-23}$ с. *Барионы* – это адроны с полуцелым спином (т.е. фермионы) и массами, не меньшими массы протона. К ним относятся нуклоны (протоны и нейтроны), *гипероны* и множество барионных резонансов. За исключением протона, все барионы нестабильны. Нестабильные барионы с массами, большими массы протона, и большим временем жизни (сравнительно с ядерным $\sim 10^{-23}$ с) называют *гиперонами*. Это гипероны Λ , Σ , Ξ и Ω . Все гипероны имеют спин $1/2$, за исключением Ω , спин которого $3/2$. За время $\tau \sim 10^{-19}$ - 10^{-10} с они распадаются на нуклоны и легкие частицы (π -мезоны, электроны, нейтрино, γ -кванты).

Сведем для наглядности основную систематику элементарных частиц в таблицу 4.4.

Таблица 4.4. Систематика элементарных частиц.

Фотоны	Лептоны	Адроны		
		Мезоны	Барионы	
			Нуклоны	Гипероны
γ	e, μ, τ, ν	π, K, η и резонансы	p, n	$\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ и резонансы

Кварковая модель адронов

Детальное рассмотрение квантовых чисел адронов с целью их классификации позволило сделать вывод о существовании особых структурных единиц, из которых построены адроны, – кварков.

Гипотеза о том, что адроны построены из специфических субъединиц, была впервые выдвинута М.Гелл-Манном и, независимо от него, Дж. Цвейгом в 1964 году. Слово «кварк» было заимствовано Гелл-Манном из романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану», где в одном из эпизодов звучит фраза «Three quarks for Muster Mark!» (обычно переводится как «Три кварка для Мастера Марка!»).

В настоящее время известно 6 типов кварков. Спин всех кварков $1/2$ (фермионы). Барионный заряд $1/3$. Кварки естественным образом группируются в три поколения. В каждом поколении один кварк обладает электрическим зарядом $+2/3$, а другой $-1/3$.

Символ	Название		Электрический заряд (в долях e)	Масса
	русское	английское		
Первое поколение				
d	нижний	<i>down</i>	$-\frac{1}{3}$	$\sim 5 \text{ МэВ}/c^2$
u	верхний	<i>up</i>	$+\frac{2}{3}$	$\sim 3 \text{ МэВ}/c^2$
Второе поколение				
s	странный	<i>strange</i>	$-\frac{1}{3}$	$95 \pm 25 \text{ МэВ}/c^2$
c	очарованный	<i>charm (charmed)</i>	$+\frac{2}{3}$	$1,8 \text{ ГэВ}/c^2$
Третье поколение				
b	прелестный	<i>beauty (bottom)</i>	$-\frac{1}{3}$	$4,5 \text{ ГэВ}/c^2$
t	истинный	<i>truth (top)</i>	$+\frac{2}{3}$	$171 \text{ ГэВ}/c^2$

Каждый барион состоит из трёх кварков, поскольку только в этом случае суммарный барионный заряд равен единице $B=1$.

Силы, действующие между кварками, не ослабевают с расстоянием, т.е. для отделения кварков друг от друга требуется бесконечно большая энергия. Необычные свойства сильного взаимодействия приводят к тому, что одиночный кварк не может удалиться на какое-либо заметное расстояние от других кварков, а значит, кварки и антикварки не могут наблюдаться в свободном виде (явление, получившее название конфайнмент). Разлететься могут лишь комбинации кварков – адроны.

Античастицы

Частицы и античастицы

Существование античастиц является универсальным свойством элементарных частиц. Каждой частице соответствует своя античастица: например, электрону e^- – позитрон e^+ , протону p^+ – антипротон p^- , нейтрону n – антинейтрон и т.д. Позитрон и антипротон отличаются от электрона и протона прежде всего знаком электрического заряда. Антинейтрон отличается от нейтрона знаком магнитного момента.

В общем случае античастица отличается от частицы только знаками так называемых зарядов (электрического, барионного, лептонного, странности), с которыми связаны определенные законы сохранения.

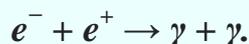
Такие же характеристики как масса, спин, время жизни у них **одинаковы.**

В некоторых случаях античастица совпадает со своей частицей, т.е. все свойства частицы и античастицы одинаковы. Такие частицы называют **истинно нейтральными**. К ним относятся, например, фотон γ , π^0 -мезон и η^0 -мезон.

Понятия частицы и античастицы относительны. Электрон считают частицей, а позитрон – античастицей только потому, что во Вселенной преобладают именно электроны, а позитроны более экзотические частицы. Условившись считать электрон и протон частицами, далее с помощью законов сохранения можно однозначно установить, чем является каждая элементарная частица – частицей или античастицей.

Аннигиляция и рождение пар

При встрече электрона с позитроном происходит их аннигиляция, т.е. превращение их в γ -кванты, например так:



Заметим, что один γ -квант при этом излучиться не может: в этом случае нарушался бы закон сохранения импульса. Это легко понять, если рассмотреть процесс в \mathcal{C} -системе, где суммарный импульс электрона и позитрона равен нулю.

Существует процесс, обратный аннигиляции – рождение пар: γ -квант может породить пару $e^{-}e^{+}$. Для этого необходимо, чтобы энергия γ -кванта была не меньше собственной энергии пары $2 \cdot m_e c^2$. Этот процесс может происходить только в поле атомного ядра, иначе нарушался бы закон сохранения импульса. В самом деле, в \mathcal{C} -системе суммарный импульс образовавшейся пары был бы равен нулю, тогда как импульс породившего ее γ -кванта отличен от нуля. При наличии атомного ядра импульс γ -кванта будет восприниматься ядром без нарушения закона сохранения импульса.

Аннигилируют не только электрон с позитроном, но и любая другая частица со своей античастицей. Однако при аннигиляции тяжелых частиц и античастиц возникают преимущественно π -мезоны (доля γ -квантов весьма мала). Это обусловлено проявлением различных типов взаимодействий: аннигиляция электрона с позитроном вызывается электромагнитным взаимодействием, тогда как аннигиляция более тяжелых частиц – адронов – сильным взаимодействием.

Методы регистрации элементарных частиц

Методы регистрации элементарных частиц основаны на использовании систем в долгоживущем неустойчивом состоянии, в которых под действием пролетающей заряженной частицы происходит переход в устойчивое состояние. Приборы, применяемые для регистрации ядерных излучений, называется **детекторами** ядерных излучений.

Регистрирующий прибор – более или менее сложная макроскопическая система, которая может находиться в неустойчивом состоянии. При небольшом возмущении, вызванной пролетевшей частицей, начинается процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние.

Газоразрядные счетчики.



Счетчик Гейгера – детектор частиц, действие которого основано на возникновении самостоятельного электрического разряда в газе при попадании частицы в его объем.

Счётчик состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод).

Трубка заполняется газом, обычно аргоном. Действие счётчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица (электрон, α - частица и т.д.), пролетая в газе, отрывает от атомов электроны и создаёт положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергии, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и ток через счётчик резко возрастает. При этом на нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подаётся в регистрирующее устройство. Для того чтобы счётчик мог регистрировать следующую попавшую в него частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически. Так как в момент появления импульса тока падение напряжения на разгрузочном резисторе R велико, то напряжение между анодом и катодом резко уменьшается – настолько ,что разряд прекращается.

Счётчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов и γ -квантов(фотонов большой энергии).Однако непосредственно γ - кванты вследствие их малой ионизирующей способности не регистрируются. Для их обнаружения внутреннюю стенку трубки покрывают материалом, из которого γ -кванты выбивают электроны.

Счётчик регистрирует почти все попадающие в него электроны; что же касается γ - квантов ,то он регистрирует приблизительно только один γ -квант из ста. Регистрация тяжёлых частиц (например , α -частиц) затруднена, так как сложно сделать в счётчике достаточно тонкое «окошко», прозрачное для этих частиц.

Камера Вильсона. Счетчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать её некоторые характеристики. В камере же Вильсон быстро заряженная частица оставляет след, который можно наблюдать непосредственно или сфотографировать.

Действие камеры Вильсона основано на конденсации перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек воды. Эти ионы создаёт вдоль своей траектории движущаяся заряженная частица.

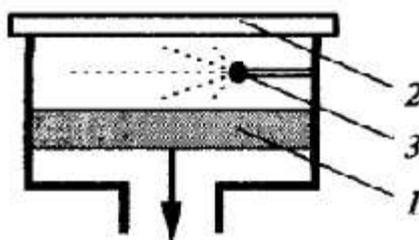


Рис. 2

Прибор представляет собой цилиндр с поршнем 1 (рис. 2), накрытый плоской стеклянной крышкой 2. В цилиндре находятся насыщенные пары воды или спирта. В камеру вводится исследуемый радиоактивный препарат 3, который образует ионы в рабочем объеме камеры. При резком опускании поршня вниз, т.е. при адиабатном расширении, происходит охлаждение пара и он становится перенасыщенным. В этом состоянии пар легко конденсируется. Центрами конденсации становятся ионы, образованные пролетевшей в это время частицей. Так в камере появляется туманный след (трек) ,



который можно наблюдать и фотографировать. Трек существует десятые доли секунды. Вернув поршень в исходное положение и удалив ионы электрическим полем, можно вновь выполнить адиабатное расширение. Таким образом, опыты с камерой можно проводить многократно.

По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека – оценить ее скорость. Помещение камеры в магнитное поле позволяет определить по кривизне трека отношение заряда частицы к ее массе (впервые предложено советскими физиками П. Л. Капицей и Д. В. Скобельцыным).

Пузырьковая камера. В 1952 г. Д. Глейзером было предложено использовать для обнаружения частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах (центрах парообразования), образующихся при движении быстрой заряженной частицы, появляются пузырьки пара, дающие видимый трек.

Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона обусловлено большей плотностью рабочего вещества. Пробеги частиц

вследствие этого оказываются достаточно короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере.

Метод толстослойных фотоэмульсий. Для регистрации частиц наряду с камерами Вильсона и пузырьковыми камерами применяются толстослойные фотоэмульсии. Ионизирующее действие быстрых заряженных частиц на эмульсию фотопластинки.

Метод фотоэмульсии был развит советскими физиками Л. В. Мысовским, Г. Б. Ждановым и др.

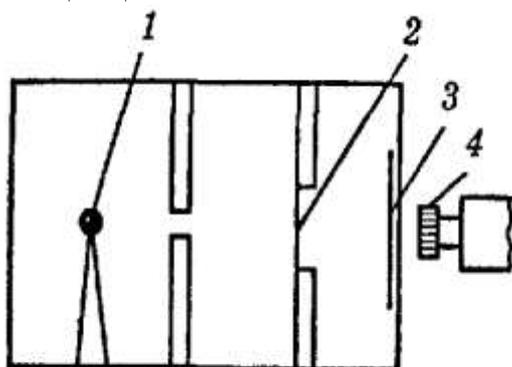
Быстрая заряженная частица, пронизывая кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При появлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зёрен серебра образует трек частицы.

По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы. Из-за большой плотности фотоэмульсии треки получаются очень короткими, но при фотографировании их можно увеличить. Преимущество фотоэмульсии состоит в том, что время экспозиции может быть сколько угодно большим. Это позволяет регистрировать редкие явления. Важно и то, что благодаря большой тормозящей способности фотоэмульсии увеличивается число наблюдаемых интересных реакций между частицами и ядрами.

Сцинтилляционный счетчик. Устройство для регистрации альфа-частиц – *спинтарископ*.

Основными деталями спинтарископа является экран 3, покрытый слоем сульфида цинка и короткофокусная лупа 4. Альфа-радиоактивный препарат помещают на конце стержня 1 примерно против середины экрана. При попадании альфа-частицы в кристаллы сульфида цинка возникает вспышка света.

Процесс преобразования кинетической энергии быстро заряженной частицы в энергию световой вспышки называется сцинтилляцией. сцинтилляция представляет собой одну из разновидностей явления люминесценции.



Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Дайте определения элементарных частиц.
2. Сформулируйте принцип зарядового сопряжения. Как была обнаружена первая античастица – позитрон?
3. Охарактеризуйте такие процессы взаимопревращения частиц, как аннигиляция и рождение пары.
4. Охарактеризуйте элементарные частицы – лептоны.
5. На какие подгруппы подразделяют барионы.
6. В чем состояла кварковая гипотеза М. Геллмана и Д. Цвейга.
7. Приведите важнейшие характеристики основных типов кварков. Как называют различные типы кварков.
8. Можно ли с помощью счетчика Гейгера регистрировать незаряженные частицы.
9. Можно ли с помощью камеры Вильсона регистрировать незаряженные частицы.
10. Какие преимущества имеет пузырьковая камера по сравнению с камерой Вильсона.
11. Объяснить принцип работы метод фотоэмульсий для регистрации частиц.

Лекция 11

Строение и развитие Вселенной.

Наша звездная система – Галактика

Астрономия – наука о Вселенной.

При наблюдении звездного неба даже невооруженным глазом можно увидеть группы звезд, которые получили название звездных скоплений. Звездные скопления наблюдаются двух типов: рассеянные и шаровые.

Типичным представителем рассеянного звездного скопления являются Плеяды, называемые в просторечии Стожарами. Размеры рассеянных звездных скоплений составляют 1... 10 – 15 пк. Ближайшие к Земле рассеянные звездные скопления находятся на расстоянии нескольких тысяч световых лет, их можно наблюдать в плоскости Млечного Пути.

Млечный Путь – светлая серебристая полоска, видная на безоблачном звездном небе. Более яркие и близкие звезды располагаются гуще по мере приближения к средней линии Млечного Пути, называемой галактическим экватором.

Плоскость галактического экватора – плоскость симметрии нашей звездной системы.

Исследования показали, что вся совокупность звезд Млечного Пути образует единую звездную систему, называемую Галактикой. Размеры Галактики грандиозны. В середине Галактики находится ядро – гигантское шаровое скопление звезд. Ядро Галактики видно с Земли в сторону созвездия Стрельца и представляет собой яркий участок Млечного Пути. От Земли до ядра Галактики 30 тыс. св. лет, а от одного до другого края Галактики – почти 100 тыс. св. лет. Все звезды вращаются вокруг центра Галактики. Период обращения Солнечной системы вокруг ядра Галактики составляет примерно 200 млн лет при скорости движения около 220 км/с. Всего в составе нашей Галактики более 100 млрд звезд, одной из которых является Солнце.

Одно из ближайших к Земле шаровых скоплений находится в созвездии Геркулеса. Шаровые скопления образуют в нашей Галактике сферическую систему с ярко выраженной концентрацией звезд к центру Галактики. Диаметры шаровых звездных скоплений измеряются десятками парсек, а количество входящих в них звезд насчитывает десятки и сотни тысяч.

Другие галактики. Бесконечность Вселенной

Установлено, что кроме нашей Галактики существует множество подобных ей звездных систем, также называемых галактиками.

Сравнивая нашу Галактику с другими галактиками, ученые определили, что наша Галактика, подобно галактикам в Андромеде и Треугольнике, имеет спиральное строение.

Форма галактик различна – существуют эллиптические (в частности, шаровые), чечевицеобразные, иглообразные, неправильные. Размер нашей Галактики меньше галактики в Андромеде, но больше Больших и Малых Магеллановых Облаков, которые являются спутниками нашей Галактики и расположены на расстоянии около 120 тыс. св. лет от нее. Все галактики вращаются вокруг своих осей, как и наша Галактика.

Особый интерес представляют галактики, являющиеся мощными дискретными источниками радиоизлучения. Их принято называть радиогалактиками. По мнению советского астрофизика академика В. А. Амбарцумяна, радиогалактика возникает в результате процесса разделения первоначальной массы на две удаляющиеся друг от друга галактики. Стадия деления – переход материи из более плотного состояния в менее плотное – вызывается взрывными процессами и сопровождается интенсивным радиоизлучением. Полагают, что радиогалактика – стадия, через которую проходит каждая галактика в ранний период своего развития. Наиболее известна радиогалактика Лебедь А.

Квезары – это мощные внегалактические источники электромагнитного излучения. Излучение квазаров в 10^1 – 10^4 раз превышает излучение всех звезд галактики. Одно из основных свойств квазаров – переменность их излучения в радио-, ИК- и оптическом диапазонах. Физическая природа активности квазаров еще до конца не раскрыта. Согласно существующим гипотезам, мощное излучение квазаров может быть обусловлено процессами столкновения звезд, вспышками сверхновых звезд, превращением в излучение энергии магнитных полей вращающегося массивного магнитоплазменного тела. Особый интерес квазары представляют как далекие объекты, участвующие в космологическом расширении Метагалактики. Изучение квазаров может пролить свет на ранние стадии эволюции Вселенной.

В созвездии Девы располагается огромное скопление галактик, диаметр этого скопления около 100 млн св. лет, а масса равна примерно квадриллиону солнечных масс. Такое скопление галактик получило название

Сверхгалактика. Все доступные области наблюдения Вселенной входят в состав системы, более грандиозной, чем Сверхгалактика, и называются Метагалактикой, границы которой пока остаются недоступными для наблюдения в самые мощные современные телескопы. Но и Метагалактика является лишь ничтожной частью бесконечной Вселенной.

Понятие о космологии

Космология – раздел астрономии, изучающий свойства Вселенной как единого целого.

Выводы космологии основываются на законах физики и данных наблюдательной астрономии. Важнейшим постулатом космологии является положение, согласно которому законы природы – законы физики, установленные на основе изучения весьма ограниченной части Вселенной, могут быть распространены на всю Вселенную.

Космологические теории различаются в зависимости от того, какие физические законы и принципы положены в их основу. Построенные на этих теориях модели должны допускать проверку для наблюдаемой области Вселенной, выводы теории должны подтверждаться наблюдениями или не противоречить им.

Космология начала развиваться на научной основе после открытия И. Ньютоном закона всемирного тяготения.

Согласно ньютоновской теории, пространство подчиняется евклидовой геометрии, где кратчайшими расстояниями между двумя точками являются отрезки прямых линий.

Пространство и время считаются абсолютными, т. е. их свойства не зависят от материи и ее движения.

Наряду с представлением о евклидовой геометрии трехмерного пространства складывается представление об однородности и изотропности бесконечной Вселенной. Действительно, если рассматривать сравнительно небольшие области Вселенной, то звезды распределены в них неравномерно. По мере развития астрофизических исследований было обнаружено, что звезды группируются в гигантские скопления – галактики, и что общая картина Вселенной представляется совокупностью отдельных скоплений галактик. Скопления галактик содержат тысячи галактик и их размеры составляют порядка нескольких мегапарсек (Мпк). Среднее расстояние между скоплениями галактик около 30 Мпк. Таким образом, в радиусе примерно 30 Мпк Вселенная является неоднородной, здесь имеются

отдельные структурные элементы, распределенные в пространстве неравномерным образом. В радиусе около 1000 Мпк содержится примерно одинаковое количество скоплений галактик, т. е. Вселенная приблизительно однородна и свойства Вселенной одинаковы по всем направлениям, т.е. Вселенная является изотропной. Итак, в больших масштабах Вселенную с большой степенью точности можно считать однородной и изотропной.

Из наблюдений постепенно складывалось представление о статичности Вселенной, т.е. неизменности ее строения со временем. В частности, на это указывало постоянство положения звезд и туманностей относительно друг друга. Видимые движения при этом сводились к периодическим движениям планет вокруг Солнца. Свойства пространства-времени неразрывно связаны с движущейся материей.

Расширяющаяся Вселенная

Современная космология базируется на работах А. Эйнштейна, А. А. Фридмана и Э. П. Хаббла и опирается на два главных наблюдаемых явления.

1. Галактики и их скопления равномерно распределены во Вселенной.
2. Линии спектров всех галактик (за исключением некоторых галактик из числа самых близких) смещены в красную сторону (красное смещение).

Первое явление подтверждает, что на больших масштабах Вселенная однородна и изотропна. Однородность Вселенной означает, что в произвольных одинаковых объемах содержится равное число галактик. Вселенная изотропна, т. е. в разных направлениях находится одинаковое число галактик.

Если второе явление рассматривать как эффект Доплера, то можно сделать вывод, что все галактики удаляются от нас со скоростью

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}.$$

Изучая характер движения галактик, американский астроном Э. П. Хаббл установил, что отношение $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, определяемое по спектру Галактики, пропорционально расстоянию R до Галактики, т.е. галактики удаляются («разбегаются») со скоростями v , пропорциональными расстояниям до них R :

$$v = HR,$$

где H – постоянная Хаббла, характеризующая скорость «разбегания» галактик.

В настоящее время принимают $H = (50 - 100) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

Последнее соотношение называют законом Хаббла. Его можно трактовать как подтверждение расширения наблюдаемой области Вселенной – Метагалактики. Значение постоянной Хаббла и закон Хаббла позволяют определить время t , прошедшее с начала расширения Вселенной при условии постоянной скорости расширения $t = (10 - 20)$ млрд лет. Это время примерно характеризует возраст Вселенной. Поскольку галактики имеют положительные скорости, пропорциональные расстояниям, можно сделать вывод, что в прошлом все галактики были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. Расширение приводит к охлаждению, т. е. в прошлом Вселенная была не только более плотной, но и более горячей, чем в настоящее время.

Итак, в основе определенных моделей Вселенной должны лежать предположения об ее однородности и изотропности в больших масштабах и основные уравнения и положения теории тяготения Эйнштейна о свойствах пространства-времени и его неразрывной связи с движущейся материей.

В 1922 – 1924 гг. на основе представлений об однородной, изотропной, бесконечной Вселенной и теории тяготения Эйнштейна советским математиком А. Фридманом получены теоретические результаты, свидетельствующие о том, что Вселенная, заполненная тяготеющим веществом, должна быть нестационарной. С течением времени она должна либо неограниченно расширяться, либо сжиматься. Но эти принципиально новые результаты получили признание лишь после открытия красного смещения, т. е. эффекта «разбегания» галактик. Из интерпретации закона Хаббла следует, что в некоторый момент времени в далеком прошлом все расстояния обращались в нуль. Отдельные галактики, звезды и другие небесные тела не могли существовать как изолированные объекты. Этот момент времени был моментом начала расширения Вселенной.

Таким образом, в настоящее время Вселенная расширяется. Этот процесс из-за сил гравитации протекает с замедлением. Расширение Вселенной приводит к снижению плотности и уменьшению замедления. Существуют два сценария будущего Вселенной: 1) плотность вещества во Вселенной достаточно мала и замедление мало – расширение будет протекать неограниченно долго; 2) плотность вещества во Вселенной достаточно велика, велико и замедление расширения – расширение прекратится и сменится сжатием. Критическая плотность $\rho_{кр}$ вещества отделяет один сценарий от другого (теоретические расчеты показывают, что

$\rho_{кр} \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3$). Если наблюдения покажут, что плотность вещества в настоящий момент $\rho > \rho_{кр}$, то расширение должно смениться сжатием, при $\rho < \rho_{кр}$ расширение будет длиться бесконечно долго. На основе существующего уровня наших знаний о распределении вещества во Вселенной принято считать, что реальная средняя плотность чуть меньше критической плотности. Если это представление верно, то реализуется второй сценарий – расширение будет протекать неограниченно долго.

Средняя плотность вещества влияет на геометрические свойства Вселенной, т. е. степень искривления пространства зависит от массы тяготеющего вещества – чем больше масса, тем сильнее кривизна. При больших массах кривизна может стать настолько велика, что приведет к «свертыванию» пространства. Пространство становится конечным, но безграничным. Если масса мала, то «свертывания» пространства не происходит и пространство является бесконечным. Первый случай отвечает «замкнутому» миру, второй – «открытому».

Модель горячей Вселенной

Для определения того, как происходило расширение Вселенной с момента начала процесса, какие процессы при этом протекали, необходимо провести расчеты при разных предположениях о расширении, о состоянии и составе вещества во Вселенной и сравнить результаты расчетов с наблюдениями.

Согласно модели расширяющейся Вселенной на основе закона Хаббла можно примерно установить момент времени начала расширения Вселенной. Расчеты показывают, что это произошло около 15 млрд лет назад. К настоящему времени наибольшее распространение получила модель горячей Вселенной, которую предложил в конце 40-х годов XX в. американский физик Дж. Гамов.

Согласно модели Гамова, современная наблюдаемая Вселенная представляет собой результат «Большого взрыва», т.е. катастрофически быстрого разлета материи, находившейся до того в сверхплотном и сверхгорячем – сингулярном (неописуемом) состоянии. Один из возможных сценариев эволюции Вселенной – следующий. Плотность вещества спустя 10^{-43} с после начала расширения («Большого взрыва») примерно в 10^{108} раз превосходила ядерную плотность. Температура вещества превышала десятки тысяч миллиардов градусов.

В космологии выделяют несколько периодов в эволюции Вселенной после «Большого взрыва». Каждый период характеризуется определенными процессами. В первоначальный период, который длился всего нескольких секунд, вещество Вселенной находилось в состоянии фотонной плазмы: на один миллиард фотонов (квантов света) приходилась только одна частица. Фотоны рождаются и уничтожаются при взаимодействии с элементарными частицами. Фотон рождается при взаимодействии частицы и античастицы. Частицы при этом исчезают (аннигилируют), и появляются фотоны. Тяжелые частицы рождаются из особого состояния материи – физического вакуума, в котором они имеются в скрытом, «виртуальном», состоянии. Тяжелые частицы и античастицы аннигилируют, и в результате появляются протоны, нейтроны, электроны, нейтрино и античастицы.

В первые пять минут после «Большого взрыва» практически произошли все события, определившие те свойства Вселенной, которые она имеет в настоящее время. Решающую роль здесь играли протоны и нейтроны, которые, взаимодействуя с электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино, превращаются друг в друга. Температура в результате расширения уменьшается. При этом протонов становилось больше, так как их масса меньше массы нейтронов и их образование энергетически выгоднее. Процесс создания избытка протонов прекращается из-за понижения температуры до того, как все нейтроны будут превращены в протоны. Заметим, что в первые мгновения после «Большого взрыва» фотонов было много (на один протон приходился 1 млрд фотонов). С течением времени это соотношение остается постоянным, но энергия фотонов становится меньше, потому что в результате эффекта Доплера частота фотонов, а значит, и их энергия уменьшаются. При падении температуры до 1 млрд К начинают образовываться простейшие ядра. Итак, нейтроны захватываются протонами, и происходит образование дейтерия. Реакция продолжается, и образуются ядра гелия, которые состоят из двух протонов и двух нейтронов. Одновременно образуется немного лития и изотопа гелия-3 (${}^3_2\text{He}$). К концу пятой минуты после «Большого взрыва» расширяющееся вещество состоит из ядер водорода – 70 % и ядер гелия – 30 %.

Температура становится ниже 1 млрд К, Вселенная перестает быть горячей, наступает следующий этап расширения Вселенной, который длится порядка 300 тыс. лет. Вещество Вселенной в это время представляет собой плазму, которая является непрозрачной для фотонов. При температуре порядка 4000 К начинается образование нейтральных атомов. Появляются

нейтральный водород и гелий. Вещество становится прозрачным для фотонов. Нейтральное вещество начинает собираться в некоторые образования, «комки». С этого момента начинается образование галактик.

Дополнительным доказательством верности гипотезы «Большого взрыва» явилось открытие в 1965 г. А. Пензиасом и Р. Вильсоном реликтового излучения. Возможность существования этого излучения была предсказана американским физиком-теоретиком С. Гамовым еще в 1949 г. Исследования показали, что интенсивность этого излучения почти строго постоянна для всех направлений, а распределение по длинам волн соответствует излучению абсолютно черного тела, имеющего температуру 3 К. Это излучение не связано, вероятно, ни с какими объектами Вселенной, существующими в настоящее время, а отражает распределение материи во Вселенной на начальной стадии ее развития. Если предположить, что «начальный взрыв» произошел порядка 15 – 20 млрд лет назад и в результате расширения пространства Вселенной ее температура начала резко падать, то расчеты приводят как раз к значению 3 К.

Такова гипотеза горячей Вселенной.

Строение и происхождение галактик

Галактики представляют собой гигантские скопления звезд, связанные между собой силами гравитации. Галактики содержат от нескольких миллионов до многих сотен миллиардов звезд. Наряду со звездами в состав галактик входят межзвездный газ, межзвездная пыль, космические лучи.

Первую удачную классификацию галактик по их внешнему виду предпринял Э. Хаббл в 1925 г. Он предложил относить галактики к одному из следующих трех типов: 1) эллиптические; 2) спиральные; 3) неправильные. Эллиптические галактики, имеющие вид правильных кругов или эллипсов, характеризуются высокой плотностью звезд и яркостью в центре с плавным уменьшением периферии. В большинстве эллиптических галактик очень мало газа – менее 0,1 % по массе.

Для спиральных галактик характерно наличие двух (иногда более) спиральных рукавов, образующих плоскую систему – «диск». Кроме диска в спиральных галактиках имеется сферическая составляющая, которая образуется объектами, располагающимися примерно сферически-симметрично вокруг центра галактики. В спиральных рукавах сосредоточено

много молодых ярких звезд и светящихся газовых облаков. Количество газа в спиральных галактиках составляет 1–15 % от общей массы.

К неправильным галактикам отнесены объекты, у которых отсутствует четко выраженное ядро и не обнаружена вращательная симметрия. Количество газа в неправильных галактиках может достигать до 50 % от общей массы. Предполагается, что эллиптические галактики составляют 17 %, спиральные – 80 и неправильные – 3 % от общего числа галактик.

В конце XX – начале XXI в. обнаружены звездные системы, которые не укладываются в данную классификацию. Эти галактики получили название «пекулярные». К их числу относятся, например, «компактные» галактики, обладающие высокой поверхностной яркостью, а также карликовые звездные системы с низкой светимостью.

Вопрос об образовании галактик является одним из сложнейших вопросов современной астрофизики. К настоящему времени имеются различные модели образования галактик. Так, российским физиком Я. Б. Зельдовичем была предложена конденсационная модель образования галактик в результате сжатия (конденсации) газовых сгустков. Согласно этой теории, в однородной и изотропной расширяющейся Вселенной возникают бесконечно малые неоднородности плотности вещества, которые в процессе расширения Вселенной усиливаются. Нарастание неоднородностей приводит к образованию мощных ударных волн, сжимающих газ в плотные газовые облака массой 10^{13} – 10^{15} масс Солнца. Позже эти облака в результате охлаждения и гравитационной неустойчивости распадаются на отдельные сгустки. Продолжая сжиматься и теряя при этом энергию на излучение, уплотнившееся вещество в результате своей эволюции превращается в современные галактики.

Эволюция галактики зависит от массы и начальной скорости вращения газового облака. Если начальное вращение отсутствует, то гравитация равномерно сжимает облако – образуется эллиптическая галактика.

Во вращающемся облаке газ концентрируется в галактической плоскости, перпендикулярной оси вращения, – образуется спиральная галактика, например наша Галактика, или Млечный Путь.

Чем больше начальная масса газового облака, тем сильнее гравитационное сжатие и тем быстрее образуется галактика.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Что называют галактическим экватором?
2. Какое строение имеет наша Галактика?
3. Как возникают радиогалактики?
4. Как вы понимаете бесконечность Вселенной?
5. Что изучает космология?
6. Сформулируйте закон Хаббла.
7. Расскажите о модели расширяющейся Вселенной
8. Изложите гипотезу горячей Вселенной.
9. Что такое реликтовое излучение?

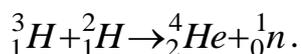
Лекция 12

Эволюция звезд. Гипотеза происхождения Солнечной системы.

Термоядерный синтез

Ранее отмечалось, что ядерная энергия может высвобождаться не только при делении тяжелых ядер, но также при слиянии (синтезе) легких ядер в более тяжелые. Эти реакции протекают при температуре 10^7 К и выше. При нормальных условиях слияние ядер невозможно, потому что положительно заряженные ядра испытывают огромные силы кулоновского отталкивания. При синтезе легких ядер задача сводится к тому, чтобы сблизить ядра на такие расстояния, при которых действие ядерных сил притяжения превысит кулоновские силы отталкивания. Для того чтобы произошло слияние атомных ядер, необходимо увеличить их подвижность, т.е. увеличить кинетическую энергию. Это достигается повышением температуры.

В результате слияния легких ядер высвобождается энергия, так как образовавшееся новое ядро имеет большую удельную энергию связи. Если при делении тяжелого ядра урана выделяется энергия порядка 1 МэВ на нуклон, то при синтезе дейтерия и трития образуется ядро гелия:



Ядро дейтерия имеет энергию связи 2,2 МэВ, трития – 8,5 МэВ, гелия – 28,3 МэВ; следовательно, можно вычислить энергию, выделяющуюся в процессе реакции: $28,3 \text{ МэВ} - (2,2 + 8,5) \text{ МэВ} = 17,6 \text{ МэВ}$, что в пересчете на один нуклон составляет $17,6/5 \approx 3,52 \text{ МэВ}$, т. е. почти в четыре раза превосходит эффект реакции деления. Поскольку реакция слияния легких атомных ядер в более тяжелые происходит при очень высоких температурах (10^7 К и выше), такие реакции получили название термоядерные.

Реакция слияния ядер дейтерия и трития составляет основу водородной бомбы. Запалом в такой бомбе служит атомная бомба, при взрыве которой возникает температура порядка 10^7 К, достаточная для протекания реакции синтеза (которая в данном случае является неуправляемой).

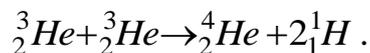
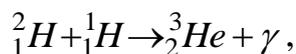
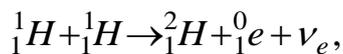
Энергия Солнца и звезд

Физическая природа звезд изучена еще недостаточно полно, чтобы можно было с уверенностью говорить о том, как возникают звезды, как возникло Солнце и какова судьба звезд. По современным представлениям звезды зарождаются группами или скоплениями в основном из водородно-

гелиевых туманностей, т.е. в некоторых местах пространства межзвездная пыль и газ сгущаются в тела больших размеров, что в результате последующего сжатия таких тел приводит к их разогреванию и свечению, т.е. к превращению в звезды.

Когда температура внутри тела поднимается достаточно высоко, там происходят процессы превращения водорода в более тяжелые химические элементы, что сопровождается выделением значительного количества энергии. В таком состоянии звезды могут находиться, по меньшей мере, миллиарды лет (например, Солнце).

Реакции синтеза протекают в недрах звезд, в том числе и Солнца. Солнце и солнцеподобные звезды состоят в основном из водорода – до 80 % и гелия – до 20 %. Температура в их недрах достигает 10^7 – 10^8 К. При такой температуре все атомы полностью ионизированы и представляют собой плазму. Таким образом, Солнце и звезды можно сравнить с гигантскими самоподдерживающимися термоядерными реакторами. Наиболее вероятной термоядерной реакцией, происходящей в недрах Солнца при $T = (1 - 2) \cdot 10^7$ К, является следующая:

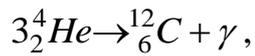


Эту цепочку термоядерных реакций, в результате которой четыре ядра водорода ${}^1_1\text{H}$ превращаются в одно ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, называют протон-протонным циклом. Средняя продолжительность последней реакции, завершающей цикл, около 1 млн лет, а энергетический эффект – около 13 МэВ. В целом энергетический эффект протон-протонного цикла составляет 27 МэВ.

Для звезд, более ярких, чем Солнце, характерен углеродный цикл.

Итогом углеродного цикла, как и протон-протонного, является превращение четырех ядер водорода в одно ядро гелия. Количество ядер углерода, участвующих в реакции, остается неизменным; они выполняют роль катализатора. В этом цикле в промежуточных реакциях из углерода образуется азот. Азот является побочным продуктом реакции превращения водорода в гелий.

После выгорания водорода в центре звезды при температуре $(1 - 2) \cdot 10^8$ К начинается горение гелия:



С выделением продуктов горения – углерода и кислорода, в результате у звезды образуется углеродно-кислородное ядро.

При температуре $T = 5 \cdot 10^8 - 10^9$ К загораются углерод и кислород, образующиеся при горении протоны и нейтроны участвуют в различных реакциях с ядрами, порождая элементы с порядковым номером в пределах $16 \leq Z \leq 28$.

Основной продукт горения углерода и кислорода – кремний.

При температуре $T > 2 \cdot 10^9$ К в тепловом излучении появляется много квантов с энергией, достаточной для отщепления альфа-частиц от кремния, серы, магния и др. Альфа-частицы могут присоединяться к более тяжелым ядрам, образуя элементы вплоть до железа, никеля, цинка.

Происхождение элементов с $Z > 30$ связывают с процессами захвата нейтронов. К ним относятся элементы вплоть до висмута.

Образование элементов тяжелее гелия происходит уже в современную эпоху.

Синтез элементов тяжелее железа проявляется во взрывных процессах (во вспышках сверхновых звезд). При этом газ выбрасывается в окружающее пространство и участвует в формировании звезд последующих поколений и других небесных тел.

Если на ранней стадии эволюции вещество галактики состояло исключительно из водорода и гелия, то в дальнейшем межзвездная среда обогатилась тяжелыми элементами и они уже в готовом виде входят в состав вновь рождающихся звезд. Таким образом, во Вселенной происходит процесс необратимости развития материального мира.

Эволюция звезд

Излучение звезды осуществляется за счет термоядерных реакций, протекающих в центре звезды. Расчеты моделей звезд показывают, что главной термоядерной реакцией является превращение четырех ядер водорода в ядра гелия (протон-протонный цикл), при этом происходит выгорание водорода, светимость и радиус звезды увеличиваются, а температура уменьшается. Температура в центре у звезд больших масс выше, поэтому такие звезды эволюционируют быстрее и превращаются в красных гигантов.

После выгорания водорода происходит сжатие ядра, состоящего уже из гелия, при этом температура повышается до 100 млн К и более и начинает протекать новая термоядерная реакция – образование атомов углерода из трех атомов гелия. Эта реакция сопровождается потерей массы и выделением энергии.

Окончательная судьба звезды зависит от ее массы. Если масса звезды меньше, чем 1,2 массы Солнца, то она завершает свою эволюцию как белый карлик.

Если масса звезды заключена между 1,2 и 3 массами Солнца, то она превращается в нейтронную звезду. На конечной стадии ее развития происходит мощный сброс оболочки, т. е. вспышка сверхновой звезды. Если масса звезды превышает три солнечных массы, то в результате процесса гравитационного сжатия радиус звезды становится столь малым, что гравитационное поле звезды начинает втягивать в себя всю окружающую материю. Эти звезды все поглощают, но ничего не испускают, даже излучение. Такие звезды называют черными дырами. Расчеты показывают, что если бы Земля превратилась в черную дыру, то ее радиус был бы 0,9 см. Так как черные дыры не излучают и их размеры очень малы, то обнаружить их можно лишь косвенным путем, а именно – по регистрации коротковолнового, ультрафиолетового или рентгеновского излучения, сопровождающего втягивание межзвездной материи в черную дыру.

Скорость эволюции пропорциональна скорости выделения энергии и обратно пропорциональна массе звезды.

Звезды-гиганты развиваются за несколько миллионов лет, звезды типа Солнца – за 8–11 млрд лет, белые карлики – за 10^{10} – 10^{11} лет.

Происхождение Солнечной системы

Солнечная система представляет собой группу небесных тел, объединенных в единую систему благодаря гравитационному взаимодействию, с центральным телом – Солнцем. Кроме Солнца в состав Солнечной системы входят восемь планет и их спутники, карликовые планеты и малые тела – астероиды, кометы, метеориты и др.

Планеты (от греч. planetos – блуждающие) – небесные тела, обращающиеся вокруг звезды (Солнца). Они, в отличие от звезд, не излучают света, а светят отраженным солнечным светом. Форма планет близка к шарообразной. Планеты Солнечной системы подразделяют на две группы: земная группа (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты

(Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Плутон, который раньше считался планетой, на XXVI Ассамблее Международного астрономического союза был квалифицирован как карликовая планета.

Сравнивая между собой эти две группы планет, можно сказать, что планеты земной группы характеризуются меньшей массой, меньшими размерами, большой плотностью и сравнительно малой скоростью обращения вокруг Солнца.

Ни одна из планет земной группы не имеет развитой системы спутников в отличие от планет-гигантов. Спутником Земли является Луна; Фобос и Деймос – спутники Марса. Земля – единственная планета земной группы, обладающая сильным собственным магнитным полем. Три планеты земной группы (Венера, Земля, Марс) обладают атмосферой. У Марса она сохранилась в очень разреженном состоянии, а у Меркурия полностью отсутствует. Только Земля обладает мощной гидросферой, которая сформировалась одновременно с планетой.

Следует заметить, что Венера имеет обратное вращение, т. е. противоположное направлению вращения Солнца вокруг своей оси.

Из особенностей планет-гигантов следует отметить их относительно большие размеры, малую плотность, хорошо развитую систему спутников. Так, у Юпитера имеется 14 спутников, у Сатурна – 10. Плоские светящиеся кольца вокруг Сатурна состоят из множества мелких частиц. Особенностью Урана является характер его вращения: он движется как бы «лежа на боку», плоскость его экватора перпендикулярна плоскости орбиты.

Наиболее проработанный в настоящее время сценарий рождения Солнечной системы, которого придерживается большинство астрономов и астрофизиков, следующий: существовало протопланетное облако межзвездного вещества массой 10^5 солнечных масс, плотность которого порядка 10^6 молекул в 1 см^3 , температура $20 - 100 \text{ К}$. Во время взрыва сверхновой звезды под действием ударной волны межзвездное вещество начало сжиматься, температура стала увеличиваться и за несколько миллионов лет достигла $(1,0 - 1,5) \cdot 10^7 \text{ К}$. За счет сжатия протопланетное вещество превратилось в линзовидный диск с новой звездой (Солнце), в которой шли термоядерные реакции (примерно 4,7 млрд лет назад). В результате медленного вращения линза превратилась в тонкий диск, который распался на гигантские кольца, окружающие Солнце. Существует много моделей, рассматривающих превращение колец диска из межзвездного вещества в планеты. В настоящее время предпочтительнее следующая: эти

кольца уплотнялись, частицы вещества колец слипались, образуя зародыши планет – планетеземали. Вследствие притяжения колец друг к другу зародыши планет росли. Наибольшего размера достигли девять зародышей, которые впоследствии превратились в планеты. Ближе к Солнцу температура пылинок была выше, и здесь образовались сравнительно небольшие планеты земной группы, состоящие из тугоплавких каменистых веществ, металлов и их оксидов и содержащие очень мало легких газов и воды.

Дальше от Солнца, где было намного холоднее, на пылинках намерзал лед, а также углекислый газ, метан, аммиак. Там образовались планеты-гиганты, в составе которых значительно больше воды, аммиака и метана, чем металлов и каменистых веществ.

Гипотеза образования планет путем объединения твердых тел и частиц выдвинута выдающимся советским ученым академиком О. Ю. Шмидтом. Она заменила представления о конденсации планет из газовых сгустков и объяснила разделение планет по физической природе на две группы. Впоследствии эта гипотеза была подтверждена физико-химическими исследованиями состава и структуры метеоритов.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие реакции называют термоядерными?
2. Расскажите о балансе энергии при синтезе дейтерия и трития.
3. В чем заключается проблема термоядерной энергетики?
4. Какие термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и звезд?
5. Как происходит развитие звезд?
6. Назовите планеты, входящие в состав Солнечной системы.
7. Изложите гипотезу образования планет Солнечной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева ; В. Ф. Дмитриева. – 7-е изд., испр. и доп. – Москва: Академия, 2020. – 496 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446889730. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/413933/>. – Текст: электронный.

Дополнительная литература

1. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева; В. Ф. Дмитриева. – 4-е изд., стер. – Москва: Академия, 2019. – 256 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446886579. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/418069/>. – Текст: электронный.

2. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Контрольные материалы: учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева, Л.И. Васильев; В. Ф. Дмитриева, Л.И. Васильев. – Москва: Академия, 2019. – 112 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446883202. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/405727/>. – Текст: электронный.

3. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Лабораторный практикум: учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева, А.В. Коржуев, О.В. Муртазина; В. Ф. Дмитриева, А.В. Коржуев, О.В. Муртазина. – 5-е изд., стер. – Москва: Академия, 2019. – 160 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446883196. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/413933/>. – Текст: электронный.

4. Айзензон, А. Е. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / А. Е. Айзензон. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 335 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-00795-4. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/449185> (дата обращения: 30.01.2020).

5. Горлач, В. В. Физика. Задачи, тесты. Методы решения: учебное пособие для среднего профессионального образования / В. В. Горлач. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 301 с. — (Профессиональное образование).

образование). — ISBN 978-5-534-08112-1. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/449119> (дата обращения: 30.01.2020).

6. Горлач, В. В. Физика: учебное пособие для среднего профессионального образования / В. В. Горлач. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 215 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-09366-7. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/449062> (дата обращения: 30.01.2020).

7. Трофимова, Т. И. Руководство к решению задач по физике: учебное пособие для среднего профессионального образования / Т. И. Трофимова. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 265 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-9916-7003-6. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/426398> (дата обращения: 30.01.2020).