Автономная некоммерческая организация
профессионального образования
«Технико - экономический колледж»

Канарейкин А. И.

Лекции
по дисциплине
«Физика»

Подольск 2019

Канарейкин А. И.

Физика: лекции по дисциплине «Физика» – Подольск, 2019 г. – 139 с. В учебном пособии изложены все базовые понятия разделов «Механика, молекулярная физика и термодинамика, электростатика, электродинамика, квантовая физика, начала астрономии» программы дисциплины «Физика» для специальностей 09.02.04 «Информационные системы».

Предназначено для преподавателей и обучающихся.

Рассмотрено на заседании педагогического совета, протокол № 1 от «11» июня 2019 г.

Составитель: Канарейкин Алдександр Иванович, к.т.н.

АННОТАЦИЯ

1.1. Нормативная база

Лекции разработаны на основании следующих нормативных документов:

- программы подготовки специалистов среднего звена (далее ППССЗ), федерального государственного образовательного стандарта (далее – ФГОС) по специальности среднего профессионального образования (далее – СПО) 09.02.04 «Информационные системы».

– рабочей программы учебной дисциплины «Физика».

1.2 Общие положения

Данное пособие рекомендовано для преподавателей и учащихся 1 курса дневной формы обучения.

Занятия по учебной дисциплине «Физика» проводятся за счет учебного времени, выделяемого ППСЗ ФГОС СПО.

Содержание пособия отвечает требованиям к уровню подготовки обучающихся, предусмотренных ППСЗ ФГОС СПО.

Оглавление

РАЗДЕЛ 1. МЕХАНИКА 6

Тема 1.1. Кинематика 6

Тема 1.2. Динамика 12

Тема 1.3. Законы сохранения в механике 16

Тема 1.4. Механические колебания и волны 23

РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА 28

Тема 2.1. Молекулярная физика 28

Тема 2.2. Термодинамика 31

РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. 46

Тема 3.1. Электрические взаимодействия 46

Тема 3.2. Свойства электрического поля 50

РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. 57

Тема 4.1. Законы постоянного тока 57

Тема 4.2. Магнитные взаимодействия 61

Тема 4.3. Электромагнитное поле 69

Тема 4.4. Оптика 77

РАЗДЕЛ 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА 84

Тема 5.1. Кванты и атомы 84

Тема 5.2. Атомное ядро и элементарные частицы 94

РАЗДЕЛ 6. ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ 116

7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ 126

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 138

Введение

Физика как наука о наиболее общих законах природы, выступая в качестве учебной дисциплины, вносит существенный вклад в систему знаний об окружающем мире. Она раскрывает роль науки в экономическом и культурном развитии общества, способствует формированию современного научного мировоззрения.

В данной работе последовательно вводятся все базовые понятия разделов физики «Механика, молекулярная физика и термодинамика, электростатика, электродинамика, квантовая физика, начала астрономии», предусмотренные программой и Государственными образовательными стандартами среднего профессионального образования, формулируются основные теоремы, большая часть которых не доказывается. Рассматриваются основные задачи и методы их решения и технологии применения этих методов к решению практических задач. Изложение сопровождается подробными комментариями и многочисленными примерами.

В даном пособии содержатся краткое изложение основных теоретических понятий, законов и формул, примеры решения прикладных задач и задачи для самостоятельного решения.

Методические указания предназначены для студентов заочной и дневной форм обучения.

РАЗДЕЛ 1. МЕХАНИКА

Классическая механика или механика Ньютона изучает движение тел, которое состоит в перемещении тел или их частей друг относительно друга. Механику можно разделить на два раздела: кинематику и динамику.

Кинематика изучает движение тел, не интересуясь причинами, обуславливающими это движение.

Динамика изучает движение тел в связи с теми причинами (взаимодействиями между телами), которые обуславливают тот или иной характер движения.

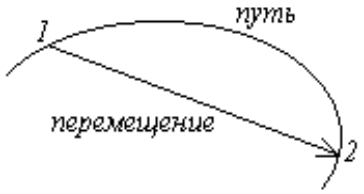
Если мы собираемся изучить движение какого-либо тела, то обязательно нужно указать, по отношению к каким другим телам происходит данное движение. Кроме того, для описания движения необходимо также определять время. Это делается с помощью часов.

Совокупность неподвижных друг относительно друга тел, по отношению к которым рассматривается движение, и отсчитывающих время часов образует *систему отсчета.*

Для того, чтобы получить возможность описывать движение количественно, приходится связывать с телами, образующими систему отсчета, какую-либо (например, декартову) *систему координат.*

Тема 1.1. Кинематика

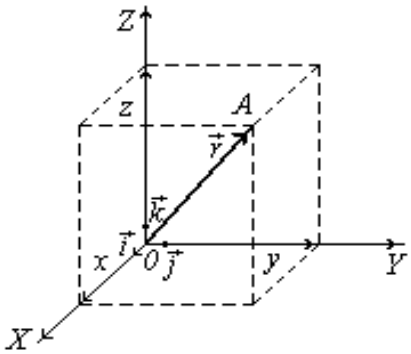
Материальная точка – это тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Материальная точка при своем движении описывает некоторую линию, которая называется *траекторией*. В зависимости от формы траектории различают прямолинейное движение, движение по окружности, криволинейное движение.



Путь - это расстояние между точками *1* и *2*, отсчитанное вдоль траектории.

Перемещение - это прямолинейный отрезок, проведенный из точки *1* в точку *2*.

Существуют три способа описания движения материальной точки: координатный, векторный и естественный.



1) Координатный способ:

Если с системой отсчета связать декартову систему координат (*X, Y, Z*), то положение материальной точки *A* можно задать с помощью координат (*x, y, z*). Траекторию движения мы определим, если будем знать функцию $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$.

2) Векторый способ:

В этом случае достаточно выбрать в системе отсчета точку *O* начала отсчета. Положение точки *A* будет определяться вектором $\vec{r}$, проведенным из начала отсчета в данную точку *A*. Этот вектор $\vec{r}$ называется*радиус – вектором* точки *A*. Траектория движения будет определяться функцией $\vec{r}(t)$. Как мы видим векторный способ описания движения более экономный, поскольку требует определения одной функцией $\vec{r}(t)$, правда, векторной функции от времени *t*.

Для того, чтобы установить связь между этими двумя способами описания, введем три единичных вектора, орты $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, направленных вдоль осей *X, Y, Z*, соответственно. Тогда, как видно из рисунка,

$$\vec{r} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} + z\,\vec{k},$$

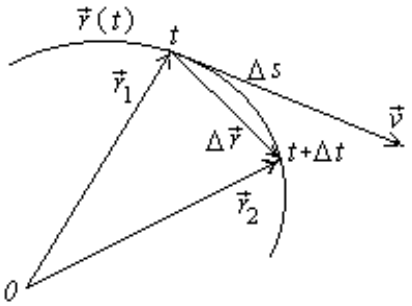
а модуль радиус–вектора $\vec{r}$ равен

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

3) Естественный способ:

При естественном способе описания движения материальной точки, необходимо знать траекторию движения материальной точки. Тогда положение точки на траектории в разные моменты времени будет задаваться функцией пути от времени: $s(t)$.

Скорость при криволинейном движении материальной точки



Пусть материальная точка движется по траектории $\vec{r}(t)$, и пусть в момент времени t она находится в точке *1*, описываемой радиус-вектором $\vec{r}_1$. Рассмотрим достаточно близкий следующий момент времени $t + \Delta t$.

В этот момент времени материальная точка находится в точке *2*, и положение ее описывается радиус-вектором $\vec{r}_2$. Тогда $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, будет *перемещение* материальной точки за время Δt, а величина $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ будет представлять среднюю скорость точки на участке траектории *1→2*. Мгновенную скорость $\vec{v}$ определим как предел при $t \to 0$, т.е. как производную от радиус-вектора $\vec{r}$.

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}$$ *- скорость при криволинейном движении материальной точки.*

Как видно из рисунка скорость $\vec{v}$ направлена по касательной к траектории. Далее при $\Delta t \to 0$ $\Delta r \to \Delta s$, и модуль скорости v равен производной от пути по времени

$$v = \frac{ds}{dt}$$ - *модуль вектора скорости.*

Как всякий вектор, вектор скорости $\vec{v}$ можно выразить через его проекции на оси координат:

$$\vec{v} = v_x\,\vec{i} + v_y\,\vec{j} + v_z\,\vec{k} = \dot{x}\,\vec{i} + \dot{y}\,\vec{j} + \dot{z}\,\vec{k}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$ - *модуль вектора скорости.*

Ускорение при криволинейном движении материальной точки

В механике вводится еще одна важная характеристика движения – *ускорение*, т.е. скорость изменения вектора скорости $\vec{v}$ во времени:

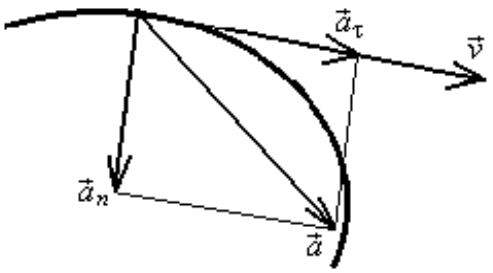
$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{r}}$$ *- ускорение при криволинейном движении материальной точки.*

Учитывая определение скорости $\vec{v}$, ускорение $\vec{a}$ есть вторая производная от радиус-вектора $\vec{r}$ по времени *t* (две точки означают вторую производную по времени *t*). Легко установить связь с координатным представлением ускорения:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k} = \ddot{x}\vec{i} + \ddot{y}\vec{j} + \ddot{z}\vec{k}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$ *- модуль вектора ускорения.*

Особенно удобен естественный способ представления ускорения.



В общем случае криволинейного движения ускорение $\vec{a}$ направлено под некоторым углом к скорости $\vec{v}$. Представим вектор $\vec{a}$ в виде суммы двух векторов, один из которых направлен по скорости $\vec{v}$, т.е. по касательной, а второй по нормали к траектории в этой точке:

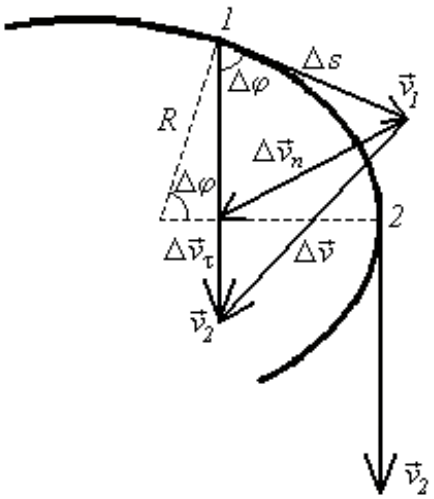
$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n .$$

Эти две сотавляющие ускорения имеют специальные названия:

$\vec{a}_\tau$ *– тангенциальное ускорение,*

$\vec{a}_n$ *- нормальное ускорение.*

Приступим теперь к определению $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$. Для этого нарисуем траекторию движения $\vec{r}$ (*t*) и снова выберем два близких момента времени *t* и *t* + Δ*t*.



В момент времени t_M материальная точка находилась в точке *1* и скорость ее равнялась $\vec{v}_1$, а в момент времени *t* + Δ*t* - в точке *2* и скорость ее равнялась $\vec{v}_2$. За время Δ*t* вектор скорости $\vec{v}$ изменился как по модулю, так и по направлению. Для того, чтобы определить $\Delta\vec{v}$, перенесем вектор $\vec{v}_2$ в точку *1* и представим $\Delta\vec{v}$ в виде суммы двух векторов $\Delta\vec{v}_n$ и $\Delta\vec{v}_\tau$. При этом модуль вектора $\Delta v_\tau = v_2 - v_1$.

$$\Delta\vec{v} = \Delta\vec{v}_\tau + \Delta\vec{v}_n .$$

Согласно определению ускорения:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}_\tau}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}_n}{\Delta t} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n .$$

1) Как видно из построения, $\Delta v_\tau = \Delta v$, и модуль вектора $\vec{a}_\tau$ равен производной от модуля вектора скорости, т.е.

$a_\tau = \dfrac{dv}{dt}$ - *тангенциальное ускорение при криволинейном движении.*

2) Для нахождения модуля вектора $\vec{a}_n$, сделаем дополнительные построения, а именно, в точках *1* и *2* проведем нормали к траектории и будем считать достаточно малый участок кривой *1–2* дугой окружности радиуса R. Тогда $\Delta s = R\Delta\varphi$, откуда следует, что

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta s}{R} \quad . \qquad\qquad .$$

Зная угол $\Delta\varphi$, найдем модуль вектора $\Delta\vec{v}_n$:

$$\Delta v_n = v_1\Delta\varphi = \frac{v_1\Delta s}{R}$$

Возвращаясь к определению a_n, находим

$$a_n = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{v_1\Delta s}{R\Delta t} = \frac{v^2}{R}$$

$$a_n = \frac{v^2}{R}$$

- нормальное ускорение при криволинейном движении,

где R- радиус кривизны траектории.

Рассмотрим два частных случая:

1) *Равномерное движение материальной точки по окружности*: $v = const$.

Тогда тангенциальное ускорение равно нулю и полное ускорение равно нормальному, т.е. центростремительному ускорению:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = 0$$

$$a = a_n = \frac{v^2}{R}$$

2) *Прямолинейное движение материальной точки*:

В этом случае радиус кривизны траектории равен бесконечности и нормальное ускорение равно нулю. Полное ускорение равно тангенциальному и направлено вдоль направления движения: если $a > 0$, по направлению движения, если $a < 0$, против направления движения.

$$R = \infty \Rightarrow a_n = \frac{v^2}{R} = 0$$

$$a = a_\tau = \frac{dv}{dt}$$

Движение по окружности

Поступательное движение - это такое движение, при котором любая прямая, связанная с движущимся телом, остается параллельной самой себе.

Вращательное движение – это такое движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой *осью вращения*. Ось вращения может находиться и вне тела.

Вращение твердого тела описывается углом поворота $\varphi(t)$, на который повернулось тело за время t. Поворот тела на некоторый угол φ можно задать в виде отрезка, длина которого равна φ, а направление совпадает с осью, вокруг которой производится поворот. Направление поворота и изображающего его отрезка связывается *правилом правого винта*, т.е. направле-

ние отрезка должно быть таким, чтобы, глядя вдоль него, мы видели поворот совершающимся по часовой стрелке. Повороты на конечные углы складываются не по правилу параллелограмма и поэтому не являются векторами. Иначе обстоит дело для поворотов на очень малые углы $\Delta\varphi$. В этом случае два совершаемых последовательно малых поворота $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ обуславливают такое же перемещение любой точки тела, как и поворот $\Delta\varphi_3$, получаемый из $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ сложением по правилу параллелограмма, т.е. очень малые повороты можно рассматривать как векторы $\vec{\Delta\varphi}$, и в нашем случае

$$\vec{\Delta\varphi}_3 = \vec{\Delta\varphi}_1 + \vec{\Delta\varphi}_2 .$$

Введем векторную величину

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\vec{\Delta\varphi}}{\Delta t} = \frac{\vec{d\varphi}}{dt}$$ - *угловая скорость вращающегося тела,*

где Δt - время, за которое совершается поворот $\vec{\Delta\varphi}$. Угловая скорость ω измеряется в радианах за 1с. $[\omega]$ = 1радиан/с = $1с^{-1}$.

Угловая скорость $\vec{\omega}$ направлена вдоль оси, вокруг которой вращается тело, в сторону, определяемую правилом правого винта. Модуль угловой скорости равен $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$.

Вращение с постоянной угловой скоростью называется *равномерным вращением*. Если вращение является равномерным, то $\omega = \frac{\varphi}{t}$, где φ - конечный угол поворота за время t. Равномерное вращение можно характеризовать *периодом обращения T* - временем, в течение которого тело делает один оборот, т.е. поворачивается на угол 2π. Тогда

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

откуда

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

Число оборотов единицу времени или *частота вращения n* равна:

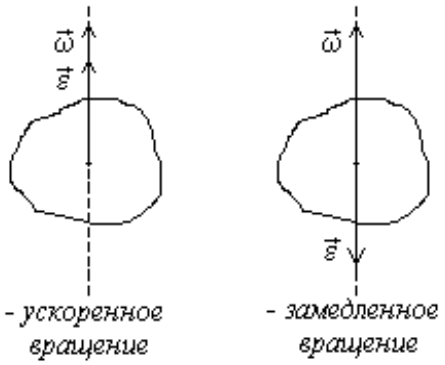
$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \Rightarrow \omega = 2\pi n$$ - *связь угловой скорости с частотой вращения.*

Вектор $\vec{\omega}$ может изменяться как за счет изменения скорости вращения тела вокруг оси, так и за счет поворота оси вращения в пространстве. Пусть за время Δt вектор $\vec{\omega}$ получает приращение $\Delta\vec{\omega}$. Изменение вектора угловой скорости со временем характеризуется величиной, которая называется *угловым ускорением* и определяется следующим образом:

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\vec{\Delta\omega}}{\Delta t} = \frac{\vec{d\omega}}{dt}$$ - *угловое ускорение вращающегося тела.*

Угловое ускорение ε измеряется в радианах за $1с^2$, т.е. $[\varepsilon]$ = 1радиан/$с^2$ = $1с^{-2}$.

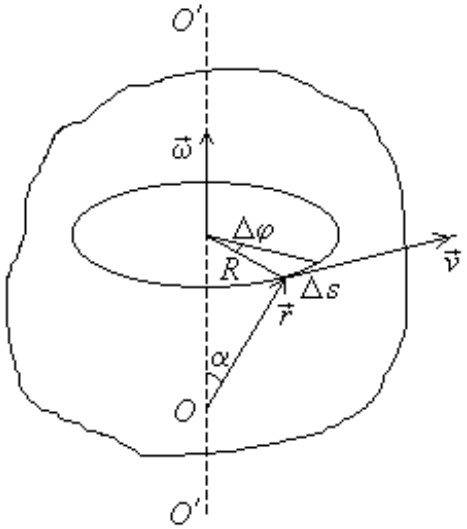
Если ось вращения неподвижная, то угловое ускорение направлено вдоль оси вращения. При этом возможны два случая:



В частных случаях равномерного и равнопеременного вращения можно провести аналогию с соответствующими случаями прямолинейного поступательного движения:

Поступательное движение	*Вращательное движение*
$\boldsymbol{a = 0}$ $v = const$ $s = vt$ – – – – – – – – – – – –	$\boldsymbol{\varepsilon = 0}$ $\omega = const$ $\varphi = \omega t$ – – – – – – – – – – – –
$\boldsymbol{a = const}$ $v = v_0 + at$ $s = v_0 t + at^2/2$	$\boldsymbol{\varepsilon = const}$ $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$ $\varphi = \omega_0 t + \varepsilon t^2/2$

Отдельные вращающегося тела имеют различные линейные скорости $\vec{v}$. Скорость каждой из точек непрерывно изменяет свое направление. Величина скорости v определяется скоростью вращения тела ω и расстоянием R рассматриваемой точки от оси вращения. Пусть за малый промежуток времени Δt тело повернулось на угол $\Delta\varphi$. Точка, находящаяся на расстоянии R от оси, проходит при этом путь $\Delta s = R\Delta\varphi$. Линейная скорость точки равна



$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} R\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R\frac{d\varphi}{dt} = R\omega,$$

т.е. $$v = \omega R. \qquad (1)$$

Теперь найдем выражение, связывающее векторы $\vec{v}$ и $\vec{\omega}$. Положение рассматриваемой точки тела будем определять радиус-вектором $\vec{r}$. Как видно из рисунка, $R = r\sin\alpha$, и формула (1) примет вид

$$v = \omega r \sin\alpha,$$

откуда следует

$\vec{v} = [\vec{\omega}\,\vec{r}]$ - *связь между линейной и угловой скоростью для вращающегося твердого тела.*

Ускорение отдельной точки вращающегося тела представим в виде суммы

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n .$$

Нормальное ускорение a_n равно:

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R \ .$$

Тангенциальное ускорение a_τ равно:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d\omega}{dt} R = \varepsilon R .$$

Полное ускорение a равно:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = R\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4} \ .$$

Тема 1.2. Динамика

В основе классической механики лежат три закона динамики, сформулированные Ньютоном в 1687г.

***Первый закон Ньютона*:** *Всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.*

Первый закон Ньютона выполняется не во всякой системе отсчета. Система отсчета, в которой выполняется первый закон Ньютона, называется *инерциальной системой отсчета*. Инерциальных систем отсчета существует бесконечное множество. Любая система отсчета, движущаяся относительно некоторой инерциальной системы прямолинейно и равномерно (т.е. с постоянной скоростью), будет также инерциальной.

Опытным путем установлено, что система отсчета, центр которой совмещен с Солнцем, а оси направлены на соответствующим образом выбранные звезды, являются инерциальной. Эта система называется *гелиоцентрической системой отсчета.*

Силы в механике

Силы трения — тангенциальные (направленные по касательной) силы, возникающие при соприкосновении поверхностей тел и препятствующих их относительному движению.

Внешнее (сухое) трение — трение между поверхностями соприкасающихся твердых тел при их относительном перемещении, причем между ними отсутствуют прослойки газа или жидкости.

Сухое трение включает в себя трение покоя, трение скольжения и трение качения.

Трение покоя — трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

Сила трения покоя — сила трения, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого.

Максимальное значение силы трения, при котором скольжение еще не наступает, называется максимальной силой трения покоя F_{Tpmax}. Относительное перемещение тела возникает при условии: $F > F_{Tpmax}$.

Максимальная сила трения покоя:

$$F_{\text{тр}\,\max} = \mu_0 N,$$

где ро — коэффициент трения; N — сила нормального давления (рис. 1, а).

Трение скольжения — трение при относительном движении соприкасающихся тел.

Сила трения скольжения:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где р — коэффициент трения скольжения.

Сила трения покоя находится в пределах от нуля до N (рис. 1, б), причем максимальная сила трения покоя равна силе трения скольжения: $F_{\text{тр}\,\max} = F_{\text{тр}}$.

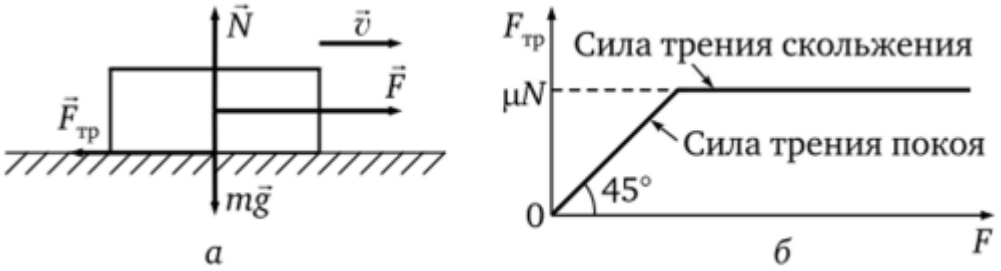


Рис. 1. Сила трения.

Примеры определения силы трения скольжения на ровной и наклонной поверхностях приведены на рис. 2.

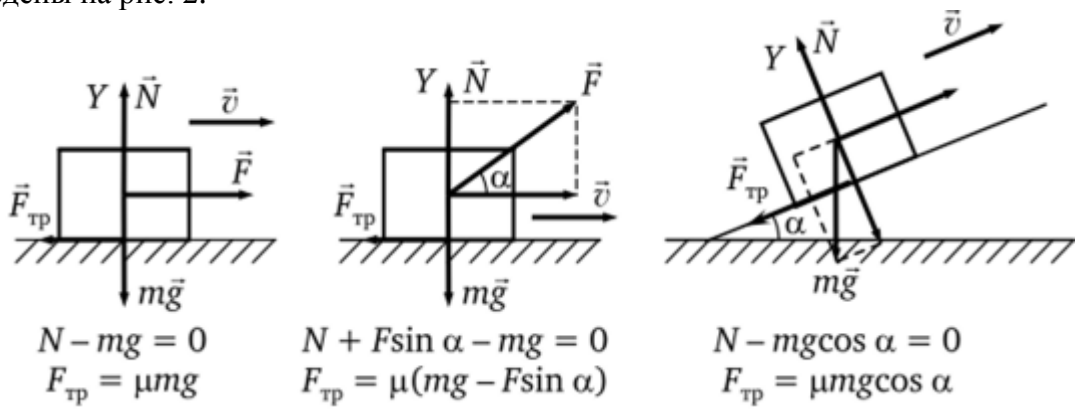


Рис. 2. Сила трения скольжения.

Трения качения — трение, при котором одно тело катится по поверхности другого.

Силы трения могут быть разной природы, но в результате их действия механическая энергия всегда превращается во внутреннюю энергию соприкасающихся тел.

Деформация тел — изменение формы или объема тела под действием внешних сил.

Упругая деформация — деформация, которая исчезает после прекращения действия внешней силы.

Закон Гука: сила упругости (рис. 3, а), возникающая при деформации, прямо пропорциональна удлинению тела и направлена противоположно перемещению частиц тела относительно других частиц при деформации:

$$F_{упр} = -kx,$$

где *к* — коэффициент упругости или жесткость пружины.

Единица жесткости пружины: ньютон на метр (Н/м).

График зависимости модуля силы упругости от модуля деформации представлен на рис. 3, *б,* на рис. 3, *в* — график зависимости проекции силы упругости от координаты.

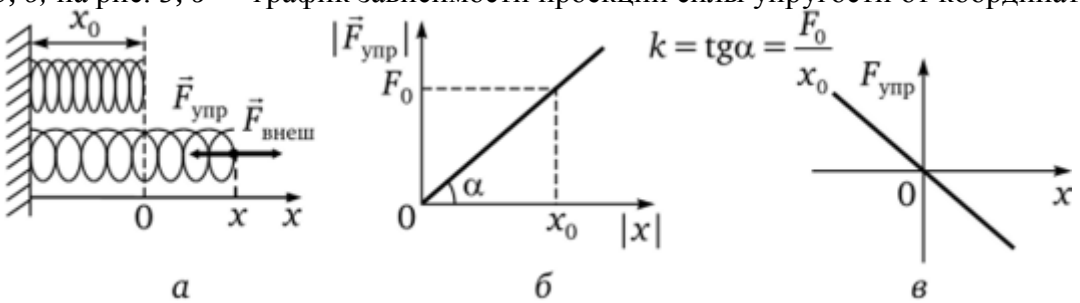


Рис. 3. График зависимости модуля силы упругости от модуля деформации.

Силами упругости являются: сила нормальной реакции опоры (*N*), сила натяжения нити (Г) и вес тела (Р).

Закон всемирного тяготения: между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения (рис. 4), прямо пропорциональная произведению масс этих точек m_1 и $т_2$ и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними $г^2$:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где G = 6,67 • 10~^{п} Н • $м^2/кг^2$ — гравитационная постоянная.

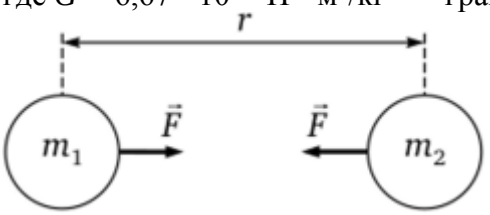


Рис. 4. Притяжение тел.

Сила тяжести — сила притяжения, действующая на любое тело, находящееся вблизи земной поверхности:

$$\vec{F}_{тяж} = m\vec{g},$$

где m — масса тела; g — ускорение свободного падения. Ускорение свободного падения на высоте h над Землей:

$$g_h = G\frac{M}{(R+h)^2},$$

где M, R — масса и радиус Земли соответственно.

Вес тела — сила, с которой тело вследствие его притяжения к Земле действует на горизонтальную опору (или подвес), удерживающую тело от свободного падения.

Если тело движется в поле тяготения Земли с ускорением a^g под действием силы N, то в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}.$$

Тогда вес тела:

$$\vec{P} = -\vec{N} = m(\vec{g} - \vec{a}) = \vec{F}_{тяж} - m\vec{a},$$

где $Ё_{хяж} = mg$ — сила тяжести.

Отсюда в зависимости от характера движения:

а) вес тела равен силе тяжести (рис. 5, а), если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно:

$$(\vec{v} = 0, \vec{a} = 0); P = N = mg)$$

б) вес тела больше силы тяжести (рис. 5, б), если тело движется вверх с ускорением:

$$P = N = m(g + a);$$

в) вес тела меньше силы тяжести (рис. 5, в), если тело движется вниз с ускорением:

$$P = N = m(g - a);$$

г) тело будет невесомым, если тело движется с ускорением $a = g$ по любой траектории в любом направлении.

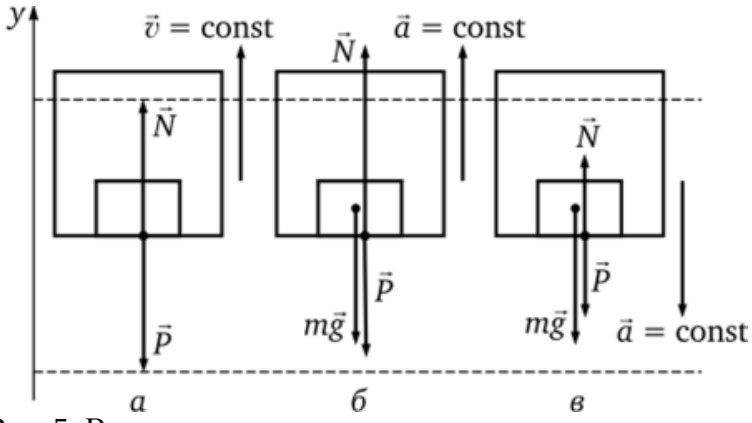


Рис. 5. Вес тела.

Невесомость — состояние тела, когда его вес равен нулю, т. е. при движении тела с ускорением свободного падения.

Первая космическая (круговая) скорость (v_1) — минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало спутником другого тела (планеты или какого-нибудь массивного небесного тела).

Для спутников Земли, по второму закону Ньютона

$$G\frac{mM}{(R+h)^2} = \frac{mv_1^2}{R+h}.$$

Если спутник движется вблизи поверхности Земли, тогда $R + h \sim R$ (если принять $h = 0$, R — радиус Земли) и $g = GM/R^2$. Первая космическая скорость вблизи поверхности Земли:

$$v_1 = \sqrt{G\frac{M}{R+h}} = \sqrt{G\frac{M}{R^2}R} = \sqrt{gR} = 7{,}9 \text{ км/с}.$$

Вторая космическая скорость (v_2) — минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и превратиться в спутник Солнца:

$$v_2 = \sqrt{2gR} = \sqrt{2}v_1 = 11{,}18 \text{ км/с}.$$

Третья космическая скорость (v_3) — минимальная начальная скорость, которую надо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца. Третья космическая скорость v_3 = 16,7 км/с.

Всякое тело противится попыткам изменить его состояние движения. Это свойство тел называется *инертностью*. В качестве количественной характеристики инертности используется величина, называемая *массой* тела m. Для количественной характеристики взаимодействия тел или полей вводится физическая величина, называемая *силой* $\vec{F}$

Воздействие на данное тело со стороны других тел вызывает изменение его скорости. Опыт показывает, что одинаковые воздействия на разные тела, вызывают разные по величине изменения скоростей этих тел. Чтобы описать этот опытный факт, вводится понятие *импульса* тела или *количества движения:*

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

***Второй закон Ньютона*:** *Скорость изменения импульса тела равна геометрической сумме сил, действующих на данное тело:*

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}i.$$

Подставляя сюда выражение для импульса тела $\vec{p} = m\vec{v}$, получим еще одну формулировку второго закона Ньютона:

Произведение массы тела на его ускорение равно геометрической сумме сил, действующих на тело:

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i \text{ - } \textit{второй закон Ньютона.}$$

Всякое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия: если тело *1* действует на тело *2* с силой $\vec{F}_{21}$, то и тело *2* в свою очередь действует на тело *1* с силой $\vec{F}_{12}$.

Третий закон Ньютона: *Силы с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению:*

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \text{ - } \textit{третий закон Ньютона.}$$

Эти силы не компенсируют друг друга, поскольку приложены к разным телам.

Тема 1.3. Законы сохранения в механике

Законы Ньютона позволяют решить любую задачу классической механики. Они устанавливают уравнения движения тела, которые в общем случае являются нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка и могут быть решены только численными методами. В некоторых случаях уравнения движения представляют собой систему линейных дифференциальных уравнений, решение которых может быть представлено в аналитическом виде, т.е. в виде некоторых известных функций. В любом случае решение уравнений движения тела может представлять серьезную математическую проблему.

Но в механике можно ввести физические величины, которые при определённых условиях сохраняются во времени и могут существенно упростить решение задач механики. Таких физических величин три: *импульс, энергия и момент импульса*. Наличие законов сохранения этих величин связано со свойствами пространства и времени. Так, законы сохранения импульса и энергии отражают такое свойство пространства и времени, как их однородность. Закон сохранения момента импульса выражает изотропные свойства пространства, т.е. равноправность всех направлений в пространстве. Конечно, законы сохранения энергии, импульса и момента импульса должны вытекать из законов Ньютона. В дальнейшем мы так и будем поступать, т.е. выводить их из законов Ньютона.

Рассмотрим систему, состоящую из *n* материальных точек. Между материальными точками действуют *силы внутреннего взаимодействия* $\vec{F}_{ik}$, а также на материальные точки действуют *внешние силы* $\vec{F}_i$. Здесь $\vec{F}_{ik}$ - внутренняя сила, действующая на *i*-ю материальную точку со стороны *k*-й материальной точки, $\vec{F}_i$ - внешняя сила, действующая на *i*-ю материальную точку.

Материальные точки системы обладают импульсом:

$\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$ - импульс *i*-ой материальной точки.

Система материальных точек называется *замкнутой*, если внешние силы отсутствуют, или их равнодействующая равна нулю: $\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0$.

Запишем для каждой материальной точки второй закон Ньютона:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \ldots + \vec{F}_{1n} + \vec{F}_1,$$

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} + \ldots + \vec{F}_{2n} + \vec{F}_2,$$

……

$$\frac{d\vec{p}_n}{dt} = \vec{F}_{n1} + \vec{F}_{n2} + ... + F_{n(n-1)} + \vec{F}_n .$$

Просуммировав левые и правые части этих уравнений, получим

$$\sum_{i=1}^{3} \frac{d\vec{p}_i}{dt} = (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21}) + (\vec{F}_{13} + \vec{F}_{31}) + ... + \sum_{i=1}^{3} \vec{F}_i .$$

Сумма производных равна производной от суммы, а также по третьему закону Ньютона: $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0, ..., \vec{F}_{1n} + \vec{F}_{n1} = 0$. В результате получим:

$$\frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i .$$

Если система материальных точек замкнута, т.е. $\sum_{i=1}^{n} F_i = 0$, тогда

$$\frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0,$$

и имеет место закон сохранения импульса:

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = const .$$

$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + ... + \vec{p}_n = \text{const}$ - - *закон сохранения импульса системы материальных точек.*

Если система материальных точек является замкнутой, то суммарный импульс системы остаётся постоянным, т.е. сохраняется во времени.

Реактивное движение

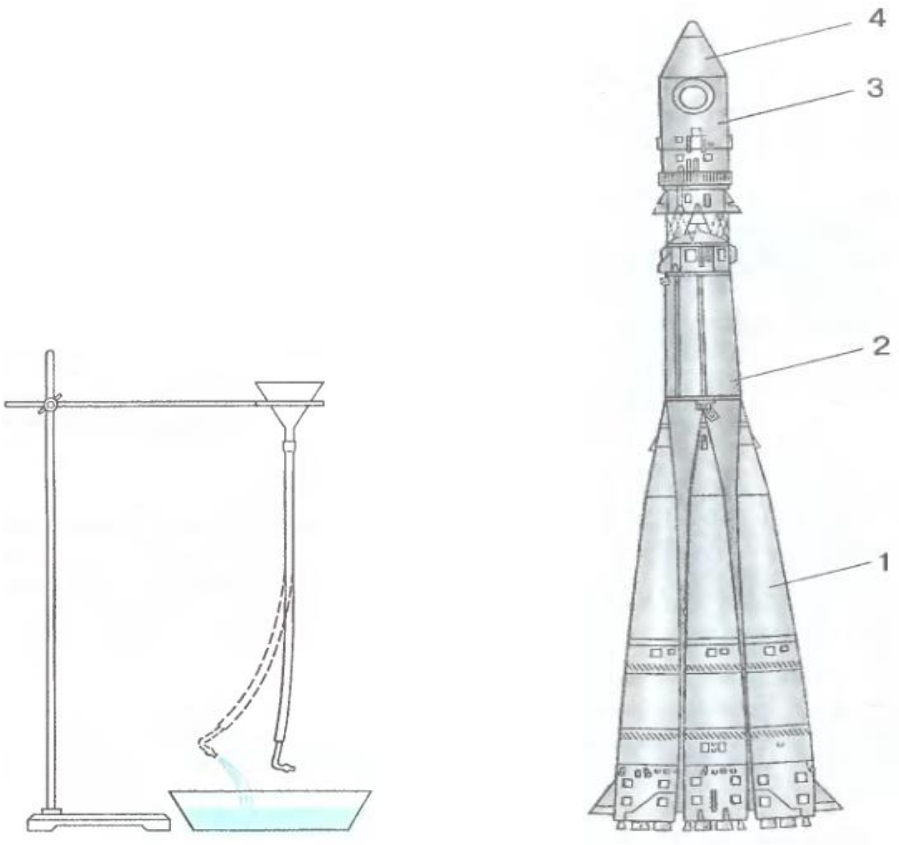
Законы Ньютона позволяют объяснить очень важное механическое явление — **реактивное движение**. Так называют движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части.

Возьмем, например, детский резиновый шарик, надуем его и отпустим. Мы увидим, что, когда воздух начнет выходить из него в одну сторону, сам шарик полетит в другую. Это и есть реактивное движение.

По принципу реактивного движения передвигаются некоторые представители животного мира, например, кальмары и осьминоги. Периодически выбрасывая вбираемую в себя воду, они способны развивать скорость до 60—70 км/ч. Аналогичным образом перемещаются медузы, каракатицы и некоторые другие животные.

Примеры реактивного движения можно обнаружить и в мире растений. Например, созревшие плоды «бешеного» огурца при самом легком прикосновении отскакивают от плодоножки и из отверстия, образовавшегося на месте отделившейся ножки, с силой выбрасывается горькая жидкость с семенами; сами огурцы при этом отлетают в противоположном направлении.

Реактивное движение, возникающее при выбросе воды, можно наблюдать на следующем опыте. Нальем воду в стеклянную воронку, соединенную с резиновой трубкой, имеющей Г-образный наконечник (рис. 6, а). Мы увидим, что, когда вода начнет выливаться из трубки, сама трубка придет в движение и отклонится в сторону, противоположную направлению вытекания воды.



а б

Рис. 6. Примеры реактивного движения.

На принципе реактивного движения основаны полеты **ракет**. Современная космическая ракета представляет собой очень сложный летательный аппарат, состоящий из сотен тысяч и миллионов деталей. Масса ракеты огромна. Она складывается из массы рабочего тела (т. е. раскаленных газов, образующихся в результате сгорания топлива и выбрасываемых в виде реактивной струи) и конечной или, как говорят, «сухой» массы ракеты, остающейся после выброса из ракеты рабочего тела.

«Сухая» масса ракеты, в свою очередь, состоит из массы конструкции (т. е. оболочки ракеты, ее двигателей и системы управления) и массы полезной нагрузки (т.е. научной аппаратуры, корпуса выводимого на орбиту космического аппарата, экипажа и системы жизнеобеспечения корабля).

По мере истечения рабочего тела освободившиеся баки, лишние части оболочки и т. д. начинают обременять ракету ненужным грузом, затрудняя ее разгон. Поэтому для достижения космических скоростей применяют составные (или многоступенчатые) ракеты (рис. 6, б). Сначала в таких ракетах работают лишь блоки первой ступени 1. Когда запасы топлива в них кончаются, они отделяются и включается вторая ступень 2; после исчерпания в ней топлива она также отделяется и включается третья ступень 3. Находящийся в головной части ракеты спутник или какой-либо другой космический аппарат укрыт головным обтекателем 4, обтекаемая форма которого способствует уменьшению сопротивления воздуха при полете ракеты в атмосфере Земли.

Когда реактивная газовая струя с большой скоростью выбрасывается из ракеты, сама ракета устремляется в противоположную сторону. Почему это происходит?

Согласно третьему закону Ньютона, сила F, с которой ракета действует на рабочее тело, равна по величине и противоположна по направлению силе F', с которой рабочее тело действует на корпус ракеты:

$$F' = F. \qquad (2)$$

Сила F' (которую называют реактивной силой) и разгоняет ракету.

Из равенства (2) следует, что сообщаемый телу импульс равен произведению силы на время ее действия. Поэтому одинаковые силы, действующие в течение одного и того же времени, сообщают телам равные импульсы. В данном случае импульс $m_p v_p$, приобретаемый ракетой, должен пульсу $m_{газ} v_{газ}$ выброшенных газов:

$m_p v_p = m_{газ} v_{газ}$

Отсюда следует, что скорость ракеты

$$v_р = \frac{m_{газ}}{m_р} v_{газ}. \quad (3)$$

Проанализируем полученное выражение. Мы видим, что скорость ракеты тем больше, чем больше скорость выбрасываемых газов и чем больше отношение массы рабочего тела (т. е. массы топлива) к конечной («сухой») массе ракеты.

К. Э. Циолковский

Формула (3) является приближенной. В ней не учитывается, что по мере сгорания топлива масса летящей ракеты становится все меньше и меньше. Точная формула для скорости ракеты впервые была получена в 1897 г. К. Э. Циолковским и потому носит его имя.

Формула Циолковского позволяет рассчитать запасы топлива, необходимые для сообщения ракете заданной скорости.

Энергия

Термин «энергия» был введен в 1807 г. английским ученым Т. Юнгом. В переводе с греческого это слово означает «действие, деятельность».

Современная наука немыслима без этого понятия. Оно присутствует во всех разделах физики. Это и электрическая энергия, магнитная энергия, атомная энергия и т. д.

Энергия, изучаемая в механике, называется механической. Именно с нее мы и начнем знакомство с этим важнейшим понятием.

Механическая энергия обозначается буквой Е и измеряется в тех же единицах, что и работа, т. е. в джоулях (Дж).

Поскольку в механике изучают движение тел и их взаимодействие друг с другом, то принято различать два вида механической энергии — энергию, обусловленную движением тел, и энергию, обусловленную их взаимодействием. Первая из них обозначается $E_к$ и называется **кинетической энергией**, вторая обозначается $E_п$ и называется **потенциальной энергией**.

Для расчета и той и другой энергии существует общее правило. *Чтобы определить энергию, которой обладает тело, надо найти работу, необходимую для перевода этого тела из нулевого состояния в данное* (нулевое состояние — это то, в котором соответствующая энергия тела считается равной нулю). Чем больше эта работа, тем большей энергией обладает тело в данном состоянии.

Воспользуемся этим правилом для расчета каждой из энергий.

1. Кинетическая энергия. Найдем кинетическую энергию тела массой т, движущегося со скоростью, равной и. Кинетическая энергия — это энергия, обусловленная движением. Поэтому нулевым состоянием для нее является то, в котором тело покоится. Найдя работу, необходимую для сообщения телу данной скорости, мы найдем и его кинетическую энергию.

Воспользовавшись определением работы (A = Fs), вторым законом Ньютона (F = ma), а также формулами кинематики, получаем (рис. 7)

$$A = Fs = mas = m \cdot \frac{v}{t} \cdot \frac{vt}{2} = \frac{mv^2}{2}.$$

Последнее из написанных здесь выражений и является кинетической энергий тела:

$$\boxed{E_к = \frac{mv^2}{2}.}$$

Итак, *кинетическая энергия тела равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости*.

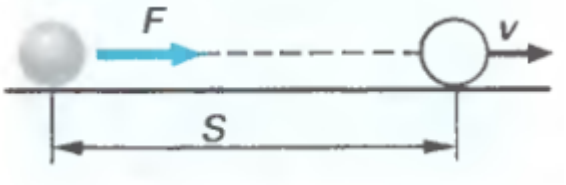


Рис. 7. Задача на движение.

2. Потенциальная энергия. Найдем потенциальную энергию тела, взаимодействующего с Землей. Нулевым будем считать положение тела на поверхности Земли. Тогда потенциальная энергия тела, находящегося на некоторой высоте h, будет равна работе, необходимой для перемещения этого тела с поверхности Земли на заданную высоту. При равномерном подъеме, когда прикладываемая к телу сила совпадает по величине с силой тяжести (рис. 8), эта работа может быть найдена следующим образом:

$A = Fs = F_Th = mgh.$

Это и есть потенциальная энергия тела на высоте h:

$$E_п = mgh. \qquad (4)$$

Итак, *потенциальная энергия тела, взаимодействующего с Землей, равна произведению массы этого тела, ускорению свободного падения и высоты, на которой находится тело*.

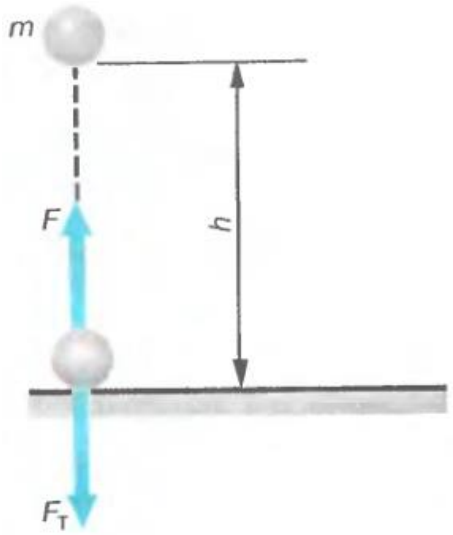


Рис. 8. Движение в ветикальной плоскости.

За нулевое положение тела при расчете его потенциальной энергии необязательно выбирать то, которое расположено на поверхности Земли. Это может быть и уровень пола в помещении, и поверхность стола и т. д. Нулевое положение, от которого отсчитывается высота тела h, выбирают произвольно, руководствуясь обычно лишь соображениями удобства и простоты.

По формуле (4) находится потенциальная энергия тела, взаимодействующего с Землей. Потенциальная энергия других взаимодействий находится по другим формулам.

От энергии, которой обладает тело, зависит работа, которую оно может совершить. *Чем больше энергия тела, тем большая работа будет совершена при переходе тела из данного состояния в нулевое*. Проиллюстрируем это простыми опытами.

Возьмем составной желоб, имеющий наклонную и горизонтальную части, и поместим на его сгибе алюминиевый цилиндр (рис. 9). Пуская по наклонной части желоба шарики разной массы с одинаковой высоты и шарики одинаковой массы с разных высот, можно заметить, что, чем большей потенциальной энергией наверху желоба и кинетической энергией внизу обладал шарик, тем на большее расстояние он передвинет металлический цилиндр.

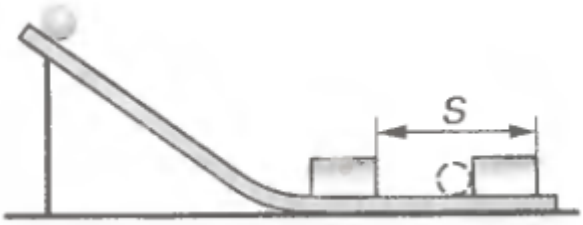


Рис. 9. Движение по наклонной плоскости.

Закон сохранения энергии

В общем случае тело обладает одновременно как кинетической, так и потенциальной энергией. Их сумму называют **полной механической энергией**:

$$E = E_к + E_п \qquad (5)$$

Это понятие было введено в 1847 г. 26-летним немецким ученым Г. Гельмгольцем.

Что происходит с полной механической энергией по мере движения тела? Чтобы выяснить это, рассмотрим простое явление.

Бросим вертикально вверх мяч. Придав мячу скорость, мы тем самым сообщим ему некоторую кинетическую энергию. По мере движения мяча вверх его движение будет замедляться притяжением Земли и скорость, а вместе с ней и кинетическая энергия мяча будут становиться все меньше и меньше. Потенциальная же энергия мяча вместе с высотой h будет

при этом возрастать. В высшей точке траектории (на максимальной высоте) потенциальная энергия мяча достигнет своего наибольшего значения, а кинетическая энергия окажется равной нулю. После этого мяч начнет падать вниз, постепенно набирая скорость. Кинетическая энергия при этом начнет увеличиваться, а потенциальная энергия (из-за уменьшения высоты) — убывать. В момент удара о землю кинетическая энергия мяча достигнет максимального значения, а потенциальная энергия обратится в нуль.

Итак, когда кинетическая энергия тела уменьшается, потенциальная энергия возрастает, и наоборот, когда кинетическая энергия тела увеличивается, его потенциальная энергия убывает. Изучение свободного падения тела (в отсутствие сопротивления воздуха) показывает, что всякое уменьшение одного из этих видов энергии сопровождается равным увеличением другого вида энергии. Полная же механическая энергия тела при этом сохраняется. В этом состоит **закон сохранения механической энергии**:

Полная механическая энергия тела, на которое не действуют силы трения и сопротивления, в процессе его движения остается неизменной.

Если обозначить начальную и конечную энергии тела через E и E', то закон сохранения энергии можно выразить в виде следующего равенства:

$$E' = E. \qquad (6)$$

Предположим, что свободно движущееся тело в начальный момент времени находилось на высоте h0 и имело при этом скорость v_0. Тогда его полная механическая энергия в этот момент времени была равна

$$E = \frac{mv_0^2}{2} + mgh_0.$$

Если спустя некоторое время рассматриваемое тело окажется на высоте h, имея скорость v (рис. 10), то его полная механическая энергия станет равной

$$E' = \frac{mv^2}{2} + mgh.$$

Согласно закону сохранения энергии, оба эти значения энергии должны совпадать. Поэтому

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \frac{mv_0^2}{2} + mgh_0. \qquad (7)$$

Если начальные значения h_0 и v_0 известны, то это уравнение позволяет найти скорость тела v на высоте h или, наоборот, высоту h, на которой тело будет иметь заданную скорость v. Масса тела при этом никакой роли играть не будет, так как в уравнении (7) она сокращается.

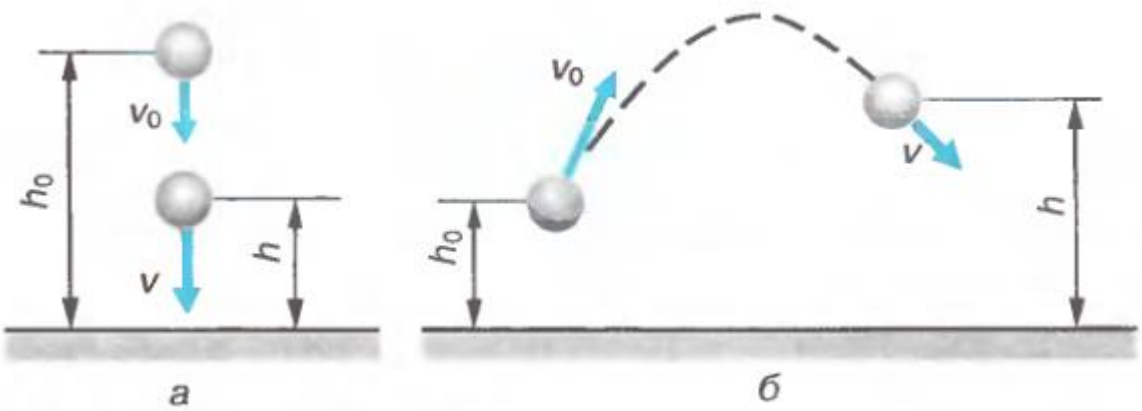
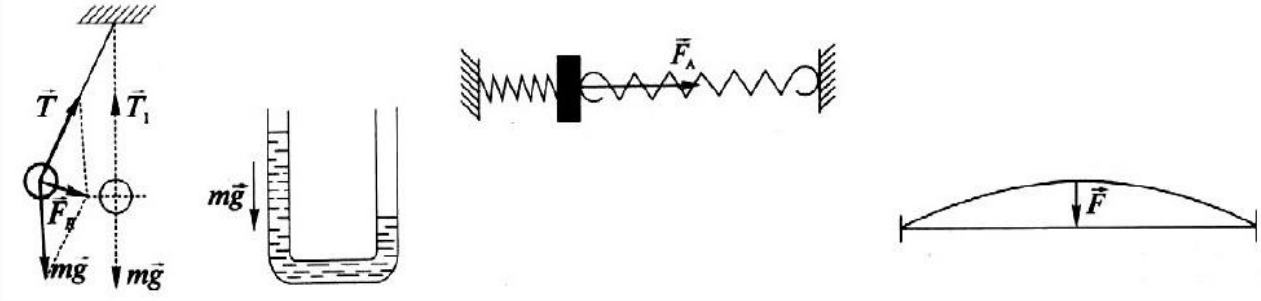


Рис. 10. Применение закона сохранния энергии к решению задач.

Следует помнить, что полная механическая энергия сохраняется лишь тогда, когда отсутствуют силы трения и сопротивления. Если же эти силы присутствуют, то их действие приводит к уменьшению механической энергии.

Тема 1.4. Механические колебания и волны.

Движение, при котором состояния движущегося тела с течением времени повторяются, причём тело проходит через положение своего устойчивого равновесия поочерёдно в противоположных направлениях, называется **механическим колебанием**.



Условием возникновения колебания является наличие в системе возвращающей силы, всегда направленной к положению устойчивого равновесия. Каждый законченный цикл колебательного движения, после которого оно вновь повторяется, называется **полным колебанием**.

Смещением ***x*** называется отклонение колеблющейся точки от положения равновесия в данный момент времени.

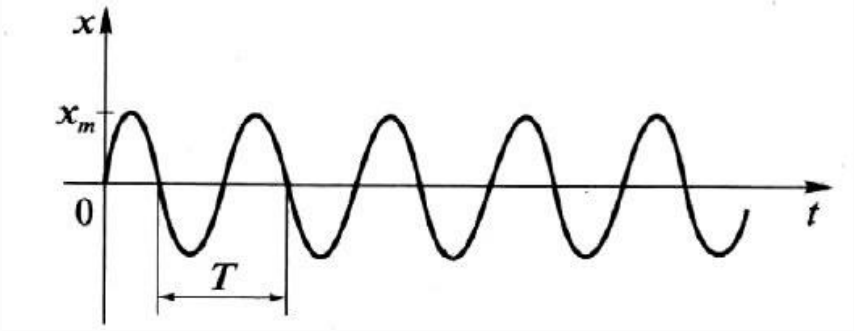
Амплитудой колебаний x_m называется модуль наибольшего смещения тела от положения равновесия при колебательном движении.

Периодом колебания ***T*** называется время, за которое совершается одно полное колебание: $T = t/N$.

Величину, равную числу колебаний, совершаемых за единицу времени, называют **частотой колебаний**

$$\nu:\ [\nu] = 1/\text{с} = \text{Гц}:\ \nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$$

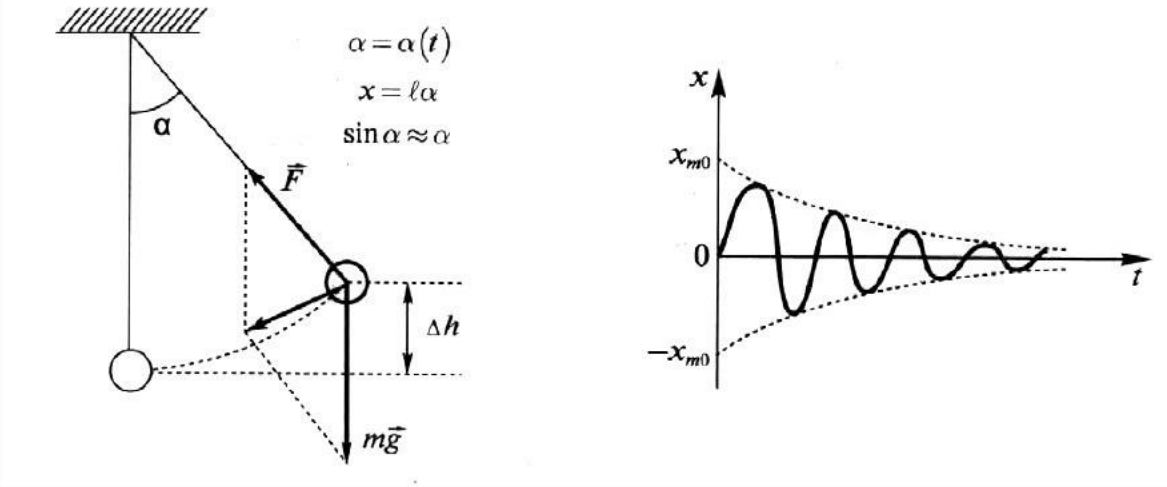
Механическое колебание, при котором координата тела меняется по закону синуса или косинуса, называется **гармоническим колебанием**.



Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на тонкой нерастяжимой нити. Маленький металлический шарик, подвешенный на длинной нити, можно условно считать математическим маятником.

При колебаниях математического маятника (в отсутствие сил трения) выполняется закон сохранения механической энергии и периодически происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

В положении максимального отклонения от положения равновесия потенциальная энергия маятника максимальна, а кинетическая равна нулю. При приближении к положению равновесия потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая увеличивается, достигая максимального значения в положении равновесия, в котором потенциальная становится равной нулю: $\mathbf{W_{полн} = W_п + W_к = const\ E_{полн} = E_{к\ max} = E_{п\ max}}$.



Затухающими называются колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени. Затухание свободных механических гармонических колебаний связано с уменьшением механической энергии колебательной системы за счёт работы сил сопротивления (трения).

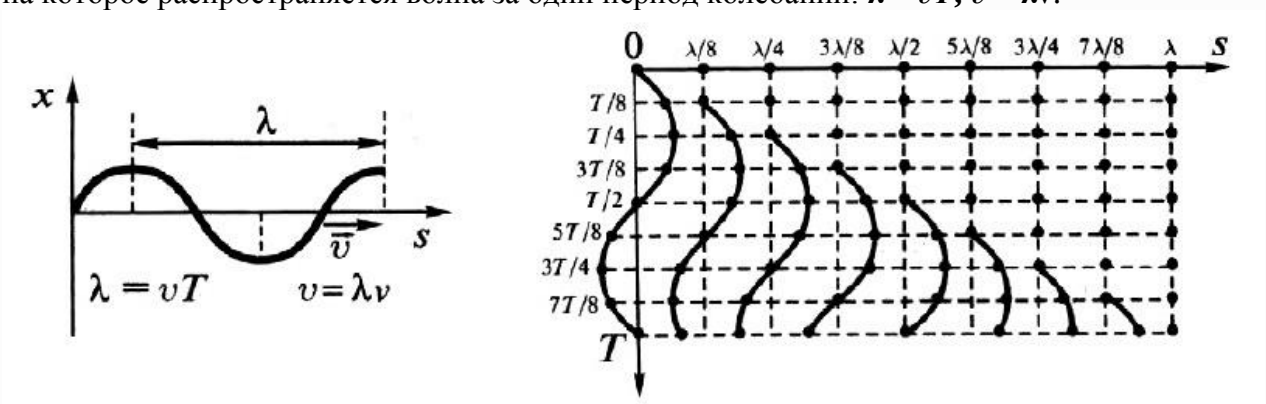
Вынужденные колебания — колебания, происходящие под воздействием внешних сил, меняющихся во времени.

Резонанс (фр. *resonance*, от лат. *resono* — откликаюсь) — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, которое наступает при приближении частоты внешнего воздействия к некоторым значениям (резонансным частотам), определяемым свойствами системы.

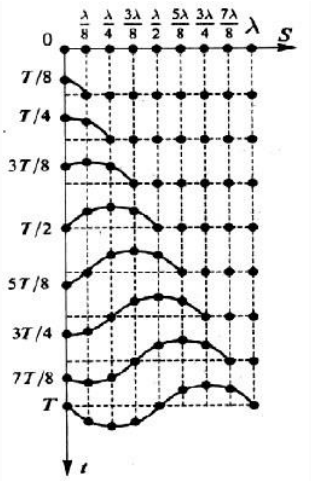
Механические волны. Звук

Если в упругой среде (газ, жидкость или твёрдое тело) имеется источник колебаний, то в ней с течением времени происходит процесс распространения колебаний, этот процесс называется **волной**.

Волны, распространяющиеся в упругой среде, называются ***механическими волнами***. В волне осуществляется перенос энергии колебательного движения без переноса вещества (массы) среды, в которой распространяется волна. **Периодом T волны** является период колебаний точек среды при распространении волны. **Длиной волны λ** называется расстояние, на которое распространяется волна за один период колебаний: **λ = *vT*; *v* = λν**.



Продольными волнами называются волны, в которых направление колебаний частиц происходит в направлении распространения волны. Продольные механические волны могут распространяться в твёрдых, в жидких и в газообразных средах.



Поперечными называются волны, в которых направление колебаний частиц происходит перпендикулярно направлению распространения волны. Поперечные механические волны могут распространяться только в твёрдых телах и на свободной поверхности жидкости.

Звуковыми волнами называются механические волны, вызывающие у человека ощущение звука: $\nu_{зв}$ = (16 ÷ 20 000) Гц.

Характеристики звука

Громкость звука определяется амплитудой колебаний.

Высота тона определяется частотой колебаний.

Скорость звука зависит от плотности среды. Скорость звука в твёрдых телах больше, чем в жидкостях, а в жидкостях больше, чем в газах. Скорость звука увеличивается с ростом температуры среды.

Скорость звука в воздухе

t, °C	v, м/с
0	332
15	340

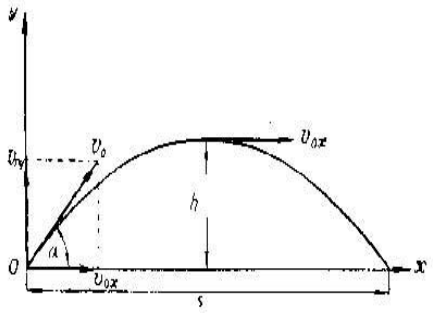
В случае, когда отражающая поверхность перпендикулярна распространению волны, звуковая волна после отражения возвращается обратно к источнику звука. Такой случай отражения называется **эхом.**

В гидролокации эхо используется для определения глубин, расстояний до преград и других судов.

Задачи

Пример №1. Снаряд вылетает из орудия с начальной скоростью 490 м/с под углом 30^0 к горизонту. Найти высоту, дальность и время полета снаряда, не учитывая его вращение и сопротивление воздуха.

Дано	Решение. Составляющие скорости по осям Ох и Оу в начальный момент времени равны:
V_0=490 м/с	$V_{0x} = V_0 \cos\alpha$ - остается неизменной во все время полета снаряда,
α= 30°	$V_{0y} = V_0 \sin\alpha$ - меняется согласно уравнению равнопеременного движения
h,S,t- ?	$V_y = V_0 \sin\alpha - gt$.



В наивысшей точке подема

$V_y = V_0 \sin\alpha - gt_1 = 0$, откуда

$t_1 = \frac{V_0 \sin\alpha}{g}$

Полное время полета снаряда

$t = 2t_1 = \frac{2V_0 \sin\alpha}{g} = 50$ с.

Высоту подъема снаряда определим из формулы пути равно замедленного движения

$h = V_{0y} t_1 - \frac{gt_1^2}{2} = \frac{V_0^2 \sin^2\alpha}{2g} = 3060$ м.

Дальность полета определим как

$S = V_{0x} t = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g} = 21000$ м.

Пример №2. Мощность двигателя подъемного крана р=4,4кВт. Какой груз можно поднять при помощи этого крана на высоту 12 м в течении 30 сек. если подъем груза совершается равноускоренно? КПД=80%

Дано:	СИ	Решение.
P=4.4кВт	4400Вт	A = P t
h=12м		Действующая мощность P = p*0,8
t=30с		A = m g h
η=80%		Таким образом
m-?		m*g*h = P*0,8*t
		откуда
		m = (P*0,8*t)/gh
		m = (4400*0,8*30)/(10*12) = 880 кг

Контрольные вопросы

1. Что такое механика?

2. Чем отличается кинематика от динамики?

3. Что называется механическим движением?

4. Что понимают под относительностью движения?

5. Кто находится в движении: пассажир, едущий в автобусе, или человек, стоящий у автобусной остановки?

6. Какое движение называют равноускоренным?

7. Что такое ускорение?

8. Что характеризует ускорение?

9. В каких случаях ускорение равно нулю?

10. По какой формуле находится ускорение тела при равноускоренном движении из состояния покоя?

11. По какой формуле находится ускорение тела при уменьшении скорости движения до нуля?

12. Как направлено ускорение при равноускоренном прямолинейном движении?

13. Чем отличается динамика от кинематики?

14. В чем заключается первый закон Ньютона?

15. Относительно какого тела рассматривается движение в первом законе Ньютона?

16. Что такое система отсчета?

17. Какие системы отсчета называют инерциальными?

18. Что такое импульс?

19. С направлением какой из перечисленных величин совпадает направление импульса — силы, скорости или ускорения?

20. Что называют полной механической энергией?

21. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.

22. С какой энергией — кинетической или потенциальной — совпадает полная механическая энергия свободно падающего тела в момент удара о землю?

23. С какой энергией совпадает полная механическая энергия брошенного вертикально вверх мяча в момент, когда он оказывается в высшей точке своего полета?

24. Что происходит с полной механической энергией тела при наличии сил трения и сопротивления?

РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Тема 2.1. Молекулярная физика

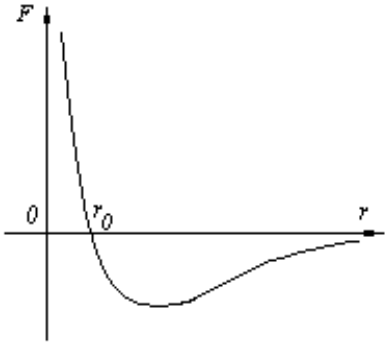
Существует два метода изучения свойств вещества: молекулярно-кинетический и термодинамический.

Молекулярно-кинетическая теория истолковывает свойства тел, которые непосредственно наблюдаются на опыте (давление, температуру и т.п.), как суммарный результат действия молекул. При этом она пользуется статистическим методом, интересуясь не движением отдельных молекул, а лишь средними величинами, которые характеризуют движение огромной совокупности частиц. Отсюда другое её название – *статистическая физика*.

Термодинамика изучает макроскопические свойства тел, не интересуясь их микроскопической картиной. В основе термодинамики лежит несколько фундаментальных законов (называемых *началами термодинамики*), установленных на основании обобщения большой совокупности опытных фактов. Термодинамика и молекулярно-кинетическая теория взаимно дополняют друг друга, образуя по существу единое целое.

Основные положения молекулярно-кинетической теории

1. Все вещества состоят из мельчайших частиц - атомов и молекул.
2. Молекулы и атомы любого вещества находятся в непрерывном хаотическом движении, которое называется *тепловым движением*. При нагревании вещества интенсивность движения частиц увеличивается.
3. Молекулы вещества взаимодействуют между собой с силами притяжения $F_{пр}$ и отталкивания $F_{от}$.



$r = r_0$, $F_{от} = F_{пр}$,

$r < r_0$, $F_{от} > F_{пр}$,

$r > r_0$, $F_{от} < F_{пр}$,

$r \to \infty$, $F \to 0$.

Характер движения молекул зависит от агрегатного состояния вещества.

Движение молекул газов сводится к хаотическому поступательному движению.

Скорость молекул газов зависит от температуры.

Масса молекулы:

Молекулярная масса вещества – масса молекулы вещества, выраженная в *а.е.м.*

Атомная единица массы (а.е.м.) – единица массы, равная 1/12 массы атома C^{12}.

Моль – количество вещества, в котором содержится число молекул, равное числу атомов в 0,012 кг изотопа углерода C^{12}.

Число частиц, содержащихся в моле вещества, называется *числом Авогадро*:

$$N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Молярная масса M – масса моля вещества.

Зная число Авогадро, можно найти значение *а.е.м.*

$$0{,}012 = N_A \cdot 12 \cdot 1 \text{ а.е.м.},$$

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{10^{-3}}{6{,}023 \cdot 10^{23}} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Размеры молекулы:

Линейные размеры молекул воды приблизительно равны $3\cdot10^{-10}$ м.

Основное уравнение молекулярно – кинетической теории газов.

Возьмем сосуд с газом и определим давление P газа на стенки сосуда. Для простоты рассмотрения выберем этот сосуд в форме куба с ребром l и расположим его в декартовой системе координат, как показано на рисунке. Пусть в сосуде имеется всего N молекул. Предположим, что:

1) Вдоль оси x движется одна треть всех молекул, т.е. $N_1 = \dfrac{N}{3}$;

2) Удар молекул о стенку Q идеально упругий и молекулы проходят расстояние, равное размеру куба, не испытывая соударений.

Импульс силы, полученный стенкой при ударе молекулы, определим из второго закона Ньютона

$$\vec{F}\,\Delta t = \Delta\vec{p}\ ,$$

где $\Delta\vec{p} = m\vec{V}_2 - m\vec{V}_1$ - изменение импульса молекулы, m – масса молекулы.

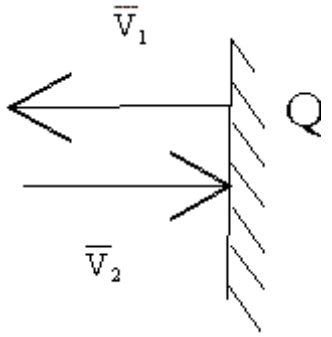
Поскольку масса стенки намного больше массы молекулы, то

$$\vec{V}_2 = -\vec{V}_1 \quad \text{и} \quad \Delta\vec{p} = -2m\vec{V}_1 \quad \text{или по модулю} \qquad \Delta p = 2mV,$$

где использовано обозначение $V_1 = V_2 = V$.

Таким образом, одна молекула одна молекула за время Δt передает стенке импульс силы $F\,\Delta t = 2mV$, а за время $\Delta t = 1$ сек передаёт стенке импульс силы равный

$$F\cdot1 = 2mVk,$$



где k – число ударов молекул за 1 сек.

Так как $\dfrac{2l}{V} = t$ - промежуток времени между двумя последовательными ударами,. то $k = \dfrac{1}{t} = \dfrac{V}{2l}$,

тогда $F\cdot1 = \dfrac{2mV^2}{2l} = \dfrac{mV^2}{l}$.

Теперь подсчитаем суммарный импульс силы, который передают стенке N_1 молекул, движущихся вдоль оси x, за 1 сек

$$\sum_{i=1}^{N_1} F_i = \frac{m}{l}(V_1^2 + V_2^2 + \ldots + V_{N_1}^2) = \frac{m}{l}\frac{V_1^2 + V_2^2 + \ldots + V_{N_1}^2}{N_1}N_1 = \frac{m}{l}<V^2>N_1 = \frac{N}{3}\frac{m<V^2>}{l},$$

где скобки < > обозначают среднее значение выражения, стоящего в скобках. Если извлечь корень квадратный из $<V^2>$, получим среднюю квадратичную скорость молекул, которую будем обозначать $<V_{кв}>$

$$<V_{кв}> = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \ldots + V_N^2}{N}}$$ - средняя квадратичная скорость молекул газа

Давление, оказываемое газом на грань куба, равно:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} F_i}{l^2} = \frac{N}{3}\frac{m<V^2>}{l^3} = \frac{1}{3}nm<V^2>,$$

где n – концентрация молекул. Запишем это выражение в виде

$$P = \frac{2}{3} n \frac{m < V^2 >}{2},$$

чтобы подчеркнуть, что в левую часть этого выражения входит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы $< \varepsilon > = \frac{m < V^2 >}{2}$. Тогда

$$P = \frac{2}{3} n < \varepsilon >$$ - основное уравнение молекулярно-кинетической теории (уравнение Клаузиуса)

С учетом уравнения состояния идеального газа:

$$P = nkT$$

получаем выражение для средней кинетической энергии поступательного движения молекул:

$$< \varepsilon > = \frac{3}{2} kT$$ - средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул

Мы видим, что величина kT есть мера энергии теплового движения молекул.

Молекулярно - кинетическое толкование абсолютной температуры:

Абсолютная температура – есть величина, пропорциональная средней энергии поступательного движения молекул.

Идеальным газом называется газ, молекулы которого не взаимодействуют друг с другом на расстоянии и имеют исчезающе малые собственные размеры. Состояние заданной массы m идеального газа определяется значениями трёх параметров: давления P, объёма V, и температуры T. Соотношение, устанавливающее связь между этими параметрами, имеет вид:

$$PV = \frac{m}{M} RT$$ - *уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)*

где M - масса 1 моля газа, $R = 8{,}31 \frac{Дж}{мольК}$ - универсальная газовая постоянная.

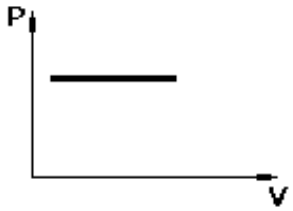
Для одного моля газа уравнение состояния идеального газа примет вид:

$$\frac{PV}{T} = R = const$$ - *уравнение Клапейрона.*

Рассмотрим теперь изопроцессы для идеального газа:

$T = const$ – изотермический процесс.

$PV = const$ – закон Бойля-Мариотта.



$P = const$ - изобарический процесс.

$\frac{V}{T} = const$ *- закон Гей-Люссака.*

$V = const$ – *изохорический процесс,*

$\frac{P}{T} = const$ - *закон Шарля.*

Запишем уравнение состояния идеального газа в другой форме.

Введем новую постоянную величину:

$$k = \frac{R}{N_A} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \ \frac{Дж}{К} \ \text{- постоянная Больцмана}$$

и перепишем уравнение Менделеева-Клапейрона в виде:

$$PV = \frac{m}{M} N_A kT \ .$$

Учитывая, что $\frac{m}{M} N_A = N$ - число молекул в газе массы m, получим

$$PV = N\,kT \quad \Rightarrow \quad P = \frac{N}{V} kT \ .$$

Так как $\frac{N}{V} = n$ - число молекул в единице объема или *концентрация* молекул, то

$$P = nkT \ \text{-} \ \textit{другая форма записи уравнения состояния идеального газа.}$$

Тема 2.2. Термодинамика

В термодинамике рассматриваются *термодинамические системы*, т.е. макроскопические объекты, которые могут обмениваться энергией как друг с другом, так и с внешней средой. Для описания состояния термодинамической системы вводятся физические величины, которые называются *термодинамическими параметрами или параметрами состояния системы.* Обычно в качестве термодинамических параметров выбирают давление P, объем V и температуру T.

Температура – это макроскопический параметр, характеризующий различную степень нагретости тел. Это одна из макроскопических характеристик внутреннего состояния тел. Понятие температуры имеет смысл для равновесных состояний термодинамической системы. *Равновесным состоянием (состоянием термодинамического равновесия)* называется состояние системы, не изменяющееся с течением времени *(стационарное состояние)*, причем стационарность состояния не связана с процессами, происходящими во внешней среде. Равновесное состояние устанавливается в системе при постоянных внешних условиях и сохраняется в системе произвольно долгое время. Во всех частях термодинамической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, температура одинакова.

Для измерения температуры используются зависимости некоторых физических параметров вещества от температуры. Такими параметрами могут быть объем, линейные размеры жидкостей и твердых тел, давление газа в замкнутом объеме, электрическое сопротивление, цвет тела и др. В термодинамической шкале температур температура измеряется в кельвинах ($К$) и обозначается T.

Соотношение, устанавливающее связь между параметрами состояния системы называется *уравнением состояния* термодинамической системы. Если какой-либо из термодинамических параметров системы изменяется, то происходит изменение состояния системы, называемое *термодинамическим процессом.* Термодинамический процесс называется равновесным, если система бесконечно медленно проходит непрерывный ряд бесконечно близких термодинамических равновесных состояний. *Изопроцессами* называются термодинамиче-

ские процессы, происходящие в системе с постоянной массой при каком-либо одном постоянном параметре состояния.

Внутренняя энергия идеального газа. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул газа.

Внутренняя энергия идеального газа равна числу молекул газа, умноженному на среднюю кинетическую энергию одной молекулы.

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{N} < \varepsilon >$$

При подсчете средней энергии молекулы пользуемся законом равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул:

На каждую степень свободы молекулы приходится в среднем одинаковая кинетическая энергия равная $\frac{1}{2}kT$ *(k-постоянная Больцмана).*

Числом степеней свободы i системы называется количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы.

Тогда средняя кинетическая энергия молекул равна:

$$< \varepsilon > = \frac{i}{2}kT \quad -$$ *Средняя кинетическая энергия молекул газа*

где $i = i_{пост} + i_{вращ} + i_{колеб}$ - общее число степеней свободы молекул.

Среднюю энергию молекулы можно представить в виде:

$$< \varepsilon > = < \varepsilon_{пост} > + < \varepsilon_{вращ} > + < \varepsilon_{колеб} > .$$

Примеры:

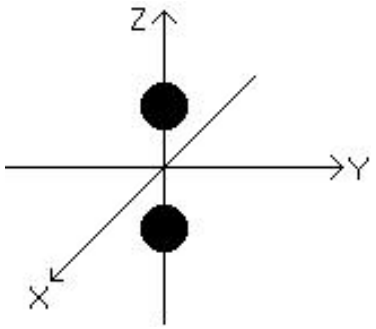
1) $n = 1$ - *одноатомная молекула*:

$i = i_{пост} = 3$, $<\varepsilon_{пост}> = \frac{3}{2}kT$ - средняя энергия поступательного движения молекул

2) $n = 2$ - *двухатомная молекула*:

$i_{пост} = 3$, $i_{вращ} = 2$

$i = i_{пост} + i_{вращ} = 3 + 2 = 5$



3) $n = 3$ - *многоатомная молекула*:

$i_{пост} = 3$, $i_{вращ} = 2$, $i_{колеб} = 1$

$i = i_{пост} + i_{вращ} + i_{колеб} = 3 + 2 + 1 = 6$

Подсчитаем теперь внутреннюю энергию идеального газа:

$$U = N < \varepsilon > = N\frac{i}{2}kT = \frac{i}{2}\frac{NkN_AT}{N_A} = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT,$$

где $\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} = \nu$ - число молей газа (количество вещества), $k N_A = R$.

$$U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT \quad -$$ *внутренняя энергия идеального газа*

или в другой форме

$$U = \frac{i}{2}\nu RT.$$

В основе термодинамики лежат три фундаментальных закона, называемых началами термодинамики.

Первое начало термодинамики:

Количество теплоты, сообщённое газу, идёт на приращение внутренней энергии газа и на совершение газом работы над внешними телами.

$$dQ = dU + dA \quad \text{- первое начало термодинамики.}$$

Определим физические величины, входящие в этот закон.

а) *Внутренняя энергия* идеального газа равна

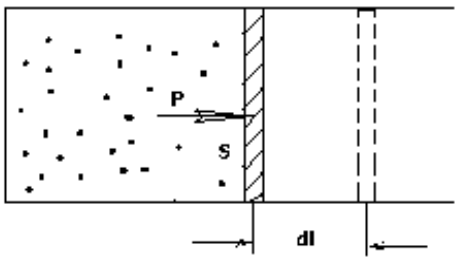
$$U = \nu \frac{i}{2} RT,$$

где $\nu = \frac{m}{M}$ - количество вещества, i – число степеней свободы молекул газа.

Тогда изменение внутренней энергии газа равно

$$dU = \nu \frac{i}{2} RdT \quad \text{- изменение внутренней энергии газа.}$$

б) Вычислим теперь *работу,* совершаемую газом при изменении объёма. Для этого рассмотрим газ, находящийся в цилиндре под поршнем, который может свободно переме-



ться. При нагревании давление газа P, будет оста-ться постоянным, и, как видно из рисунка, работа, торую совершает газ, будет равна:

$$dA = Fdl = PSdl = PdV,$$

где $dV = S\,dl$ - изменение объема газа.

$dA = PdV$ - *работа, совершаемая газом при изменении его объема*

в) Наконец, найдём формулу для подсчёта количества теплоты, сообщенной газу массы M при его нагревании на dT. Для этого введем понятие молярной теплоёмкости газа

$$C = \frac{dQ}{\nu dT}.$$

Молярная теплоёмкость газа – это количество теплоты, сообщённой 1 молю газа, для увеличения его температуры на dT.

Тогда формула для подсчёта теплоты будет иметь вид

$$dQ = \nu C dT \quad \text{- теплота, сообщённая газу для увеличения его температуры на } dT.$$

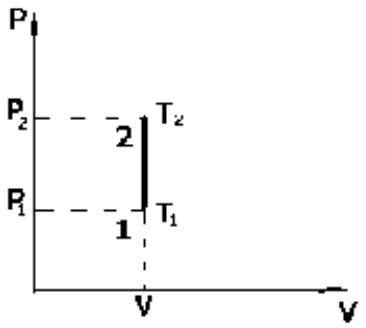
Применим первое начало термодинамики к изопроцессам в газе.

Изопроцесс - это процесс, происходящий в газе, когда один из параметров, описывающих газ, является постоянным.

1. Термодинамика изохорического процесса: V=const

Рассмотрим закон, описывающий этот процесс и его график в координатах (P,V). Этот закон является частным случаем уравнения состояния идеального газа:

$$PV = \nu RT.$$



$$\left.\begin{array}{l} 1:\ P_1V = \nu RT_1 \\ 2:\ P_2V = \nu RT_2 \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$ *- закон Шарля.*

Так как $V = const$, то $dV = 0$ и $dA = PdV = 0$, т.е

$A = 0$ - работа совершаемая газом при изохорическом процессе равна нулю.

Тогда

$dQ = dU$ - первое начало термодинамики для изохорического процесса.

Поскольку количество теплоты, сообщенное газу, равно

$$dQ = \nu C_V dT,$$

где C_v - молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме, то мы получаем полезную формулу для подсчёта приращения внутренней энергии газа:

$$dU = \nu C_V dT$$ *- изменение внутренней энергии газа.*

Сравнивая эту формулу с другой формулой

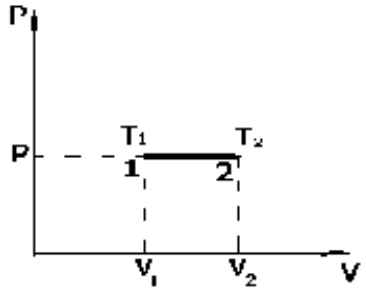
$$dU = \nu \frac{i}{2} RdT,$$

получим выражение для молярной теплоёмкости газа при постоянном объёме:

$$C_v = \frac{i}{2} R.$$

2. Термодинамика изобарического процесса: P=const. Соотношение Майера

Сначала рассмотрим закон, описывающий этот процесс и его график в координатах (*P*,*V*).



$$\left.\begin{array}{l} 1:\ PV_1 = \nu RT_1 \\ 2:\ PV = \nu RT_2 \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$ *- закон Гей-Люссака.*

Теперь работа, совершаемая газом, $dA = PdV \neq 0$,

приращение внутренней энергии газа тоже не равно нулю $dU \neq 0$, и первое начало термодинамики не меняет своего вида:

$dQ = dU + dA -$ *первое начало термодинамики для изобарического процесса.*

Формула для подсчёта теплоты теперь примет вид

$$dQ = \nu C_p dT.$$

где C_p - молярная теплоёмкость газа при постоянном давлении.

Приращение внутренней энергии запишем в виде

$$dU = \nu C_V dT$$

Работу, совершаемую газом, также представим в аналогичном виде

$$dA = PdV = \nu RdT.$$

Здесь мы воспользовались уравнением Менделеева-Клапейрона $PV = \nu RT$, дифференциальное уравнение которого при $P = const$ дает

$$PdV = \nu RdT.$$

Из выражения для работы следует размерность и физический смысл универсальной газовой постоянной *R*:

$$R = \frac{dA}{\nu dT}, \qquad [R] = \frac{Дж}{мольК}.$$

Универсальная газовая постоянная R численно равно работе, совершённой одним молем газа при изобарическом процессе при увеличении его температуры на один градус.

Продолжим рассмотрение изобарического процесса. Подставляя полученные выражения для *dQ, dU, dA* в первое начало термодинамики, получим:

$$\nu C_P dT = \nu C_V dT + \nu R dT.$$

Сокращая на νdT, получим соотношение между молярными теплоёмкостями газа при постоянном объёме C_V и постоянном давлении C_P:

$$C_P = C_V + R \text{ - соотношение Майера.}$$

Учитывая выражение для $C_V = \frac{i}{2}R$, получим аналогичное выражение для C_P

$$C_P = \frac{i+2}{2}R.$$

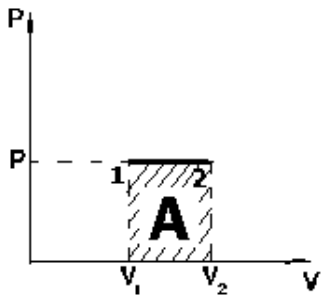
Приведем также выражение для отношения молярных теплоёмкостей C_P и C_V

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

Для двухатомных молекул при невысоких температурах $i = 5$, тогда $\gamma = 1{,}4$.

Выпишем работу, совершаемую газом при изобарическом процессе (P=const):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P\int_{V_1}^{V_2} dV = P(V_2 - V_1).$$

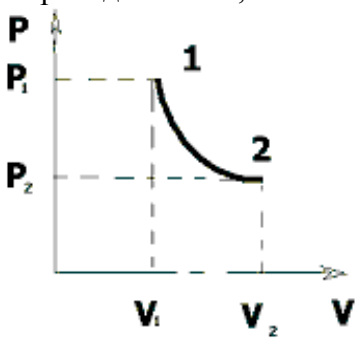


$A = P(V_2 - V_1)$ - работа, совершаемая газом при изобарическом процессе.

На графике (P,V) работа, совершаемая газом, численно равна площади прямоугольника, построенного под изобарой.

3. Термодинамика изотермического процесса: T=const.

Приведем закон, описывающий этот процесс, и его график в координатах (P,V).



$$\left.\begin{array}{l} 1: P_1V_1 = \nu RT \\ 2: P_2V_2 = \nu RT \end{array}\right\} \Rightarrow P_1V_1 = P_2V_2 = const$$ закон Бойля-Мариотта

Так как $T = const$, то $dU = \nu\frac{i}{2}RdT = 0$,

т. е. $dU = 0$ - *изменение внутренней энергии газа при изотермическом процессе равно нулю*.

Тогда

$dQ = dA$ - Первое начало термодинамики при изотермическом процессе

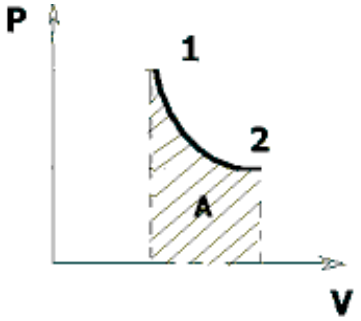
При изотермическом процессе вся теплота, сообщенная газу, идет на работу, совершаемую газом: $Q = A$.

Выпишем работу, совершаемую газом при изотермическом процессе. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона $PV = \nu RT$, представим элементарную работу в виде:

$$dA = PdV = \nu RT\frac{dV}{V}.$$

Тогда

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \nu RT\int_{V_1}^{V_2}\frac{dV}{V} = \nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}.$$



$A = Q = \nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ работа, совершаемая газом при изотермическом процессе.

Учитывая то, что при изотермическом процессе $P_1V_1 = P_2V_2$, работу можно вычислить также по формуле:

$$A = \nu RT\ln\frac{P_1}{P_2};$$

На графике (P,V) работа, совершаемая газом, численно равна площади под кривой, описывающий изотермический процесс.

4. Термодинамика адиабатического процесса: dQ=0

Несмотря на то, что мы поочерёдно рассмотрели процессы с *V=const, P=const, T=const*, список характерных газовых процессов этим не исчерпывается. Обратим внимание, что при изохорическом процессе *dA=0*, при изотермическом процессе *dU=0*, и поэтому естественно рассмотреть процесс в котором *dQ=0*, т.е. адиабатический процесс.

Адиабатический процесс - это процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой.

Поскольку *dQ = 0*, то первое начало термодинамики примет вид:

$dU + dA = 0$ - *первое начало термодинамики при адиабатическом процессе*

Такой вид первого начала термодинамики позволяет легко вычислить работу, совершаемую газом:

$$dA = -dU = -\nu C_V dT,$$

или для конечного адиабатического процесса:

$$A = \nu C_V(T_1 - T_2) = \nu\frac{i}{2}R(T_1 - T_2) = \frac{i}{2}(P_1V_1 - P_2V_2)$$ -

- *работа, совершаемая газом при адиабатическом процессе.*

Исходя из *dU + dA = 0*, выведем закон, которому удовлетворяют параметры газа при адиабатическом процессе. Для этого *dU* и *dA* представим в виде

$$dU = \nu C_V dT$$

$$dA = \nu RT\frac{dV}{V},$$

Подставив это выражение в *dU + dA = 0*, получим дифференциальное уравнение:

$$\nu C_V dT + \nu RT\frac{dV}{V} = 0,$$

которое, разделив на $\nu C_V T$ и используя соотношения

$$R = C_P - C_V, \qquad \frac{C_P}{C_V} = \gamma,$$

можно записать в виде

$$\frac{dT}{T} = (\gamma - 1)\frac{dV}{V} = 0.$$

Это дифференциальное уравнение приводится к полному дифференциалу:

$$d(\ln(TV^{\gamma-1})) = 0.$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$\ln(TV^{\gamma-1}) = \ln const$$

или

$TV^{\gamma-1} = const$ уравнение адиабатического процесса в переменных(T,V).

Воспользовавшись уравнением Менделеева-Клапейрона $PV = \nu RT$, можно перейти к переменным (P,V) и (T,P).

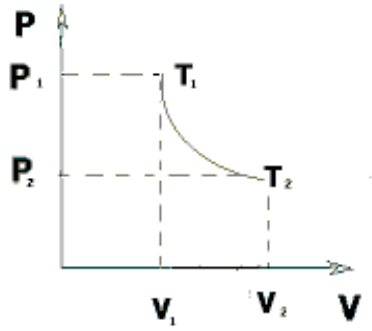
Например, из $PV = \nu RT \Rightarrow \frac{T}{V} = \frac{P}{\nu R}$. Подставляя это в уравнение $TV^{\gamma-1} = const$, получим

$$\frac{T}{V}V^{\gamma} = \frac{PV^{\gamma}}{zR} = const,$$

или

$$PV^{\gamma} = const \text{ - } \quad \textit{уравнение Пуассона},$$

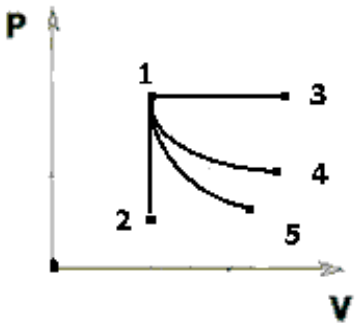
где γ -коэффициент Пуассона.



$$\left.\begin{aligned} TV^{\gamma-1} &= const \\ PV^{\gamma} &= const \\ \frac{T^{\gamma}}{P^{\gamma-1}} &= const \end{aligned}\right\} \text{ - } \textit{уравнения адиабаты.}$$

Графики изопроцессов

Представим графики всех изопроцессов в одних и тех же координатных осях (P,V), причём пусть все они начинаются из одного и того же начального соединения 1.



$1 \to 2 - изохора, V = const, dA = 0$

$1 \to 3 - изобара, P = const,$

$1 \to 4 - изотерма, T = const, dU = 0$

$1 \to 5 - адиабата, \qquad , dQ = 0$

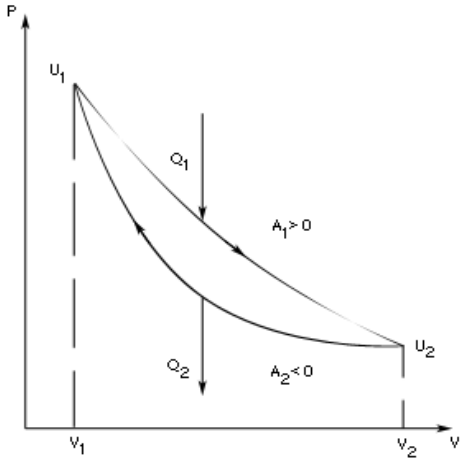
Сравним уравнения изотермы $PV = const$ и адиабаты $PV^{\gamma} = const$. Поскольку $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i} > 1$, то адиабата идёт круче изотермы, что видно с графиков изопроцессов.

Второе начало термодинамики

В термодинамике большую роль играют понятия равновесного состояния и обратимого процесса. *Равновесным состоянием* системы называется такое состояние, при котором параметры системы имеют определённые значения, остающиеся при неизменных внешних условиях постоянными сколько угодно долго. Процесс, состоящий из непрерывной последовательности равновесных состояний, называется *равновесным или квазистатическим*. Из сказанного следует, что равновесным может быть только бесконечно медленный процесс. При достаточно медленном протекании реальные процессы могут приближаться к равновесному процессу сколько угодно близко. Равновесный процесс может быть проведен в обратном направлении, причём система будет проходит через те же состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Поэтому равновесные процессы называют также *обратимыми процессами*. В случае обратимого процесса при возвращении в исходное состояние ни в самой системе, ни в окружающих телах не остаётся никаких изменений. Если такие изменения появляются, то такой процесс называется *необратимым процессом*. Все реальные процессы необратимы. В механических процессах необратимость вызывается трением.

Процесс, при котором система переходит из состояния 1 в состояние 2, а затем возвращается в состояние 1 через другие промежуточные процессы, называется *круговым процессом или циклом*. Графически цикл изображается замкнутой кривой.

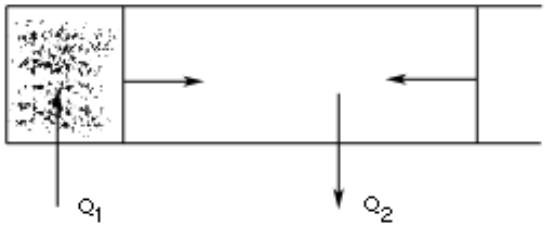
Всякая тепловая машина представляет собой систему, совершающую много кратно некий круговой процесс (цикл). Пусть в ходе цикла рабочее вещество (например, газ) сначала расширяется до объёма V_2, а затем сжимается до первоначального объёма V_1. Чтобы работа за цикл была больше нуля, давление, (а, следовательно, и температура) в процессе расширения должно быть больше, чем при сжатии. Для этого рабочему веществу нужно в ходе расширения сообщать теплоту, а в ходе сжатия отнимать от него теплоту. Совершив цикл, рабочее вещество возвращается в исходное состояние. Поэтому изменение внутренней энергии за цикл равно нулю. Количество теплоты, сообщаемой рабочему телу за цикл, равно



$$Q_1 - Q_2,$$

где Q_1 – теплота, получаемая рабочим телом при расширении, а Q_2 – теплота, отдаваемая при сжатии. Работа A, совершаемая за цикл, равна площади цикла. Таким образом, первое начало термодинамики, написанное для цикла, имеет вид

$$Q_1 - Q_2 = A \qquad (8).$$



Как следует из этого выражения, не вся получаемая извне теплота Q_1 используется для получения полезной работы.

Коэффициентом полезного действия η (сокращённо КПД) тепловой машины называется отношение совершаемой за цикл работы A к полученной за цикл теплоте Q_1

$$\eta = \frac{A}{Q_1}.$$

Приняв во внимание соотношение (8), выражение для КПД можно записать в виде

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \qquad (9)$$

Второе начало термодинамики:

Невозможно построить периодически действующую тепловую машину, которая бы всю подводимую к ней теплоту превращала в работу, т.е. всегда $\eta < 1$.

Цикл Карно и его КПД

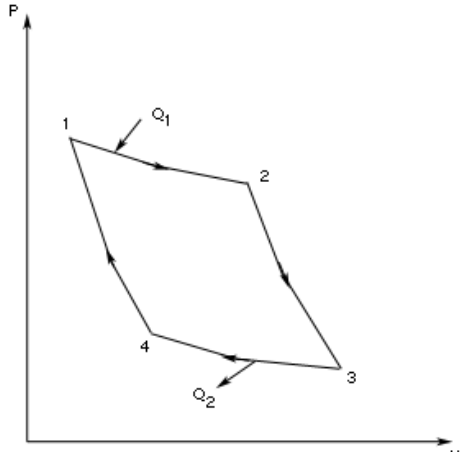
Французский инженер Сади Карно предложил идеальный цикл, который даёт максимальное КПД т.е. η_{max}. Этот цикл состоит из двух изотерм и двух адиабат и носит название *цикла Карно*.

$1 \to 2$ - изотермическое расширение при T_1,

$2 \to 3$ - адиабатическое расширение, $dQ = 0$,

$3 \to 4$ - изотермическое сжатие при T_2,

$4 \to 1$ - изотермическое сжатие, $dQ = 0$.



Вычислим КПД цикла Карно для идеального газа. При изотермическом процессе внутренняя энергия идеального газа остаётся постоянной. Поэтому количество полученной газом теплоты Q_1 равно работе A_{12}, совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2. Эта работа равна

$$Q_1 = A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

где m – масса идеального газа в тепловой машине.

Количество отдаваемой холодильнику теплоты Q_2 равно работе A_{34}, затраченной на сжатие газа при переходе его из состояния 3 в состояние 4. Эта работа равна

$$Q_2 = A_{34} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}.$$

Для того чтобы цикл был замкнутым, состояние *1* и *4* должны лежать на одной и той же адиабате. Отсюда вытекает условие

$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_4^{\gamma-1}$.

Аналогично для состояний *2* и *3* должно вытекать условие

$T_1V_2^{\gamma-1} = T_2V_3^{\gamma-1}$.

Разделив одно соотношение на другое, приходим к условию замкнутости цикла

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$.

Теперь подставляя Q_1 и Q_2 в выражение для КПД, получим

$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

В результате получим формулу для КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \qquad (10)$$

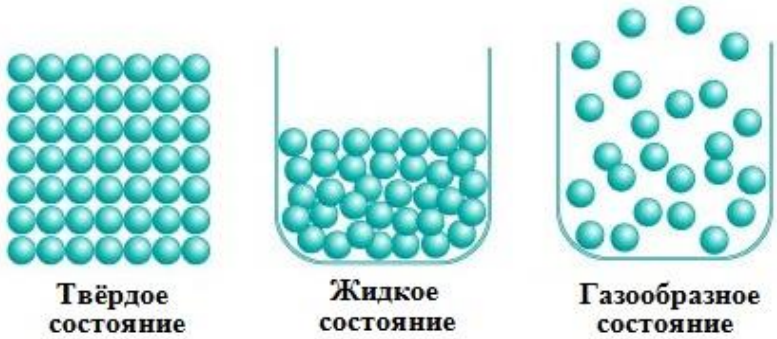
где T_1 - температура нагревателя, T_2 - температура холодильника. КПД цикла Карно является максимальным КПД из всех возможных циклов, осуществляемых в данных температурных интервалах T_1 и T_2.

Фазовые переходы

В зависимости от условий тела могут находиться в различных агрегатных состояниях. Переход из одного агрегатного состояния в другое называется **фазовым переходом**.

Вещества могут находиться в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном. Молекулярные силы в разных агрегатных состояниях различны: в твердом состоянии они наибольшие, в газообразном — наименьшие. Различием молекулярных сил объясняются *свойства, которые проявляются в разных агрегатных состояниях*:

- твердые тела сохраняют объем и форму (несжимаемы), имеют кристаллическое строение, характеризуются плотной упаковкой и дальним порядком в расположении частиц;
- жидкости текучи, практически не сжимаются (сохраняют объем), принимают форму сосуда, характеризуются плотной упаковкой и ближним порядком в расположении частиц;
- газы легко сжимаются, полностью занимают весь предоставленный им объем, имеют малую плотность, характеризуются большими расстояниями и слабым взаимодействием частиц вещества.



В твердых телах расстояние между молекулами маленькое и преобладают силы взаимодействия. Поэтому твердые тела обладают свойством сохранять форму и объем. Молекулы твердых тел находятся в постоянном движении, но каждая молекула движется около положения равновесия.

В жидкостях расстояние между молекулами побольше, значит, меньше и силы взаимодействия. Поэтому жидкость сохраняет объем, но легко меняет форму.

В газах силы взаимодействия совсем невелики, так как расстояние между молекулами газа в несколько десятков раз больше размеров молекул. Поэтому газ занимает весь предоставленный ему объем.

Из закона сохранения энергии (т. к. система изолированная) следует, что количество теплоты, потерянное телами с более высокой температурой, будет равно количеству теплоты, приобретенному телами с более низкими температурами.

Уравнение теплового баланса:

$Q_{отд}=Q_{получ}$,

где $Q_{отд}$ − количество теплоты, отданное «горячими» телами,

$Q_{получ}$ − количество теплоты, полученное «холодными» телами.

Факт того, что количество теплоты, потерянное «горячими» телами, равно количеству теплоты, приобретенному «холодными телами», называется **законом теплообмена**.

В приведенном выше подходе при составлении уравнения теплового баланса мы везде из большего значения температуры должны вычитать меньшее, чтобы значения количеств теплоты всегда были положительными.

Плавление вещества − переход вещества из твердого состояния в жидкое.

Этот фазовый переход всегда сопровождается поглощением энергии, т. е. к веществу необходимо подводить теплоту. При этом внутренняя энергия вещества увеличивается. Плавление происходит только при определенной температуре, называемой температурой плавления. Каждое вещество имеет свою температуру плавления. Например, у льда $t_{пл}=0^0C$.

Пока происходит плавление, температура вещества не изменяется.

Что надо сделать, что расплавить вещество массой m? Сначала нужно его нагреть до температуры плавления $t_{пл}$, сообщив количество теплоты

$Q=c\cdot m\cdot \Delta T$,

где c − удельная теплоемкость вещества.

Затем необходимо подвести количество теплоты

$Q=\lambda\cdot m$,

где λ − удельная теплота плавления вещества.

Само плавление будет происходить при постоянной температуре, равной температуре плавления.

Кристаллизация (затвердевание) вещества − переход вещества из жидкого состояния в твердое.

Это процесс, обратный плавлению. Кристаллизация всегда сопровождается выделением энергии, т. е. от вещества необходимо отводить теплоту. При этом внутренняя энергия вещества уменьшается. Она происходит только при определенной температуре, совпадающей с температурой плавления.

Пока происходит кристаллизация, температура вещества не изменяется.

Что надо сделать, что вещество массой m кристаллизовалось? Сначала нужно его охладить до температуры плавления $t_{пл}$, отведя количество теплоты

$Q=c\cdot m\cdot \Delta T$,

где c − удельная теплоемкость вещества.

Затем необходимо отвести количество теплоты

$Q=\lambda\cdot m$,

где λ − удельная теплота плавления вещества.

Кристаллизация будет происходить при постоянной температуре, равной температуре плавления.

Парообразование вещества − переход вещества из жидкого состояния в газообразное.

Этот фазовый переход всегда сопровождается поглощением энергии, т. е. к веществу необходимо подводить теплоту. При этом внутренняя энергия вещества увеличивается.

Различают два вида парообразования: испарение и кипение.

Испарение − парообразование с поверхности жидкости, происходящее при любой температуре.

Скорость испарения зависит от:

- температуры;
- площади поверхности;
- рода жидкости;
- ветра.

Кипение − парообразование по всему объему жидкости, которое происходит только при определенной температуре, называемой температурой кипения.

Каждое вещество имеет свою температуру кипения. Например, у воды $t_{кип}=100^0C$. Пока происходит кипение, температура вещества не изменяется.

Что надо сделать, чтобы вещество массой m выкипело? Сначала нужно его нагреть до температуры кипения $t_{кип}$, сообщив количество теплоты

$Q=c\cdot m\cdot \Delta T$,

где c − удельная теплоемкость вещества.

Затем необходимо подвести количество теплоты

$Q=L\cdot m$,

где L − удельная теплота парообразования вещества.

Само кипение будет происходить при постоянной температуре, равной температуре кипения.

Конденсация вещества − переход вещества из газообразного состояния в жидкое.

Это процесс, обратный парообразованию. Конденсация всегда сопровождается выделением энергии, т. е. от вещества необходимо отводить теплоту. При этом внутренняя энергия вещества уменьшается. Она происходит только при определенной температуре, совпадающей с температурой кипения.

Пока происходит конденсация, температура вещества не изменяется.

Что надо сделать, чтобы вещество массой m сконденсировалось? Сначала нужно его охладить до температуры кипения $t_{кип}$, отведя количество теплоты

$Q=c\cdot m\cdot \Delta T$,

где c − удельная теплоемкость вещества.

Затем необходимо отвести количество теплоты

$Q=L\cdot m$,

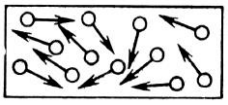
где L − удельная теплота парообразования вещества.

Конденсация будет происходить при постоянной температуре, равной температуре кипения.

Абсолютная влажность воздуха. Парциональное давление водяного пара.

Выражаетсярв кг/м^3.

Абсолютная влажность воздуха (упругость пара) показывает, какая масса m воды со-

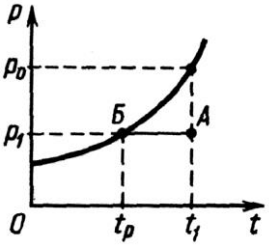


держится в единице объема V: $\rho=\frac{m}{V}$

Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называется парциальным давлением ($P_п$).

Относительная влажность воздуха

Относительной влажностью воздуха φ называется величина, равная отношению давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенного пара при той же температуре. $\varphi=\frac{p_п}{p_0}\cdot 100\%$

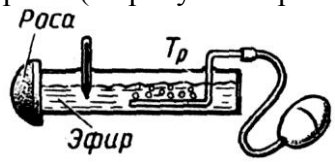


Если $p=\frac{\rho RT}{M}$, то $p_п=\frac{\rho_п RT}{M}$; $p_0=\frac{\rho_0 RT}{M}\rightarrow \varphi=\frac{\rho_п}{\rho_0}\rightarrow \varphi=\frac{\rho_п}{\rho_0}\cdot 100\%$.

Точка росы

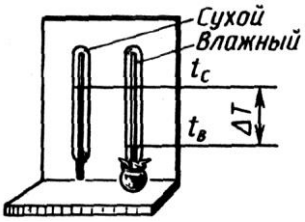
Понижается t при $p_{атм}$= const, и при определенной t пар становится насыщенным.

Температура, при которой водяной пар становится насыщенным, называется точкой росы.(на рисунке переход из точки А в точку В)



Экспериментальное определение относительной влажности воздуха

1. Гигрометр. Зная t точки росы и t воздуха, по таблицам находим $p_п$ и $p_н$ и определяем относительную влажность: $\varphi = \frac{p_п}{p_0} \cdot 100\%$.



2.Психрометр(от греческого «психриа» — холод)

Зная t сухого и влажного термометров и разность Δt, по таблицам определяем φ.

Задачи

Пример №3. Определить количество вещества в молях, содержащегося в 1 кг ртути; в 5,6 дм^3 кислорода при нормальных условиях.

Дано: m_1= 1кг. – масса ртути; V_0= 5,6=5,6 $\cdot 10^{-3}$ м^3 – объем кислорода при нормальных условиях; из таблиц: M_1 =200,6 $\cdot 10^{-3}$кг/моль – молярная масса ртути; M_2 = 32 $\cdot 10^{-3}$кг/моль – молярная масса кислорода; ρ_0=1,43 кг/м^3 – плотность кислорода при нормальных условиях.

Найти: ν_1 – количество вещества в 1 кг ртути; ν_2 – количество вещества в 5,6 дм^3 кислорода.

Решение. Количество вещества в 1 кг ртути определимо соотношением

$$\nu_1 = \frac{m_1}{M_1}\ ;\ \nu_1 = \frac{1кг.}{200{,}6 \cdot 10^{-3} кг/моль} = 4{,}98 моль.$$

Для определения количества вещества в 5,6 дм^3 кислорода. Найдем массу кислорода m_2:

$m_2 = p_0V_0$. Тогда

$$\nu_2 = \frac{p_0 V_0}{M_2}\ ;\ \nu_2 = \frac{1{,}43 кг/м^3 \cdot 5{,}6 \cdot 10^{-3} м^3}{32 \cdot 10^{-3} кг/моль} = 0{,}25 моль.$$

Ответ. Количество вещества в 1кг ртути приблизительно равно 5 моль, в 5,6 дм^3 кислорода – 0,25 моль.

Пример №4. Сколько молекул воздуха содержится в комнате объемом 60 м^3 при нормальных условиях? Молярная масса воздуха M=29 $\cdot 10^{-3}$ кг/моль, плотность воздуха ρ=1,29 кг/м^3.

Дано:	Решение:
M = 29 $\cdot 10^{-3}$ кг/моль ρ_0 = 1,29 кг/м^3 V_0 =60 м^3 N_A = 6,02$\cdot 10^{23}$моль$^{-1}$	N=m/m_0, где m – масса воздуха в комнате; m_0 - масса одной молекулы. Но m = $\rho_0 V_0$; m_0 = M/N_A. Тогда $N = \frac{\rho_0 V_0 N_A}{M}$; $N = \frac{1{,}29 кг/м^3 \cdot 60 м^3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} моль^{-1}}{29 кг/моль} = 1{,}6 \cdot 10^{27}$.
N - ?	Ответ: N = 1, 6 $\cdot 10^{27}$

Пример №5. В 1м^3 газа при давлении 1,2·10^{5}Па содержится 2·10^{25} молекул, средняя квадратичная скорость которых 600 м/с. Определить массу одной молекулы этого газа.

Дано:
p = 1.2 ·10^5 Па
n = 2·10^{25}м$^{-3}$
$\overline{\upsilon}_{кв}$ =6·10^2 м/с

m$_0$-?

Решение.
Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов p=1/3 m$_0$n$\overline{\upsilon}^2$ выразим m$_0$: $m_0 = \frac{3p}{n\overline{\upsilon}^{+2}}$

$$m_0 = \frac{3 \cdot 1.2 \cdot 10^5 Н/м^2}{2 \cdot 10^{25} м^{-3} \cdot 36 \cdot 10^4 м^2/с^2} = 5 \cdot 10^{-26} кг.$$

Ответ: m$_0$ = 5·10^{-26}кг.

Пример №6. Под каким давлением находится кислород в баллоне, если при температуре 27°С его плотность 6,24кг/м^3?

Дано:
M=32·10^{-3} кг/моль
T=300К
ρ=6,24кг/м^3
R=8,31Дж/(моль·К)

p-?

Решение:
Преобразуем уравнение Клапейрона – Менделеева к виду $p = \frac{m}{VM}RT$, но $\frac{m}{V} = \rho$; $P = \frac{\rho RT}{M}$;

$$p = \frac{6.24 кг/м^3 \cdot 8{,}31 Дж/(моль \cdot К) \cdot 300 К}{32 \cdot 10^{-3} кг/моль} = 4{,}86 \cdot 10^5 Н/м^2 = 4{,}9 \cdot 10^5 Па$$

Ответ:p=4,9·10^{5}Па

Пример №7. Углекислому газу CO_2 сообщено 40 кДж теплоты. Определить при изобарном расширении расход энергии на увеличение объема газа и изменении внутренней энергии.

Дано:
Q=40кДж
p=const

A-?, ΔU-?

Решение:
Работа газа при изобарном процессе $A = p\Delta V = \frac{m}{M}R\Delta T$. Измерение внутренней энергии трехатомного идеального газа ΔU=3pΔV=3A.
На основании первого начала термодинамики имеем Q=ΔU+A=3A+A=4A; откуда $A = \frac{Q}{4}$

$A = \frac{40 кДж}{4} = 10 кДж$; ΔU=30кДж.

Ответ: A=10кДж, ΔU=30кДж.

Контрольные вопросы

1. Какие опытные факты наглядно подтверждают хаотический характер движения молекул и связи между интенсивностью этого движения и температурой?
2. Чем объяснить, что в жидкостях диффузия протекает гораздо медленнее, чем в газах?
3. Какой физический процесс имеет место при окрашивании поверхности твердых тел?

4. Поваренная соль, помещенная в воду, через некоторое время после её растворения равномерно распределяется по всему объему. Чем это объясняется?
5. Почему мерные плитки (плитки Иогансона) при плотном соприкосновении торцами слипаются?
6. Что положено в основу склеивания твердых тел?
7. Привести примеры физических явлений, подтверждающих наличие сил притяжения и отталкивания между молекулами?
8. Из каких элементарных частиц состоят атомы и молекулы вещества?
9. Привести пример физического явления, подтверждающего движение молекул.
10. Каков физический смысл абсолютного нуля термодинамической шкалы температур?
11. Объяснить физический смысл молярной и газовой постоянной.

РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.

Тема 3.1. Электрические взаимодействия

Многие физические явления, наблюдаемые в природе и окружающей нас жизни, не могут быть объяснены только на основе законов механики, молекулярно-кинетической теории и термодинамики. В этих явлениях проявляются силы, действующие между телами на расстоянии, причем эти силы не зависят от масс взаимодействующих тел и, следовательно, не являются гравитационными. Эти силы называют **электромагнитными силами.**

О существовании электромагнитных сил знали еще древние греки. Но систематическое, количественное изучение физических явлений, в которых проявляется электромагнитное взаимодействие тел, началось только в конце XVIII века. Трудами многих ученых в XIX веке завершилось создание стройной науки, изучающей электрические и магнитные явления. Эта наука, которая является одним из важнейших разделов физики, получила название **электродинамики.**

Основными объектами изучения в электродинамике являются электрические и магнитные поля, создаваемые электрическими зарядами и токами.

Из повседневной жизни мы хорошо знаем, что многие предметы после натирания начинают притягивать к себе соринки, мелкие бумажки, волосы и т.п. Такое притяжение к натертым предметам обусловлено находящимися на них **электрическими зарядами**, поэтому такие тела называют **наэлектризованными**.

Существует три **способа электризации тел**.

1. Электризация трением.
2. Электризация соприкосновением.
3. Электризация через влияние.

Подобно понятию гравитационной массы тела в механике Ньютона, понятие заряда в электродинамике является первичным, основным понятием.

Электрический заряд – *это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия. Он определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий.*

Электрический заряд обычно обозначается буквами $\boldsymbol{q}$ или $\boldsymbol{Q}$**.**

В Международной системе СИ за единицу заряда принят **кулон** (Кл). **Кулон** – это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 ампер.

Совокупность всех известных экспериментальных фактов позволяет сделать следующие выводы:

- **Существует два рода электрических зарядов**, условно названных **положительными** (образуется на стекле, потертом о шелк или кожу) **и отрицательными** (образуется на янтаре, потертом о шерсть)**.**
- **Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются** (опыты с гильзами)**.**
- **Заряды могут передаваться** (например, при непосредственном контакте) **от одного тела к другому**. В отличие от массы тела электрический заряд не является неотъемлемой характеристикой данного тела. Одно и то же тело в разных условиях может иметь разный заряд.

Одним из фундаментальных законов природы является экспериментально установленный **закон сохранения электрического заряда**.

В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n = \text{const}$$

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что в замкнутой системе тел не могут наблюдаться процессы рождения или исчезновения зарядов только одного знака.

С современной точки зрения, носителями зарядов являются **элементарные частицы.**

Все обычные тела состоят из атомов, в состав которых входят *положительно заряженные* **протоны**, *отрицательно заряженные* **электроны** и *нейтральные частицы* – **нейтроны.** *Протоны и нейтроны входят в состав атомных ядер, электроны образуют электронную оболочку атомов*.

Электрические заряды протона и электрона по модулю в точности одинаковы и равны элементарному заряду e.

$$e = 1{,}602177 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}$$

В нейтральном атоме число протонов в ядре равно числу электронов в оболочке. Это число называется **атомным номером**.

Атом данного вещества может потерять один или несколько электронов или приобрести лишний электрон. В этих случаях нейтральный атом превращается в положительно или отрицательно заряженный **ион.**

Большинство тел *электрически нейтральны,* т.е. число протонов в них равно числу электронов.

Наэлектризовать тело, значит нарушить его электрическую нейтральность.

Если тело заряжено **отрицательно** – *значит, оно имеет* **избыток электронов.**

Если тело заряжено **положительно** – *значит, у него* **недостаток электронов**.

Заряд может передаваться от одного тела к другому только порциями, содержащими целое число элементарных зарядов. Таким образом, электрический заряд тела – дискретная величина:

$$q = ne \quad (n = 0,1,2...)$$

В обычных лабораторных опытах для обнаружения и измерения электрических зарядов используется **электрометр** – прибор, состоящий из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стержень со стрелкой изолирован от металлического корпуса. При соприкосновении заряженного тела со стержнем электрометра, электрические заряды одного знака распределяются по стержню и стрелке. Силы электрического отталкивания вызывают поворот стрелки на некоторый угол, по которому можно судить о заряде, переданном стержню электрометра.

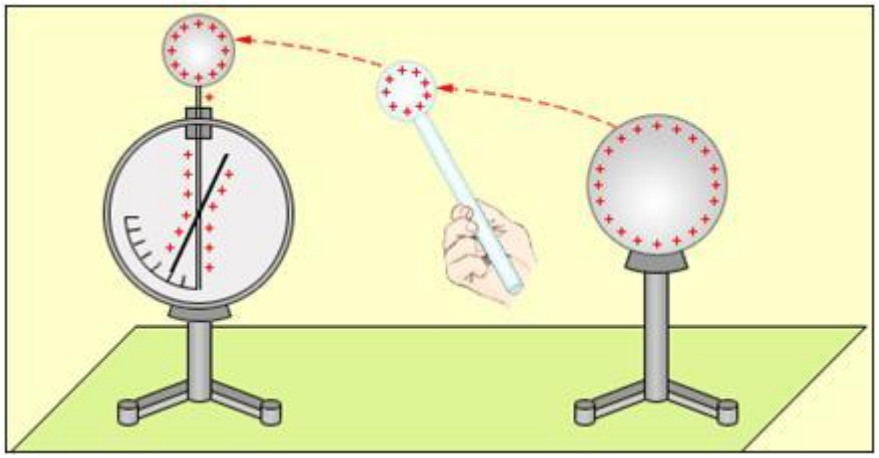


Рис.11. Перенос заряда с заряженного тела на электрометр.

Электрометр является достаточно грубым прибором; он не позволяет исследовать силы взаимодействия зарядов.

Впервые закон взаимодействия неподвижных зарядов был установлен французским физиком Ш. Кулоном (1785 г.). В своих опытах Кулон измерял силы притяжения и отталкивания заряженных шариков с помощью сконструированного им прибора – крутильных весов (рис. 12), отличавшихся чрезвычайно высокой чувствительностью. Так, например, коромысло весов поворачивалось на 1° под действием силы порядка 10^{-9} Н.

Идея измерений основывалась на блестящей догадке Кулона о том, что если заряженный шарик привести в контакт с точно таким же незаряженным, то заряд первого разделится между ними поровну. Таким образом, был указан способ изменять заряд шарика в два, три и т. д. раз. В опытах Кулона измерялось взаимодействие между шариками, размеры которых много меньше расстояния между ними. Такие заряженные тела принято называть **точечными зарядами**.

Точечным зарядом *называют заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.*

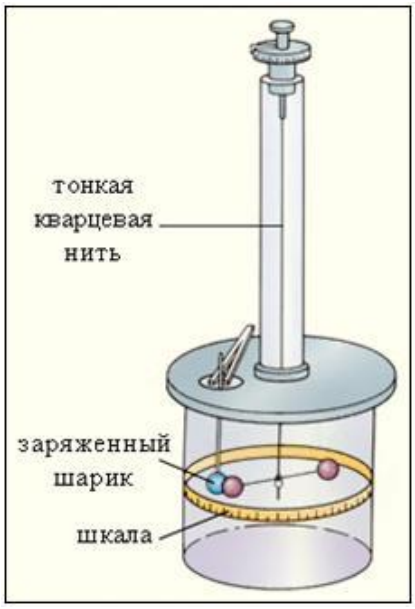


Рис.12. Прибор Кулона.

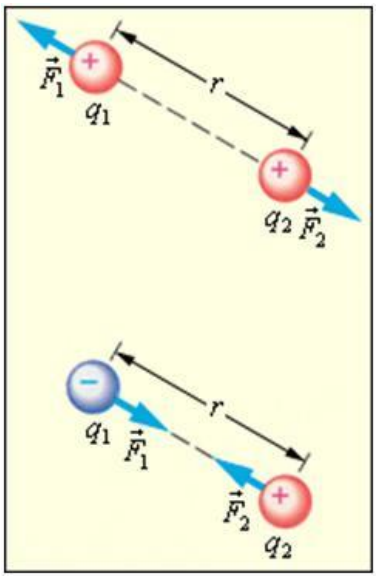
На основании многочисленных опытов Кулон установил следующий закон:

Силы взаимодействия неподвижных зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними:

$$F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

Коэффициент пропорциональности *k* в законе Кулона зависит от выбора системы единиц. Коэффициент *k* в системе СИ обычно записывают в виде: $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, где – $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ *электрическая постоянная*.

Силы взаимодействия подчиняются третьему закону Ньютона: $F_1 = - F_2$. Они являются силами отталкивания при одинаковых знаках зарядов и силами притяжения при разных знаках.



Силы взаимодействия одноименных и разноименных зарядов.

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют **электростатическим** или **кулоновским** взаимодействием.

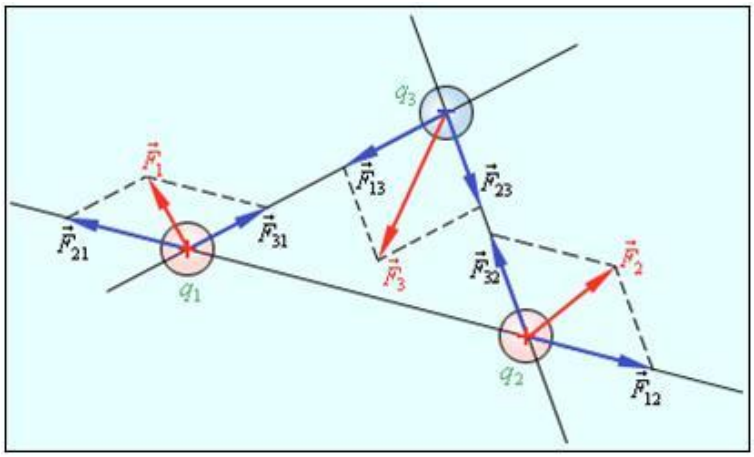
Раздел электродинамики, изучающий кулоновское взаимодействие, называют **электростатикой**.

Практически закон Кулона хорошо выполняется, если размеры заряженных тел много меньше расстояния между ними. Закон Кулона справедлив для точечных заряженных тел.

Опыт показывает, что силы кулоновского взаимодействия подчиняются **принципу суперпозиции.**

Если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел.

Рисунок поясняет принцип суперпозиции на примере электростатического взаимодействия трех заряженных тел:



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32}$$

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

Тема 3.2. Свойства электрического поля

Свойства электрического поля:

1. Оно материально, т.е. существует независимо от нас и наших знаний о нём.

2. Оно создаётся электрическими зарядами (заряженными телами)

3. Оно обнаруживается по взаимодействию электрических зарядов (заряженных тел)

4. Оно действует на электрические заряды (заряженные тела) с некоторой силой.

5. Электрическое поле непосредственно невидимо, но может наблюдаться по его действию и с помощью приборов.

6. Электрическое поле является одной из составляющих единого электромагнитного поля и проявлением электромагнитного взаимодействия.

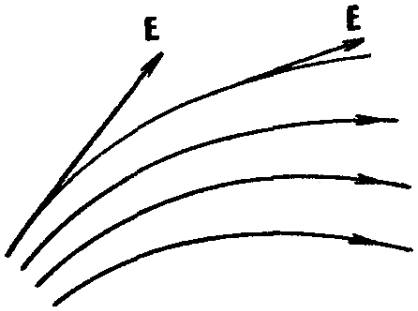
7. Для количественного определения электрического поля вводится силовая характеристика напряженность электрического поля.

Напряженностью электрического поля называют физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда

Напряженность электрического поля – векторная физическая величина.

Направление вектора совпадает в каждой точке пространства с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



Напряженность электрического поля точечного заряда q_1 в вакууме можно найти из закона Кулона:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{12}^3}\vec{r}_{12}.$$

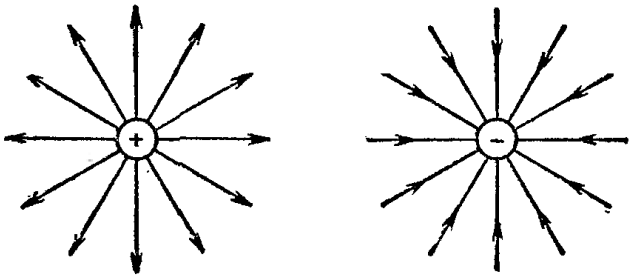
Введя, для упрощения записей, обозначения $r_{12} = r, q_1 = q$, получим

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^3}\vec{r},$$

или в скалярном виде

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}.$$

Направление вектора напряженности $\vec{E}$ совпадает (по определению) с направлением силы, действующей на положительный заряд. Графически электростатическое поле можно изобразить при помощи силовых линий (линий вектора напряженности). Силовыми линиями называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля. Силовые линии считаются направленными так же, как и вектор напряженности. Они нигде не пересекаются, поскольку в каждой точке поля вектор $\vec{E}$ имеет лишь одно направление. Принято считать, что количество силовых линий, проведенных в некоторой области пространства, должно быть пропорционально напряженности электрического поля в этой области.



Исходя из закона Кулона, силовые линии поля, создаваемого точечным зарядом, радиально направлены либо к заряду, либо от него.

8. Энергетической характеристикой поля является *потенциал*.

Физическую величину, равную отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда, называют потенциалом φ электрического поля:

Потенциал φ является энергетической характеристикой электростатического поля.

В Международной системе единиц (СИ) единицей потенциала является вольт (В): 1 В = 1 Дж / 1 Кл.

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

Разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между точками *1* и *2* называется работа, совершаемая силами поля при перемещении единичного положительного заряда по произвольному пути из точки *1* в точку *2*. Такое определение имеет смысл потому, что эта работа не зависит от формы пути, а определяется только положениями начальной и конечной точек его. Потенциалу какой-либо произвольной точки поля *O* можно условно приписать любое значение φ_0. Тогда потенциалы всех прочих точек поля определятся однозначно. Если изменить значение φ_0, то потенциалы в точке *O* и во всех других точках изменятся на одну и ту же постоянную. Т. о., потенциал определен с точностью до аддитивной постоянной. Значение этой постоянной не играет роли, так как физические явления зависят только от напряженностей электрических полей. Электрические же поля связаны не с абсолютными значениями потенциалов, а с их разностями между различными точками пространства.

Работа сил поля при перемещении заряда q_0 по произвольному пути из начальной точки *1* в конечную точку *2* определятся выражением

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Проводники в электрическом поле.

Проводник – вещество, имеющее свободные заряженные частицы.

В металлах это электроны; в электролитах это ионы.

Внутри проводника эти носители движутся хаотически. Если металлический проводник поместить в электрическое поле, то под действием этого поля электроны будут перемещаться в направлении, противоположном напряженности поля. Поле внутри проводника ослабляется. В результате смещения электронов на одном из концов проводника возникает избыток положительных зарядов, а на другом – избыток электронов.

И так, когда проводник попадает в электрическое поле, то он электризуется так, что на одном его конце возникает положительный заряд, а на другом – такой же по величине отрицательный заряд.

Перераспределение зарядов в проводнике, помещенном в электрическое поле, называется электростатической индукцией.

Заряды перераспределяются таким образом, что напряженность поля внутри проводника равна нулю, а поверхность проводника являлась эквипотенциальной.

И так внутри проводника напряженности нет. На этом основана электростатическая защита.

Диэлектрики в электрическом поле.

Диэлектрики – вещества, в которых отсутствуют свободные заряженные частицы.

Все электрические заряды диэлектрика входят в состав его молекул и могут смещаться лишь на малые расстояния в пределах молекул и атомов.

Существуют полярные и не полярные диэлектрики.

Полярные диэлектрики – диэлектрики, состоящие из атомов и молекул у которых центры положительных и отрицательных зарядов каждой молекулы разделены даже в отсутствии поля.

Неполярные диэлектрики - диэлектрики, состоящие из атомов и молекул у которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают.

При внесении диэлектриков во внешнее электрическое поле происходит его поляризация, то есть появление на его поверхности связанных электрических зарядов.

Связанные электрические заряды на поверхности диэлектрика создают внутри него поле, направленное противоположно внешнему полю, электрическое поле внутри диэлектрика ослабляется.

Диэлектрическая проницаемость среды – физическая величина, показывающая во сколько раз модуль напряженности электрического поля внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряженности поля и вакууме.

Электроемкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля

Если взять уединенное проводящее тело и сообщить ему электрический заряд, то тело приобретет некоторый потенциал. Меняя заряд, можно менять и потенциал, но отношение заряда к потенциалу будет оставаться величиной постоянной. Для других тел это отношение тоже будет постоянно, но будет иметь другие значения. Таким образом, это отношение будет являться электрической характеристикой тела. Его называют *электроемкостью* этого тела.

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad ; \quad [C] = ф \quad ; \quad 1ф = 10^{6} мкф = 10^{12} пкф$$

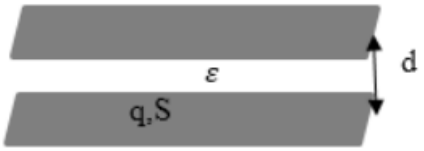
Емкость уединенного тела зависит от его размеров. Для проводящей сферы емкость подсчитывается по формуле:

$$C = 4\pi\varepsilon_0 R$$

где R - радиус сферы.

Если считать Землю проводящим телом, то ее емкость будет всего лишь около 700 мкф. Приближая к данному телу другое тело, емкость системы можно значительно увеличить. Наибольшей емкостью может обладать система электрическим конденсатором. Тела, составляющие систему, обладают одинаковым по модулю, но противоположным по знаку зарядом. Силовые линии, начинающиеся на одном из этих тел, заканчиваются на другом. Эти тела называются обкладками конденсатора. В зависимости от формы обкладок плоские конденсаторы (обкладки- параллельные плоскости), сферические (обкладки - две сферы с общим центром, вложенные одна в другую), трубчатые или цилиндрические (обкладки - два цилиндра разного радиуса с общей осью) и т.д.

При заполнении пространства между обкладками диэлектриком емкость конденсатора возрастает в раз. - диэлектрическая проницаемость вещества. Формула для подсчета емкости плоского конденсатора имеет вид



$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

S - площадь обкладок, *d* - расстояние между ними.

Конденсаторы можно соединять в батареи. При параллельном соединении емкость батареи *C* равна сумме емкостей конденсаторов:

$C = C_1 + C_2 + C_3$.

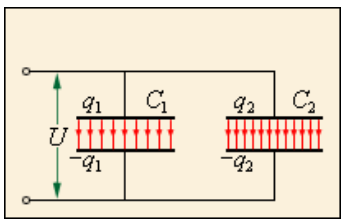
Разности потенциалов между обкладками одинаковы, а заряды прямо пропорциональны емкостям:

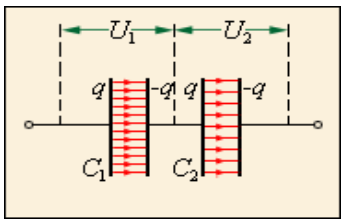
При последовательном соединении величина, обратная емкости батареи, равна сумме обратных емкостей, входящих в батарею:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Заряды на конденсаторах одинаковы, а разности потенциалов обратно пропорциональны емкостям:

$$U_1 : U_2 : U_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}$$





Заряженный конденсатор обладает энергией. Энергию заряженного конденсатора можно подсчитать по любой из следующих формул

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$$

Поскольку электрическое поле в конденсаторе расположено между его обкладками, то энергия конденсатора является энергией этого поля. Для плоского конденсатора ее можно подсчитать:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2 \cdot d}{d \cdot 2 \cdot d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2 V}{2d^2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 V}{2}$$

E- напряженность электрического поля; *V* - объем конденсатора. Это соотношение позволяет подсчитать энергию, приходящуюся на единицу объема поля - объемную плотность энергиии электрического поля (w).

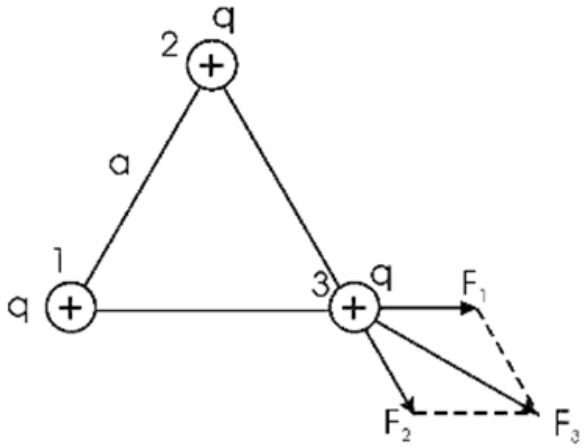
$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$

Задачи

Пример №8. Три одинаковых точечных заряда $q_1=q_2=q_3=2$ нКл находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной a=10 см. Определить модуль и направление силы F, действующей на один из зарядов со стороны двух других.

Решение

Очевидно, задача требует рисунка. Выполним его:



В данной задаче при решении применяется закон Кулона:

Сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды, пропорциональна их величинам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Она является силой притяжения, если знаки зарядов разные, и силой отталкивания, если эти знаки одинаковы.

Сила, с которой взаимодействуют заряды 1 и 2 равна:

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{a^2}$$

Так заряды равны, то

$$F_1 = F_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q^2}{a^2}$$

Треугольник равносторонний, все его углы равны 60 градусов. Искомая сила направлена по биссектрисе угла и находится по формуле:

$$F = F_3 = 2F_1 \cdot \cos 30 = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q^2}{a^2}\cos 30$$

Осталось подставить значения из условия и вычислить:

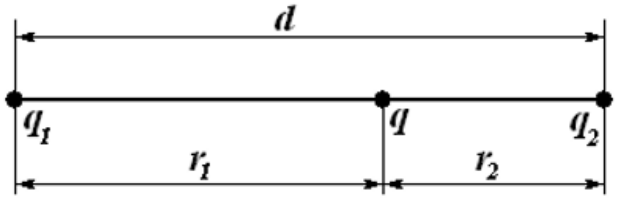
$$F = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-18}}{0.01}\cos(30) = 6.2$$

Ответ: 6,2 мкН.

Пример №9. Два положительных точечных заряда Q и 9Q закреплены на расстоянии d=100 см друг от друга. Определить, в какой точке на прямой, проходящей через заряды, следует поместить третий заряд так, чтобы он находился в равновесии. Указать, какой знак должен иметь этот заряд для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещение зарядов возможны только вдоль прямой, проходящей через закрепленные заряды.

Решение

Снова выполним рисунок:



Для равновесия зарядов необходимо, чтобы они действовали друг на друга с одинаковыми силами:

$$F_1 = F_2$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q_1 q}{r_1^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q_2 q}{r_2^2}$$

Из условия можно вычислить:

$$r_1 = l - r_2$$

Сократим и перепишем равенство сил:

$$\frac{q_1}{(l - r_2)^2} = \frac{q_2}{r_2^2}$$

$$\frac{Q}{(l - r_2)^2} = \frac{9Q}{r_2^2}$$

Отсюда находим:

$$r_2 = \frac{l\sqrt{9}}{\sqrt{9} + \sqrt{1}} = \frac{3}{10} = 0.3м$$

Для устойчивого равновесия заряд q должен быть положительным. Если он сместится из положения равновесия ближе к заряду q_2, то сила отталкивания со стороны этого заряда возрастет, а со стороны заряда q_1 – уменьшится, и заряд q возвратится в положение равновесия.

Ответ: r1=0.7м, r2=0.3м, заряд положительный.

Пример №10. Электроёмкость конденсатора, подключённого к источнику постоянного напряжения U = 1000 В, равна C_1 = 5 пФ. Расстояние между его обкладками уменьшили в n = 3 раза. Определите изменение заряда на обкладках конденсатора и энергии электрического поля.

Р е ш е н и е. Заряд конденсатора q = CU.

Отсюда изменение заряда Δq — (C_2 - C)U = (nC_1 - C_1)U = (п — 1)C_1U = 10^{-8} Кл.

Изменение энергии электрического поля

$$\Delta W_п = W_{п2} - W_{п1} = \frac{q_2U}{2} - \frac{q_1U}{2} = \frac{(q_2 - q_1)U}{2} = \frac{(n-1)C_1U^2}{2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический заряд?
2. Какова единица измерения электрического заряда?
3. Можно ли делить электрический заряд бесконечно?
4. Какой заряд называют элементарным?
5. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
6. Какое явление называется электризацией тел?
7. Как называется элементарная частица, имеющая минимальный отрицательный заряд?

РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА.

Тема 4.1. Законы постоянного тока

Понятие об электрическом токе.

Упорядоченное движение электрических зарядов называется *электрическим током*. Ток, возникающий в проводнике вследствие того, что в нем создается электрическое поле, называется током проводимости. При движении зарядов нарушается их равновесное распределение: поверхность проводника уже не является эквипотенциальной и электрические силовые линии не направлены перпендикулярно ей, так как для движения зарядов необходимо, чтобы на поверхности проводника тангенциальная составляющая напряженности электрического поля не равнялась нулю ($\vec{E}_\tau \neq 0$). Но тогда и внутри проводника должно существовать электрическое поле, ибо, как известно из электростатики, внутри проводника нет поля лишь в случае равновесного распределения зарядов на поверхности этого проводника. Перемещение зарядов – электрический ток – продолжается до тех пор, пока все точки проводника не станут эквипотенциальными.

Таким образом, для появления и существования тока проводимости необходимы два условия.

Первое – наличие в данной среде носителей заряда, т.е. заряженных частиц, которые могли бы в ней перемещаться.

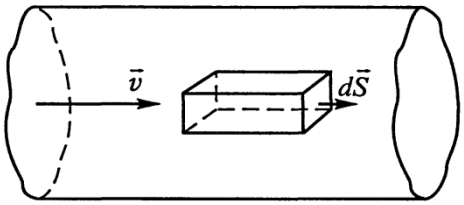
Второе – наличие в данной среде электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов. Для того чтобы ток был длительным, энергия поля должна все время пополняться, иными словами, нужен источник электрической энергии – устройство, в котором осуществляется преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля.

В металлах могут свободно перемещаться только электроны. Поэтому электрический ток в металлах есть движение электронов проводимости. В проводящих растворах нет свободных электронов, а подвижными заряженными частицами являются ионы. В газах могут существовать в подвижном состоянии и ионы, и электроны. Направлением тока условились считать направление движения положительных частиц. Поэтому направление тока в металлах противоположно направлению движения электронов.

Линии, вдоль которых происходит упорядоченное движение зарядов, называют линиями тока. За их направление (по историческим причинам) принято считать направление движения положительных зарядов.

Сила и плотность тока.

Пусть концентрация свободных электронов в металле равна *n*, а заряд каждого носителя равен *e*. Выделим внутри проводника прямоугольник с сечением площадью *dS*, перпендикулярным вектору скорости упорядоченного движения зарядов $\vec{v}$. Сечение характеризуется нормальным к нему вектором $d\vec{S}$. Построим на этом сечении параллелепипед высотой, численно равной скорости $\vec{v}$. За 1 с через выделенное сечение пройдут те и только те заряды, которые находятся внутри параллелепипеда. Они перенесут заряд



$$j = nev.$$

Если рассматривать $\vec{j}$ как вектор, то предыдущее выражение примет вид:

$$\vec{j} = ne\vec{v}.$$

Физическую величину $\vec{j}$ называют *плотностью тока*; она численно равна заряду,

проходящему в 1 с через единичное сечение проводника, перпендикулярное вектору скорости зарядов. Заметим, что при изменении знака заряда меняется и знак скорости, так что знак вектора плотности тока не изменяется.

При постоянном токе вектор $\vec{j}$ постоянен по всему выбранному сечению проводника. Поэтому, суммируя по сечению, получим:

$$\int_S \vec{j} d\vec{S} = ne\int_S \vec{v} d\vec{S} = nevS = I,$$

где I – *сила тока*, численно равная полному заряду q, проходящему через сечение проводника в единицу времени.

При токе, меняющемся во времени, это определение заменяется более общим:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Сила тока - скалярная величина.

Основной единицей в *СИ* является единица силы тока – *ампер (А)*. При силе тока 1 *А* через сечение проводника в 1 с проходит заряд, равный 1 *Кл*, следовательно,

1 Кл = 1 А с.

Единицей плотности тока является 1 *А/м*^{2}.

Если скорость упорядоченного движения зарядов не меняется, то плотность тока и сила тока также остаются постоянными во времени. Такой ток называют постоянным (или стационарным). В этом случае последнее уравнение можно переписать в виде:

$$I = \frac{q}{t},$$

где q и t – конечные (а не бесконечно малые) значения заряда и промежутка времени.

Еще раз подчеркнем, что сила тока – скалярная характеристика процесса. Распространенное выражение «направление тока» имеет смысл только по отношению к вектору плотности тока.

Закон Ома для однородного участка цепи.

При токе заряды движутся, так как внутри проводника существует электрическое поле, характеризуемое напряженностью $\vec{E}$, которое вызывает и поддерживает упорядоченное движение зарядов. Поэтому между концами проводника с током существует разность потенциалов U (ее часто называют напряжением или падением напряжения на соответствующем участке). Сила тока является функцией этой разности потенциалов:

$$I = f(U).$$

Вид этой функции обычно довольно сложен. Но есть простой частный случай, очень важный практически (токи в металлах и жидкостях), когда при данных внешних условиях (в частности, температуре) отношение разности потенциалов U к силе тока I оказывается постоянным, не зависящим от U:

$$\frac{U}{I} = R = const,$$

т. е.

$$I = \frac{U}{R}.$$

Это известный закон Ома для участка цепи.

Величина R называется сопротивлением проводника и выражается в *омах* (*Ом*):

$$1Ом = \frac{1В}{1А}.$$

Электри́ческое сопротивле́ние — физическая величина, характеризующая свой-

ство проводника препятствовать прохождению электрического тока и равная отношению напряжения на концах проводника к силе тока, протекающего по нему.

Сопротивление для цепей переменного тока и для переменных электромагнитных полей описывается понятиями импеданса и волнового сопротивления. Сопротивлением (резистором) также называют радиодеталь, предназначенную для введения в электрические цепи активного сопротивления.

Сопротивление проводника при прочих равных условиях зависит от его геометрии и от *удельного электрического сопротивления* материала, из которого он состоит.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$R = \rho\, l / S$

где ρ — *удельное сопротивление* вещества проводника, Ом·м, *l* — длина проводника, м, а *S* — площадь сечения, м².

Сопротивление однородного проводника также зависит от температуры.

Удельное сопротивление — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения.

Как показывает опыт, в металлическом проводнике концентрация свободных электронов (электронов проводимости) не зависит от напряженности поля и, следовательно, от приложенного к проводнику напряжения. Кроме того, при постоянном токе в однородном проводнике плотность тока во всех участках поперечного сечения проводника одинакова – ток распределен по сечению равномерно.

Работа и мощность постоянного тока

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу; ее принято называть работой тока.

Работа электрического тока *численно равна произведению напряжения, силы тока в цепи и времени его прохождения. Единица измерения – Джоуль.*

$$A = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t, [Дж]$$

Для измерения работы или энергии электрического тока используется электроизмерительный прибор − *счетчик электрической энергии.*

Электрическая энергия помимо джоулей измеряется в *ватт-часах* или *киловатт-часах*:

1 Вт·ч = 3 600 Дж, 1 кВт·ч = 1 000 Вт·ч.

Мощность электрического тока *– это работа, производимая (или потребляемая) в единицу времени. Единица измерения – Ватт.*

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = U \cdot I, [Вт]$$

Для измерения мощности электрического тока используется электроизмерительный прибор − *ваттметр.*

Закон Ома для полной цепи

Закон Ома для полной цепи – эмпирический (полученный из эксперимента) закон, который устанавливает связь между силой тока, электродвижущей силой (ЭДС) и внешним и внутренним сопротивлением в цепи.

При проведении реальных исследований электрических характеристик цепей с постоянным током необходимо учитывать сопротивление самого источника тока. Таким образом в физике осуществляется переход от идеального источника тока к реальному источнику тока, у которого есть свое сопротивление (см. рис. 13).

Рис. 13. Изображение идеального и реального источников тока

Рассмотрение источника тока с собственным сопротивлением обязывает использовать закон Ома для полной цепи.

Сформулируем закона Ома для полной цепи так (см. рис. 14): сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи, где под полным сопротивлением понимается сумма внешних и внутренних сопротивлений.

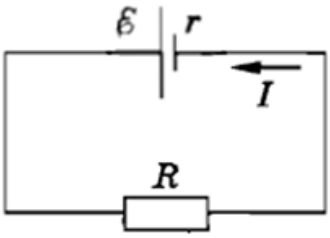


Рис. 14. Схема закона Ома для полной цепи.

Формула закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

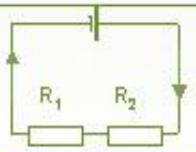
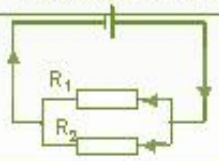
- R – внешнее сопротивление [Ом];
- r – сопротивление источника ЭДС (внутреннее) [Ом];
- I – сила тока [А];
- ε– ЭДС источника тока [В].

Последовательное и параллельное соединение проводников

Последовательное соединение – соединение, при котором конец первого проводника соединяют с началом второго, конец второго – с началом третьего и т.д.

Параллельное соединение – соединение, при котором начала всех проводников присоединяются к одной точке цепи, а их концы к другой.

Преимущества и недостатки соединений. Пример последовательного соединения: гирлянда. Пример параллельного соединения: потребители в жилых помещениях. Преимущества и недостатки соединений: Последовательное – защита цепей от перегрузок: при увеличении силы тока выходит из строя предохранитель, и цепь автоматически отключается. При выходе из строя одного из элементов соединения отключаются и остальные. Параллельное – при выходе из строя одного из элементов соединения, остальные действуют. При включении элемента с меньшим возможным напряжением в цепь элемент перегорит.

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Сила тока	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Напряжение	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Сопротивление	$R = R_1 + R_2$ $R = nR_1$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ $R = \frac{R_1}{n}$

Тема 4.2. Магнитные взаимодействия

Движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства – создают в нём магнитное поле.

Магнитное поле – особый вид материи, создаваемый движущимися электрическими зарядами или переменным электрическим полем.

Наличие такого поля обнаруживается по силовому воздействию на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты. Название «магнитное поле» связывают с ориентацией магнитной стрелки под действием силового поля, создаваемого током.

При пропускании по прямолинейному горизонтальному проводнику постоянного тока силой I находящаяся под ним магнитная стрелка поворачивается вокруг своей вертикальной оси, стремясь расположиться перпендикулярно проводнику с током (рис. 15). Ось стрелки тем точнее совпадает с этим направлением, чем больше сила тока и чем слабее влияние магнитного поля Земли. Экспериментально обнаружено, что направление поворота северного полюса (N) стрелки под действием электрического тока изменяется на противоположное при изменении направления тока в проводнике.

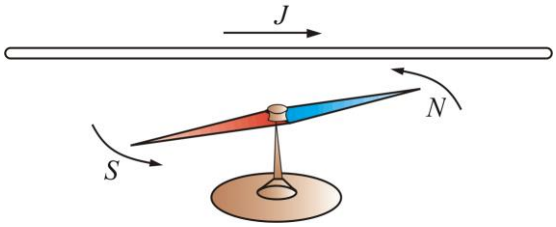


Рис. 15. Опыт Эрстеда

Подобно тому, как для исследования электрического поля мы использовали пробный точечный заряд, для исследования магнитного поля применим пробный ток, текущий по плоскому замкнутому контуру очень малых размеров. (Рис. 16).

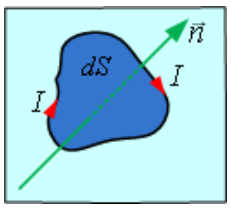


Рис. 16. Замкнутый контур с током.

Магнитное поле оказывает на контур ориентирующее действие.

Магнитная индукция(вектор магнитной индукции) – векторная физическая величина, численно равная максимальному значению вращательного момента, действующий на контур площадью 1 м^2 с током 1 А:

$$\vec{B} = \frac{M_{max}}{I \cdot S} = \frac{F}{I \cdot l}$$

Основной единицей измерения магнитной индукции в СИ является тесла ($[B] = Тл$).

Направление вектора магнитной индукции определяют по правилу буравчика: если ввинчивать правовинтовой буравчик по направлению тока, то направление вращения рукоятки буравчика будет совпадать с направлением вектора магнитной индукции.

Правило правой руки: если проводник с током обхватить правой рукой так, что большой палец покажет направление тока, то четыре пальца покажут направление вектора магнитной индукции в любой точке.

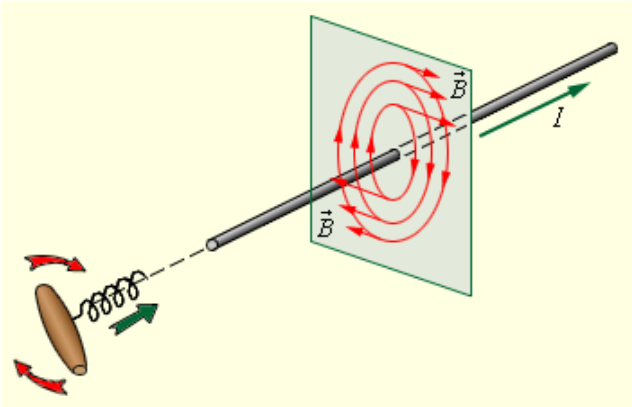


Рис.17. Правило буравчика

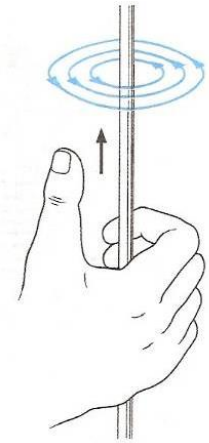


Рис. 18. Правило правой руки.

Однородное магнитное поле – магнитное поле, в котором вектор магнитной индукции во всех точках имеет одинаковое значение по модулю и направлению.

Для изображения магнитного поля применяют линии магнитнойиндукции – линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой же точке. В отличие от линий напряженности электрического поля линии магнитной индукции всегда замкнуты. Замкнутость линий магнитной индукции говорит о том, что в магнитном поле не существует источников и стоков, или в природе не существует магнитных зарядов, на которых бы они начинались или заканчивались. Магнитное поле является вихревым.

За направление магнитной линии принято направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки в каждой точке поля.

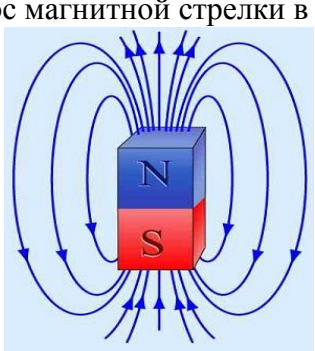


Рис. 19. Силовые линии магнитного поля магнита.

Графическое изображение магнитного поля прямого проводника с током. Направление силовых линий связано с направлением тока в проводнике.

Рис.20 Магнитное поле прямого проводника с током.

В однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ находится площадка dS. Проведем линии магнитной индукции сквозь эту площадку. Число линий проведем так, чтобы их количество было равно значению вектора магнитной индукции в данной области поля.

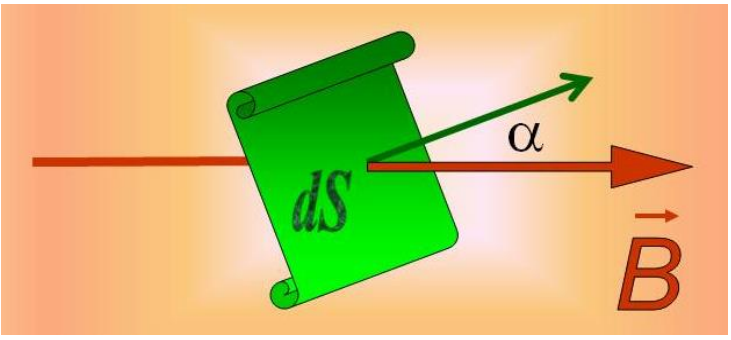


Рис.21. Поток вектора магнитной индукции

Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции) - физическая величина, численно равная числу линий магнитной индукции, проходящей сквозь данную поверхность:

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

В СИ измеряется в $[\Phi] = Вб$

Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле прямого тока и в центре кругового тока

После опытов Эрстеда начались интенсивные исследования магнитного поля постоянного тока. Французские физики Био и Савар в первой четверти XIX в. изучали магнитные поля, создаваемые в воздухе прямолинейным током, круговым током, катушкой с током и т.п. На основании многочисленных экспериментов они пришли к выводу, что магнитная индукция поля проводника с током пропорциональна силе тока, зависит от формы и размеров проводника, а также от расположения рассматриваемой точки поля относительно проводника.

Био и Савар попытались получить закон, который позволял бы рассчитывать индукцию в каждой точке магнитного поля, создаваемого током в проводнике любой формы. Однако формализовать данную задачу они не смогли. По их просьбе этой задачей занялся французский физик и математик Лаплас. Он учел векторный характер магнитной индукции и высказал гипотезу, что для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции.

Закон Био – Савара – Лапласа: величина и направление вектора магнитной индукции в произвольной точке магнитного поля, создаваемого в вакууме элементом проводника длиной dl, по которому течет ток величиной I, равна

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^2} \cdot dl \cdot \sin\alpha,$$

где r – расстояние от точки до элемента проводника,

α – угол между проводником и линией, соединяющей точку с проводником, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А2 - магнитная постоянная.

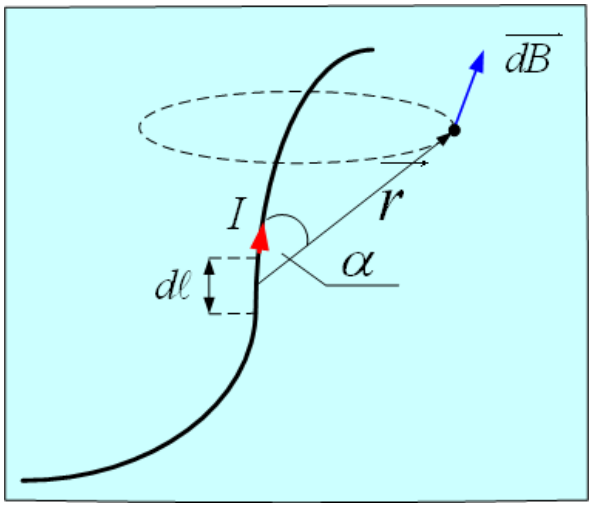


Рис. 22. Вектор магнитной индукции магнитного поля тока произвольной формы.

Направление $\overrightarrow{dB}$ перпендикулярно плоскости проходящей через $d\ell$ и линию, соединяющую элемент тока с точкой, в которой она определяется.

Магнитное поле проводника с током произвольной формы находят как векторную сумму магнитных полей отдельных элементов:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n} \overline{B}_i = \int_l d\vec{B}.$$

Применение закона Био – Савара - Лапласа позволяет определять величину вектора индукции магнитных полей, созданных различными конфигурациями токов.

Значение магнитной индукции поля, создаваемого прямолинейным проводником с током на расстоянии b от него. (Рис. 10.8):

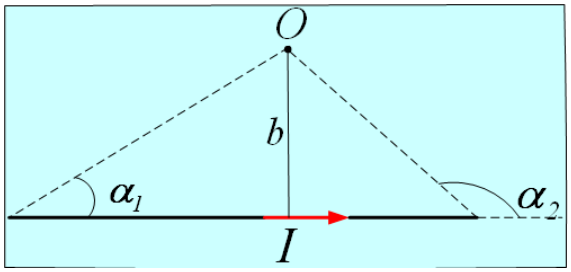


Рис. 23. Магнитная индукция поля прямого тока.

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{b} \cdot (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2),$$

где α_1 – угол между направлением тока в начале проводника и направлением на точкуO, в которой определяется B; α_2 – угол между направлением тока в конце проводника и направлением на точку O из конца проводника.

Определим значение магнитной индукции поля, созданного током, текущим по окружности в её центре:

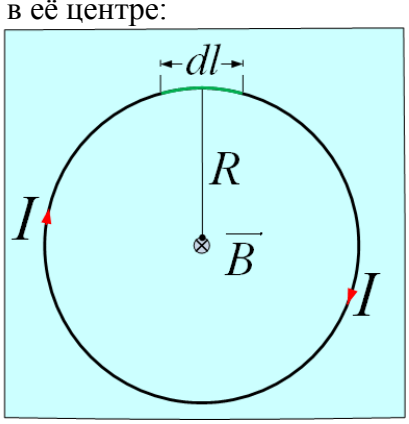


Рис. 24. Магнитная индукция в центре кругового тока.

Пусть постоянный электрический ток силой I протекает по плоскому круглому контуру радиуса R. Мысленно разобьем кольцо на малые участки, которые можно считать прямолинейными, и применим закон Био-Саварра-Лапласа для определения индукции поля, создаваемого этим элементом, в центре кольца. В данном случае вектор элемента тока IΔl и вектор R, соединяющий данный элемент с точкой наблюдения (центр кольца), перпендикулярны, поэтому sinα = 1. Вектор индукции поля, созданного выделенным участком кольца, направлен вдоль оси кольца, а его модуль равен

$$dB = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl}{R^2}.$$

Для любого другого элемента кольца ситуация абсолютно аналогична − вектор индукции также направлен по оси кольца. Поэтому суммирование этих векторов выполняется элементарно и сводится к суммированию длин участков кольца

$$B = \sum_i dB_i = \sum_i \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{(I \cdot dl)_i}{R^2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{R^2} \cdot \sum_i dl_i.$$

Сумма всех элементов проводника есть его длина, равная длине окружности:

$$B = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{R^2} \cdot \sum_i dl_i = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{R^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}.$$

Сила Лоренца.Сила Ампера. Взаимодействие проводников с током. Работа поля по перемещению проводника

Сила Лоренца - сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся в нем электрический заряд

$$F = q \cdot \upsilon \cdot B \cdot \sin\alpha,$$

где α - угол между векторами $\vec{\upsilon}$ и $\overline{B}$. Эта формула еще раз показывает, что магнитное поле не действует на покоящиеся электрические заряды.

Сила Лоренца всегда перпендикулярна вектору $\vec{\upsilon}$ движения заряженной частицы, поэтому она не изменяет модуля ее скорости. Это означает, что постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в нем заряженной частицей и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Одним из проявлений магнитного поля является его силовое воздействие на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Ампером было установлено, что на проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле действует сила, пропорциональная силе тока и индукции магнитного поля:

$$\vec{F} = \vec{B} \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha,$$

где α – угол между направлением тока и индукцией магнитного поля. Эта формула оказывается справедливой для прямолинейного проводника и однородного поля.

Для определения направления силы Ампера (Лоренца) применяется правило левой руки: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца совпадали с направлением тока в проводнике (скоростью движения положительного заряда), то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле.

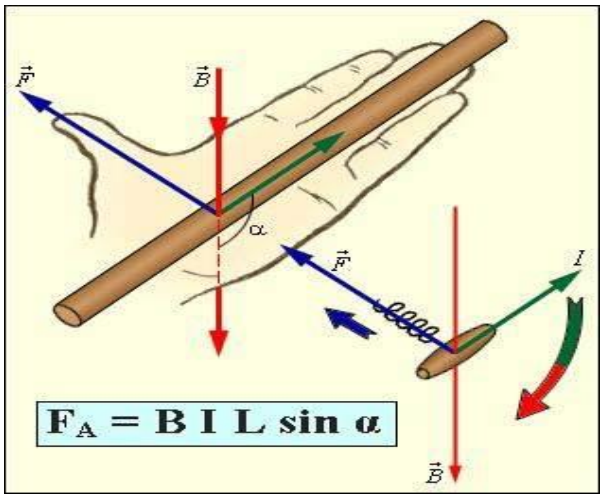


Рис. 25. Правило левой руки.

Рассмотрим взаимодействие параллельных проводников с током:

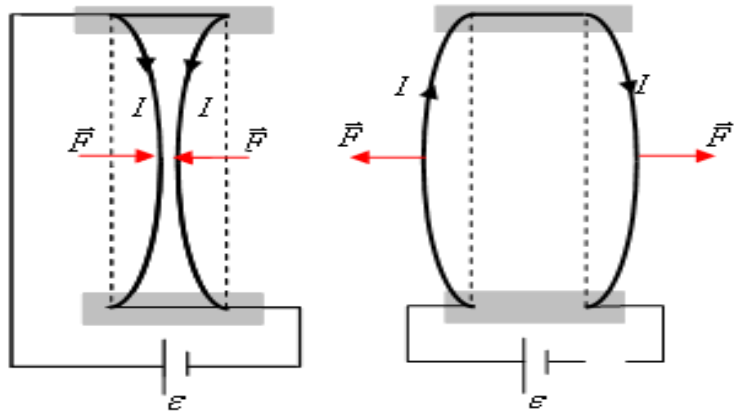


Рис. 26. Взаимодействие проводников с токами.

Если по проводникам текут токи в одинаковых направлениях, то проводники притягиваются, а в противоположных – отталкиваются.

Представим себе, что параллельные ветви цепи – это шины, по которому скользит проводник l.

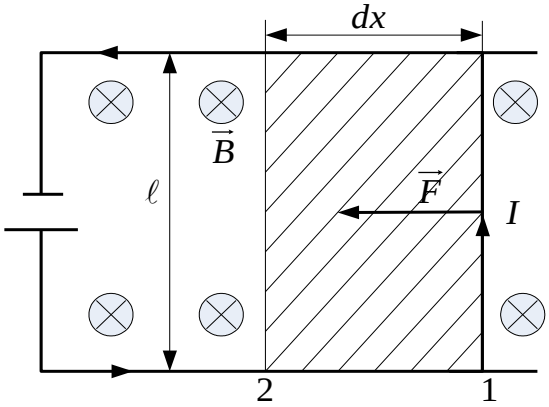


Рис. 27. Перемещение проводника в магнитном поле

По закону Ампера, сила $F = B \cdot I \cdot l$ направлена по правилу левой руки к центру цепи. Под действием этой силы проводник из положения 1 переместится в положение 2 (на расстояние dx). При этом элементарная работа численно равна произведению силы на перемещение:

$$dA = F \cdot dx = B \cdot I \cdot l \cdot dx = B \cdot I \cdot dS = I \cdot d\Phi$$

работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на магнитный поток сквозь поверхность, описываемую проводником при его движении.

Магнитные свойства вещества

Тело, находящееся в магнитном поле, намагничивается – создает собственное магнитное поле.

Для характеристики способности вещества изменять силу магнитного взаимодействия используют физическую величину μ, называемую относительной магнитной проницаемостью среды, показывающей во сколько раз сила взаимодействия токов в данной среде больше, чем в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

В зависимости от значения μ все вещества по магнитным свойствам разделяют на ферромагнетики ($\mu \rangle\rangle 1$), диамагнетики ($\mu \langle 1$) и парамагнетики ($\mu \approx 1$).

Таким образом, магнитная индукция зависит от свойств среды, в которой создается магнитное поле.

Основной единицей измерения напряженности магнитного поля в СИ является А/м.

Магнитные свойства различных тел обусловлены движением электронов в атоме.

К диамагнитным материалам относятся медь, серебро, углерод, висмут, фосфор, сера, углерод, вода, углеводы, белки и многие органические соединения организма и другие (табл. 1).

Таблица 1

Вещество	μ	Вещество	μ
Водород (газообразный)	0,999937	Серебро	0,999981
Вода	0,999991	Золото	0,999963
Стекло	0,999987	Медь	0,999912
Цинк	0,999991	Висмут	0,999824

У диамагнетиков движение электронов в атомах таково, что полный магнитный момент равен нулю.

При наложении внешнего магнитного поля на диамагнетики движение электронов в атоме изменяется таким образом, что создаваемое собственное магнитное поле, ослабляет внешнее магнитное поле. Поэтому диамагнитное тело выталкивается из магнитного поля.

Диамагнитный эффект не зависит от температуры, так как тепловое движение атомов не нарушает ориентации индуцированных токов внутри атомов.

К парамагнитным телам относятся воздух, вольфрам, платина, марганец, алюминий, щелочные и щелочноземельные металлы и элементы группы железа и другие (табл. 2).

Таблица 2

Вещество	μ	Вещество	μ
Азот (газообразный)	1,000013	Эбонит	1,000014
Воздух (газообразный)	1,000038	Алюминий	1,000023
Кислород (газообразный)	1,000017	Вольфрам	1,000253
Кислород (жидкий)	1,003400	Платина	1,000253

У парамагнетиков полной компенсации магнитных моментов электронов атомов не происходит – они больше нуля. Однако благодаря хаотичной ориентации в пространстве магнитных моментов в отсутствии внешнего поля намагниченность парамагнетиков отсутствует, то есть они не образуют собственного магнитного поля.

У парамагнетиков под действием внешнего поля происходит ориентирование собственных магнитных моментов атомов или молекул вдоль силовых линий внешнего поля так, что внешнее поле усиливается собственным полем парамагнитного тела. Парамагнитное тело втягивается в магнитное поле.

Тепловое движение атомов и молекул нарушает взаимную ориентацию магнитных моментов молекул, поэтому парамагнитный эффект зависит от температуры и μ парамагнетиков убывает с увеличением температуры.

При прекращении действия внешнего поля диа- и парамагнетики возвращаются под действием теплового движения в исходное состояние.

К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель, специальные сплавы. Свойства ферромагнетиков связаны с наличием в них областей спонтанной (самопроизвольной) намагниченности, называемых доменами. В размагниченном состоянии ферромагнетика магнитные моменты различных доменов ориентированы так, что результирующий вектор намагниченности образца равен нулю.

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле границы доменов смещаются так, что сначала растут домены, магнитные моменты которых составляют с вектором

$\vec{B}$ острый угол, т.е. домены, имеющие наиболее выгодное энергетическое состояние. На следующей стадии с ростом $\vec{B}$ происходит поворот магнитных моментов всех доменов в направлении поля.

Доменная структура ферромагнетиков является также причиной того, что величина относительной магнитной проницаемости μ_r гможет меняться в широких пределах (от 1 до 10^6) и сложным образом зависит от индукции внешнего магнитного поля.

При нагревании ферромагнетика выше температуры Кюри тепловое движение разрушает его доменную структуру и вместе с этим исчезают все особенности ферромагнитного состояния: вещество переходит в парамагнитное состояние.

Тема 4.3. Электромагнитное поле

Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции - возникновение в замкнутом контуре электрического тока при изменении магнитного потока, пронизывающего его.

Рис. 28. Опыт по получению индукционного тока в катушке

Индукционный ток - ток, возникающий при электромагнитной индукции.

Закон Фарадея: ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром

$$\varepsilon_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Подставив определение магнитного потока, получим:

$$\varepsilon_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\int_S \frac{d(B \cdot dS)}{dt} = -\int_S \frac{dB}{dt} \cdot dS$$

Используя закон Ома для участка цепи, получим

$$I = \frac{\varepsilon_{инд}}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

что индукционный ток зависит от сопротивления контура.

Профессор Петербургского университета Э.Х. Ленц исследовал связь между направлением индукционного тока и характером вызвавшего его изменения магнитного потока. В 1833 г. он установил закон, названный правилом Ленца.

Правило Ленца: индукционный ток всегда направлен так, что его действие противоположно действию причины, вызывающей ток.

Индукция проводника. Соленоид. Энергия магнитного поля

Электрический ток, протекающий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция B которого по закону Био-Савара-Лапласа пропорциональна силе тока (B~I).

Следовательно, сцепленный с контуром магнитный поток Ф, также пропорционален силе тока:

$$\Phi = L \cdot I \,.$$

Коэффициент пропорциональности называют индуктивностью контура.

Индуктивность – одна из основных характеристик цепи переменного тока.

При изменении силы тока в контуре будет изменяться и сцепленный с ним магнитный поток; следовательно, в контуре будет индуцироваться ЭДС, обусловленная изменением его собственного магнитного поля. Такая ЭДС называется электродвижущей силой самоиндукции.

Получим:

$$\varepsilon_c = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Знак «минус», обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нем. Если ток в контуре возрастает, то $\frac{dI}{dt} > 0$ и $\varepsilon_s < 0$, т.е. ток самоиндукции направлен навстречу току внешнего источника и тормозит его возрастание. Если ток в контуре уменьшается, то $\frac{dI}{dt} < 0$ и $\varepsilon_s > 0$, т.е. возникающий ток самоиндукции замедляет убывание тока внешнего источника. Таким образом, контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую инертность, заключающуюся в том, что любое изменение тока тормозится тем сильнее, чем больше индуктивность цепи.

Катушка (соленоид) – замкнутый контур, содержащий несколько витков. Индуктивность соленоида зависит от формы и размеров, а также от магнитных свойств среды. Индуктивность соленоида равна

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot V = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l} \,.$$

где $n = \frac{N}{l}$ – количество витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

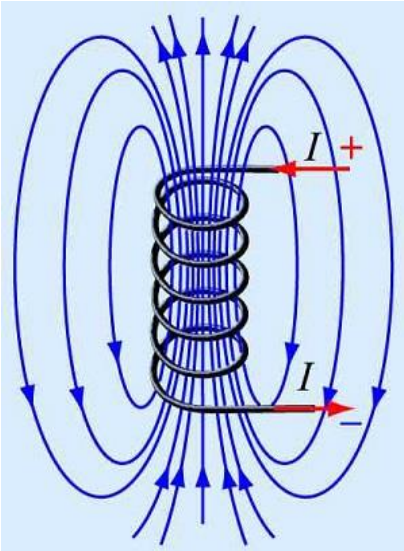


Рис. 29. Магнитное поле соленоида.

Если в контуре с индуктивностью L течет ток I, то в момент размыкания цепи возникает индукционный ток и им совершается работа. Эта работа совершается за счет энергии

исчезнувшего при размыкании цепи магнитного поля. На основании закона сохранения и превращения энергии энергия магнитного поля превращается главным образом в энергию электрического поля, за счет которой происходит нагревание проводников. Работа может быть определена из соотношения

$$dA = \varepsilon_{ин} \cdot I \cdot dt.$$

Так как $\varepsilon_c = -L \cdot \frac{dI}{dt}$,

То $dA = -L \cdot \frac{dI}{dt} \cdot I \cdot dt = -L \cdot I \cdot dI$.

Уменьшение энергии магнитного поля равно работе тока, поэтому

$$W_ь = \int_I^0 dA = -L \cdot \int_I^0 I \cdot dI = -L \cdot \frac{I^2}{2}\Big|_I^0 = -L \cdot \left(0 - \frac{I^2}{2}\right) = \frac{L \cdot I^2}{2}.$$

Данная формула справедлива для любого контура и показывает, что энергия магнитного поля зависит от индуктивности контура и силы тока, протекающего по нему.

Рассчитаем энергию однородного магнитного поля длинного соленоида, индуктивность которого определяется по формуле $L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S$.

Энергия однородного магнитного поля длинного соленоида в вакууме равна

$$W_м = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot S \cdot I^2}{2 \cdot l}.$$

Так как индукция поля внутри бесконечно длинного соленоида $B = N \cdot \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I}{l}$,

то $B^2 = N^2 \cdot \frac{\mu^2 \cdot \mu^2{}_0 \cdot I^2}{l^2}$ следовательно $N^2 \cdot I^2 = \frac{B^2 \cdot l^2}{\mu^2 \cdot \mu_0^2}$

$$W_м = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot S \cdot B^2 \cdot l^2}{2 \cdot l^2 \cdot \mu^2 \cdot \mu_0{}^2} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot S \cdot l$$ или

$$W_м = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot V.$$

Плотность энергии - физическая величина, численно равная энергии, заключенной в единичном объеме: $\omega = \frac{W}{V}$.

Тогда плотность энергии магнитного поля в веществе равна

$$\omega_{маг} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0}.$$

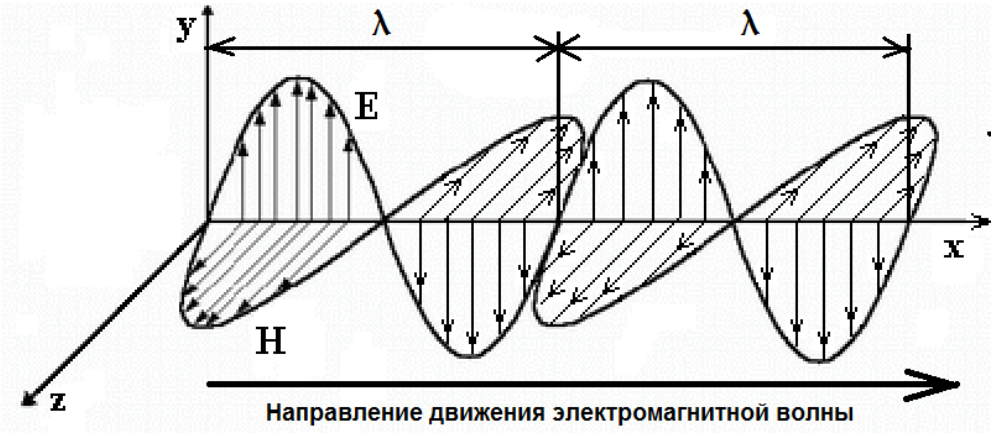
Электромагнитная волна

Электромагнитное поле представляет собой особый вид материи. Как вид материи оно обладает массой, энергией, количеством движения, может превращаться в вещество и наоборот.

Электромагнитное поле имеет две составляющие – электрическую и магнитную – и в каждой точке пространства определяется двумя векторными величинами:

а) вектором напряженности электрического поля $\overline{E}$ [В/м],

б) вектором напряженности магнитного поля $\overline{H}$ [А/м].



Следует помнить, что в природе существует единое электромагнитное поле, а отдельные его стороны – электрическое поле или магнитное поле – могут проявляться независимо друг от друга только в частных случаях при определенных условиях.

Математические уравнения, описывающие физические процессы в переменном электромагнитном поле, называются уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} rot\overline{H} = \overline{\delta} + \varepsilon\varepsilon_0 \dfrac{\partial \overline{E}}{\partial t} \\ rot\overline{E} = \mu\mu_0 \dfrac{\partial \overline{H}}{\partial t} \\ div\overline{B} = 0 \\ div\overline{D} = 0 \end{cases}$$

где

$$\overline{B} = \mu\mu_0 \overline{H}, \quad \overline{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \overline{E}.$$

Из приведенных уравнений следует, что каждая из сторон электромагнитного поля одновременно является и причиной, и следствием другой стороны, что говорит о единстве этих сторон.

Электромагнитное поле, как носитель энергии, является той средой, посредством которой осуществляется передача энергии от источников энергии (электростанций) к приемникам энергии (промышленным предприятиям, жилым домам и т.д.), при этом в передаче энергии участвуют в равной мере обе его стороны.

Шкала электромагнитных волн

Все электромагнитные поля создаются зарядами и токами. Электрические заряды могут совершать колебания любой частоты, поэтому частотный спектр электромагнитных волн неограничен. Принято шкалу электромагнитных волн представлять в виде трех диапазонов (см. рис. 30).

1. **Радиодиапазон** (10^5м – 10^{-4}м) излучается переменными токами, в исключительных случаях создается электронами атомов и молекул.

Как видно из рисунка, области с различными названиями частично перекрываются. Это перекрытие объясняется тем, что каждая область шкалы электромагнитных волн связана с определенным типом излучателей.

Резких границ между областями нет: один диапазон плавно переходит в другой и вся разница между радио-, микро-, видимым, рентгеновским и - излучениями только в длинах волн.

2. **Оптический диапазон** (10^{-4}м – 10^{-8}м) излучается микроскопическими генераторами, такими, как атомы и молекулы.

3. **Рентгеновский диапазон и диапазон - излучения** (10^{-8}м – 10^{-12}м) излучается атомами, при торможении электронов веществом, - лучи испускаются ядрами атомов при ядерных превращениях и ядерных реакциях.

Волны разной длины различаются своими свойствами: способами генерации и приема, особенностями распространения.

У всех длин волн единая электромагнитная природа и одинаковая скорость распространения в вакууме.

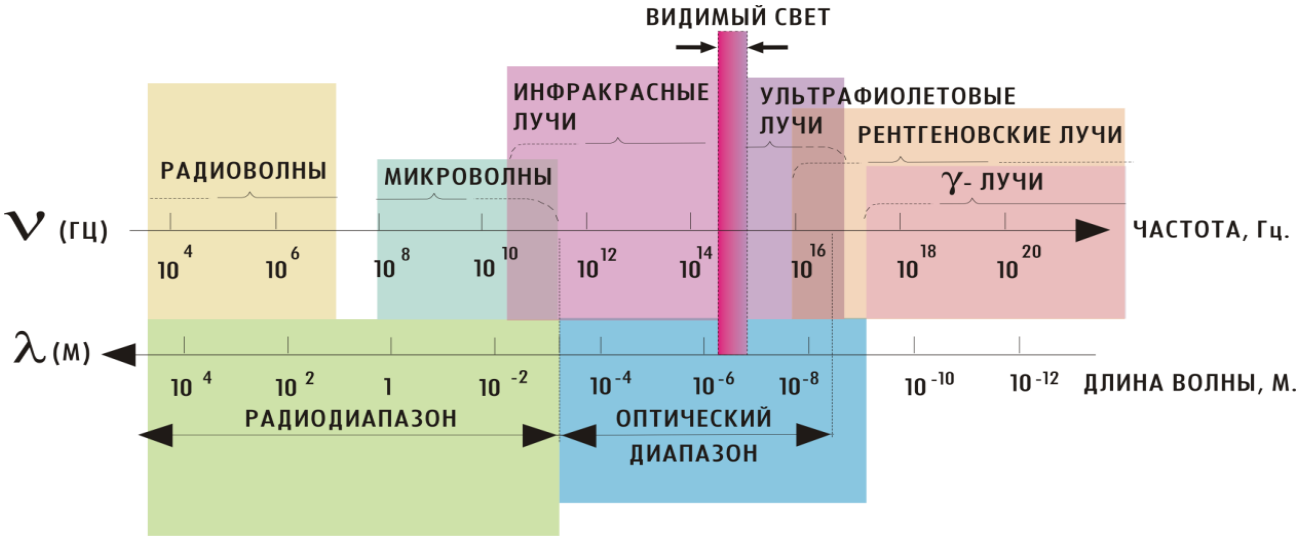


Рис. 30. Шкала электромагнитных волн

Главное условие возникновения электромагнитной волны — ускоренное движение электрических зарядов.

Радиосвязь - это разновидность беспроводной связи, у которой в качестве сигнала используются, распространяемые в пространстве, радиоволны.

Принципы радиосвязи далеко не новы. За это время радиосредства прошли путь от первых передатчиков сигналов азбуки Морзе до систем спутниковой связи. Радиоэфир наполнился музыкой радиостанций, сигналами далеких галактик и нашими разговорами. Однако с тех пор не изменилось главное - радиоволны.

Г. Герц в 1888 г. экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

А. С. Попов повторил эти опыты и в апреле 1895 г. создал первый приемник.

7 мая 1895 г. демонстрация прибора на заседании Русского физико-химического общества. Дальность — 250 м; 1899 г.— 20 км; 1901 г. — 150 км.

Попов впервые использовал когерер и приемную антенну.

Принцип радиотелефонной связи.

Принцип радиосвязи основан на передачи сигнала от **передающего устройства**, содержащего передатчик и передающую антенну, путем перемещения радиоволн в открытом пространстве, **приемному устройству**, содержащему приемную антенну и радиоприемник.

Микрофон передатчика под воздействием звуковых колебаний вырабатывает слабый электрический ток низкой частоты. Этот сигнал поступает в усилитель низкой частоты (УНЧ). С УНЧ сигнал поступает в модулятор. Генератор высокой частоты (ГВЧ) вырабатывает незатухающие колебания высокой частоты (ВЧ), которые также поступают в модулятор, где они модулируются по амплитуде колебаниями низкой частоты и поступают в антенну. Антенна излучает в окружающее пространство электромагнитные волны, амплитуда которых также модулирована по низкой частоте. Частота ГВЧ является несущей, она и определяет частоту (и волну) передающей станции. Гармонические колебания с несущей частотой, принадлежащей какому-либо диапазону радиочастот, подвергаются модуляции в соответствии с

передаваемым сообщением. Модулированные радиочастотные колебания представляют собой **радиосигнал,** а модулированные электромагнитные волны представляют собой **радиоволну**.

Свободно перемещаясь, радиоволны достигают приёмной антенны и возбуждают в ней электрические колебания, которые поступают далее в радиоприёмник. В антенне приёмника радиоволны (реально ведь передатчиков много) возбуждают переменные ЭДС индукции разных частот. Для выделения частоты нужной радиостанции применяется входной колебательный контур, который может иметь конденсатор переменной ёмкости или катушку с изменяемой индуктивностью. В любом случае изменение ёмкости или индуктивности приводит к изменению собственной частоты входного контура и, в тот момент, когда эта частота совпадает с несущей частотой радиостанции, наблюдается резонанс. Этот эффект позволяет выделить сигнал какой-то определённой радиостанции среди других. Тем не менее, сигнал остаётся осень слабым и его усиливает усилитель высокой частоты (УВЧ) приёмника. Принятый радиосигнал после усиления демодулируется. Детектор выделяет одну половинку амплитудно-модулированного сигнала, фильтр сглаживает пульсации, превращая его в низкочастотный сигнал. УНЧ усиливает НЧ-сигнал, а громкоговоритель преобразует усиленный электрический сигнал в звуковые колебания. Выделяется сигнал, аналогичный сигналу, которым были модулированы колебания в радиопередатчике. Сигнал преобразуется при помощи соответствующего воспроизводящего устройства в сообщение, аналогичное исходному.

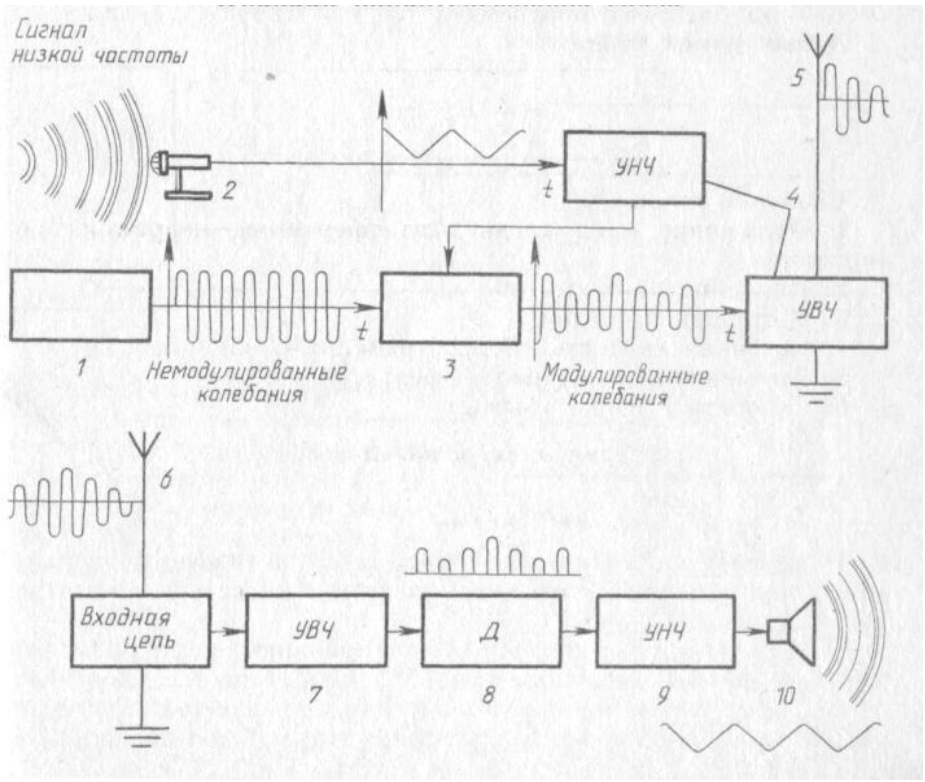


Рис. 31. Структурная схема радиопередатчика и радиоприемника.

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

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

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

4. Усилители высокой и низкой частоты *УВЧ* и *УНЧ* 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.

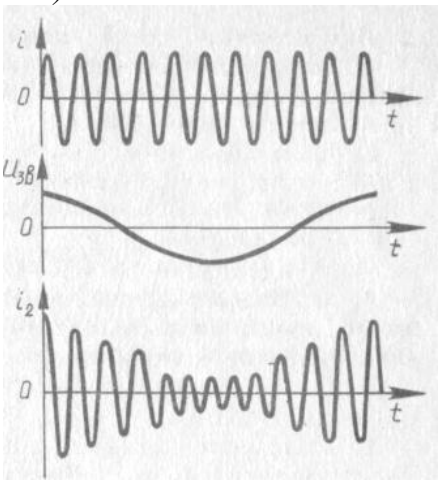
8. *Детектор* выделяет из модулированных высокочастотных колебаний низкочастотные колебания.

9. УНЧ.

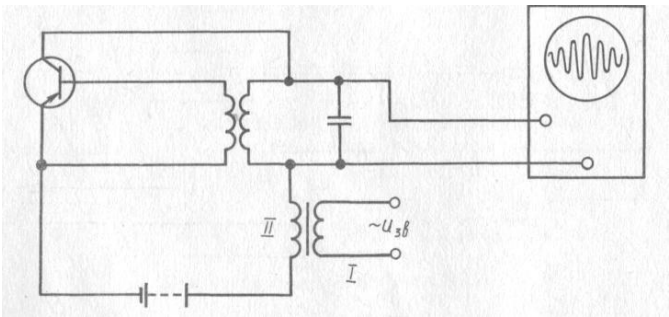
10. *Динамик* преобразует электромагнитные колебания в механические звуковые колебания.

Амплитудная модуляция

Изменение амплитуды колебаний высокой (несущей) частоты колебаниями низкой (звуковой) частоты называется **амплитудной модуляцией**.



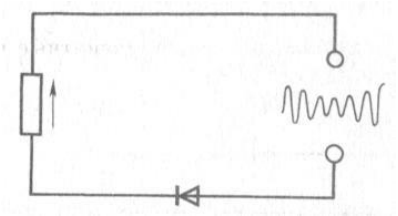
Для получения амплитудно-модулированных электромагнитных колебаний в цепь транзисторного генератора последовательно с колебательным контуром включают катушку трансформатора. На первичную обмотку трансформатора подается напряжение звуковой частоты. На вторичной обмотке трансформатора индуцируется ЭДС той же частоты и складывается с постоянным напряжением источника тока. Изменение напряжения между эмиттером и коллектором транзистора приводит к изменению звуковой частотой, амплитуды колебаний тока высокой частоты в колебательном контуре генератора. В результате амплитуда колебаний в контуре генератора будет изменяться в такт с изменением напряжения низкочастотного сигнала на транзисторе. При изменении амплитуды сигнала НЧ меняется глубина модуляций.



Детектирование (демодуляция)

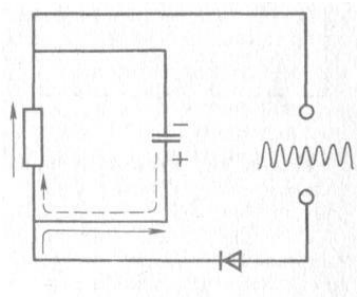
Выделение колебаний низкой звуковой частоты из промодулированных колебаний высокой частоты называют **детектированием (демодуляцией).**

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью: вакуумный или полупроводниковый диод — детектор.



Вольтамперная характеристика диода показывает, что ток в цепи течет преимущественно в одном направлении, являясь пульсирующим током.

Этот ток сглаживается с помощью фильтра.



Когда диод пропускает ток, то часть его проходит через нагрузку, а другая часть ответвляется на конденсатор.

Если диод заперт, то конденсатор частично разряжается через нагрузку. Уменьшается пульсация тока.

Через нагрузку течет ток звуковой частоты, форма колебаний воспроизводит форму низкочастотного сигнала.

Радиотелефонная связь. Там, где используют рации – различные приёмопередающие устройства (полиция, скорая помощь, МЧС и т.п.), связь также осуществляется с помощью радиоволн.

Приём телевизионных сигналов с помощью антенн, которые устанавливаются на крышах домов, постепенно уходит в прошлое. Тем не менее, те же самые радиоволны переносят изображение

Спутниковые телевидение, телефонная связь, Интернет – всё это существует, благодаря радиоволнам, которые излучаются передатчиком, ретранслируются спутником и достигают приёмника.

Беспроводные мышь, клавиатура и гарнитура также содержат миниатюрные приёмопередатчики, работающие в радиоволновом диапазоне.

Biuetooch, Wi-Fi, беспроводные компьютерные сети – это также передатчики и приёмники радиоволн.

Различные радиоуправляемые модели обязательно имеют блок управления (передатчик) и приёмник в самой модели.

GPS, ГЛОНАСС – глобальные системы позиционирования, с помощью которых можно определить не только своё место положения, но и многое другое – работают также в радиоволновом диапазоне.

Радиолокация. А.С. Попов ещё в 1900 году обнаружил отражение электромагнитных волн от кораблей и указал на возможность использования этого эффекта в радиолокации. Позднее было обнаружено, что практически все вещества отражают радиоволны. Результат отражения зависит не только от рода вещества, но и от длины волны. Суть радиолокации заключается в следующем. Передатчик вырабатывает высокочастотный импульс и с помощью специальной параболической антенны посылает его в направлении объекта, например, самолёта. Радиоволна, достигая объекта, отражается от него во все стороны. Часть отражённой волны, энергия которой очень мала, улавливает приёмная параболическая антенна. Зная время t между моментом излучения и моментом приёма сигнала, легко рассчитать R расстояние до объекта: $R=ct/2$, где с – скорость распространения радиоволны.

Тема 4.4. Оптика

Оптика – это раздел физики, который изучает природу света, световые явления и взаимодействие света с веществом.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитныеволны, и поэтому оптика является *частью общего учения об электромагнитном поле*.

В зависимости от круга рассматриваемых явлений оптику делят на *геометрическую* (лучевую), *волновую* (физическую) и *квантовую* (корпускулярную).

Свет – это электромагнитные волны, длины волн которых лежат для среднего глаза человека в пределах от 400 до 760 нм. В этих пределах свет называется **видимым**. Свет с наибольшей длиной волны кажется нам красным, а с наименьшей – фиолетовым. Запомнить чередование цветов спектра легко с помощью поговорки «**К**аждый **О**хотник **Ж**елает **З**нать, **Г**де **С**идит **Ф**азан». Первые буквы слов поговорки соответствуют первым буквам основных цветов спектра в порядке убывания длины волны (и соответственно возрастания частоты): «**К**расный – **О**ранжевый – **Ж**елтый – **З**еленый – **Г**олубой – **С**иний – **Ф**иолетовый». Свет с большими, чем у красного, длинами волн, называется **инфракрасным**. Его наш глаз не замечает, но наша кожа фиксирует такие волны в виде теплового излучения. Свет с меньшими, чем у фиолетового, длинами волн, называется **ультрафиолетовым**.

Электромагнитные волны (и, в частности, **световые волны**, или просто **свет**) – это распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны поперечны – векторы электрической напряженности и магнитной индукции перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Световые волны, как и любые другие электромагнитные волны, распространяются в веществе с конечной скоростью, которая может быть рассчитана по формуле:

$$\upsilon = 1/\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$$

где: ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные: $\varepsilon_0 = 8{,}85419\cdot10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1{,}25664\cdot10^{-6}$ Гн/м. **Скорость света в вакууме** (где $\varepsilon = \mu = 1$) постоянна и равна $c = 3\cdot10^8$ м/с, она также может быть вычислена по формуле:

$$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$$

Скорость света в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных. Если свет распространяется в какой-либо среде, то скорость его распространения также выражается следующим соотношением:

$$\upsilon = \frac{c}{n}$$

где: n – показатель преломления вещества – физическая величина, показывающая во сколько раз скорость света в среде меньше чем в вакууме. Показатель преломления, как видно из предыдущих формул, может быть рассчитан следующим образом:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}$$

• **Свет переносит энергию.** При распространении световых волн возникает поток электромагнитной энергии.

• Световые волны испускаются в виде отдельных квантов электромагнитного излучения (фотонов) атомами или молекулами.

Кроме света существуют и другие виды электромагнитных волн. Далее они перечислены по уменьшению длины волны (и соответственно, по возрастанию частоты):

• Радиоволны;
• Инфракрасное излучение;
• Видимый свет;
• Ультрафиолетовое излучение;
• Рентгеновское излучение;
• Гамма-излучение.

Законы геометрической оптики

Геометрическая оптика – это раздел физики, в котором не учитываются волновые свойства света. Основные законы геометрической оптики были известны задолго до установления физической природы света.

Оптически однородная среда - это среда, во всем объеме которой показатель преломления остаётся неизменным.

Закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Этот закон приводит к представлению о световом луче как о геометрической линии, вдоль которой распространяется свет. Следует отметить, что закон прямолинейного распространения света нарушается и понятие светового луча утрачивает смысл, если свет проходит через малые отверстия, размеры которых сравнимы с длиной волны (в этом случае наблюдается дифракция).

На границе раздела двух прозрачных сред свет может частично отразиться так, что часть световой энергии будет распространяться после отражения по новому направлению, а частично пройти через границу и распространяться во второй среде.

Закон отражения света: падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (плоскость падения). Угол отражения γ равен углу падения α. Заметьте, что все углы в оптике измеряются от перпендикуляра к границе раздела двух сред.

Закон преломления света (закон Снеллиуса): падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина, постоянная для двух данных сред, и определяется выражением:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

Закон преломления был экспериментально установлен голландским ученым В.Снеллиусом в 1621 году. Постоянную величину n_{21} называют **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума называют **абсолютным показателем преломления**.

Среду с большим значением абсолютного показателя называют оптически более плотной, а с меньшим – менее плотной. При переходе из менее плотной среды в более плотную луч «прижимается» к перпендикуляру, а при переходе из более плотной в менее плотную – «удаляется» от перпендикуляра. Единственный случай, когда луч не преломляется, это если угол падения равен 0 (то есть лучи перпендикулярны границе раздела сред).

При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную $n_2 < n_1$ (например, из стекла в воздух) можно наблюдать **явление полного внутреннего отражения**, то есть исчезновение преломленного луча. Это явление наблюдается при углах падения, превышающих некоторый критический угол $\alpha_{пр}$, который называется **предельным углом полного внутреннего отражения**. Для угла падения $\alpha = \alpha_{пр}$, $\sin\beta = 1$, так как $\beta = 90°$, это значит, что преломленный луч идет вдоль самой границы раздела, при этом, согласно закону Снеллиуса, выполняется следующее условие:

$$\sin\alpha_{пр} = \frac{n_2}{n_1}$$

Как только угол падения становиться больше предельного, то преломленный луч уже не просто идет вдоль границы, а он и вовсе не появляется, так как его синус теперь уж должен быть больше единицы, а такого не может быть.

Линзы

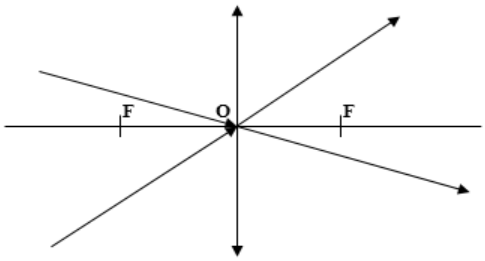
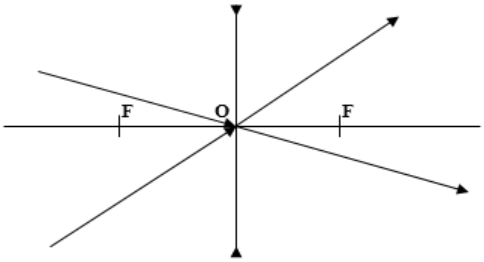
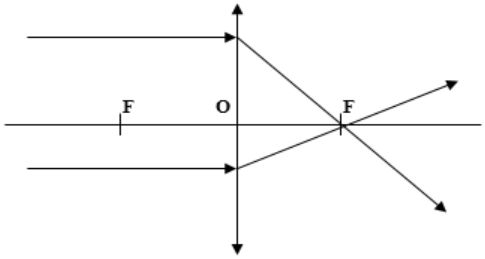
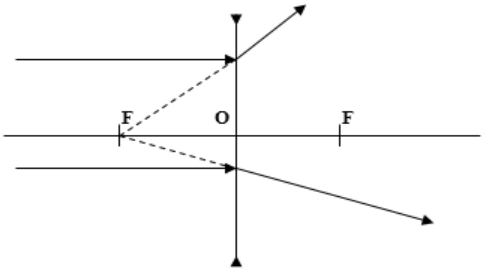
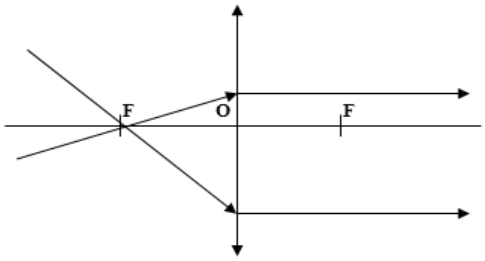
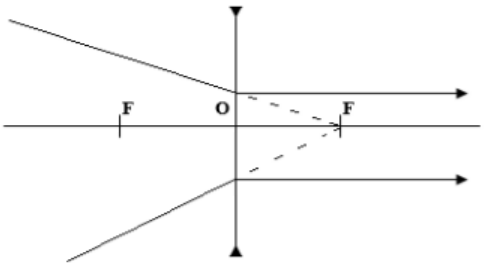
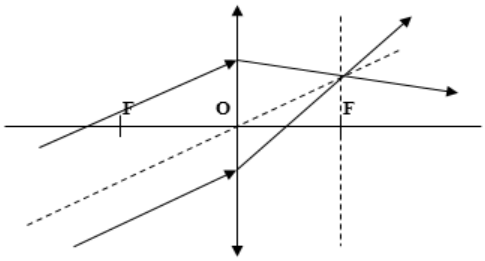
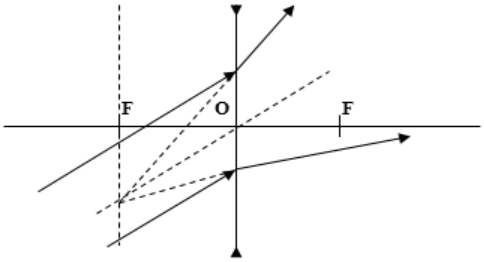
Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Если толщина самой линзы мала по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей, то линзу называют **тонкой**.

Линзы бывают **собирающими** и **рассеивающими**. Если показатель преломления линзы больше, чем окружающей среды, то собирающая линза в середине толще, чем у краев, рассеивающая линза, наоборот, в средней части тоньше. Если показатель преломления линзы меньше, чем окружающей среды, то всё наоборот.

Прямая, проходящая через центры кривизны сферических поверхностей, называется **главной оптической осью линзы**. В случае тонких линз можно приближенно считать, что главная оптическая ось пересекается с линзой в одной точке, которую принято называть **оптическим центром линзы**. Луч света проходит через оптический центр линзы, не отклоняясь от первоначального направления. Все прямые, проходящие через оптический центр, называются **побочными оптическими осями**.

Если на линзу направить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после прохождения через линзу лучи (или их продолжения) соберутся в одной точке F, которая называется **главным фокусом линзы**. У тонкой линзы имеются два главных фокуса, симметрично расположенных относительно линзы на главной оптической оси. У собирающих линз фокусы действительные, у рассеивающих – мнимые. Расстояние между оптическим центром линзы O и главным фокусом F называется **фокусным расстоянием**. Оно обозначается той же буквой F.

Правила построения хода луча в линзах

Собирающие линзы	Рассеивающие линзы
1. Луч света, проходящий через оптический центр, не преломляется.	
	
2. Луч света, падающий на линзу параллельно главной оптической оси, после преломления ...	
... проходит через фокус линзы.	... продолжением проходит через мнимый фокус линзы.
	
3. Луч света, проходящий через фокус, после преломления будет параллелен главной оптической оси.	3. Луч, проходящий продолжением через фокус, после преломления будет параллелен главной оптической оси.
	
4. Для построения хода произвольного луча нужно провести параллельную ему побочную оптическую ось до пересечения ...	
... с фокальной плоскостью. Преломленный луч провести через полученную точку.	... с мнимой фокальной плоскостью. Преломленный луч продолжением провести через полученную точку.
	

Формула линзы

Основное свойство линз – способность давать изображения предметов. **Изображение** – это точка пространства, где пересекаются лучи (или их продолжения), испущенные источником после преломления в линзе. Изображения быва-

ют **прямыми** и **перевернутыми**, **действительными** (пересекаются сами лучи) и **мнимыми** (пересекаются продолжения лучей), **увеличенными** и **уменьшенными**.

Положение изображения и его характер можно определить с помощью геометрических построений. Для этого используют свойства некоторых стандартных лучей, ход которых известен. Это лучи, проходящие через оптический центр или один из фокусов линзы, а также лучи, параллельные главной или одной из побочных оптических осей.

Для простоты можно запомнить, что изображение точки будет точкой. Изображение точки, лежащей на главной оптической оси, лежит на главной оптической оси. Изображение отрезка – отрезок. Если отрезок перпендикулярен главной оптической оси, то его изображение перпендикулярно главной оптической оси. А вот если отрезок наклонен к главной оптической оси под некоторым углом, то его изображение будет наклонено уже под некоторым другим углом.

Изображения можно также рассчитать с помощью **формулы тонкой линзы**. Если кратчайшее расстояние от предмета до линзы обозначить через d, а кратчайшее расстояние от линзы до изображения через f, то формулу тонкой линзы можно записать в виде:

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

Величину D, обратную фокусному расстоянию. называют **оптической силой линзы**. Единица измерения оптической силы является 1 диоптрия (дптр). Диоптрия – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Фокусным расстояниям линз принято приписывать определенные знаки: для собирающей линзы $F > 0$, для рассеивающей $F < 0$. Оптическая сила рассеивающей линзы также отрицательна.

Величины d и f также подчиняются определенному правилу знаков: $f > 0$ – для действительных изображений; $f < 0$ – для мнимых изображений. Перед d знак «–» ставится только в том случае, когда на линзу падает сходящийся пучок лучей. Тогда их мысленно продлевают до пересечения за линзой, помещают туда воображаемый источник света, и определяют для него расстояние d.

В зависимости от положения предмета по отношению к линзе изменяются линейные размеры изображения. **Линейным увеличением** линзы Γ называют отношение линейных размеров изображения и предмета. Для линейного увеличения линзы существует формула:

$$\Gamma=\frac{h_{изображения}}{h_{предмета}}=\frac{f}{d}$$

Во многих оптических приборах свет последовательно проходит через две или несколько линз. Изображение предмета, даваемое первой линзой, служит предметом (действительным или мнимым) для второй линзы, которая строит второе изображение предмета и так далее.

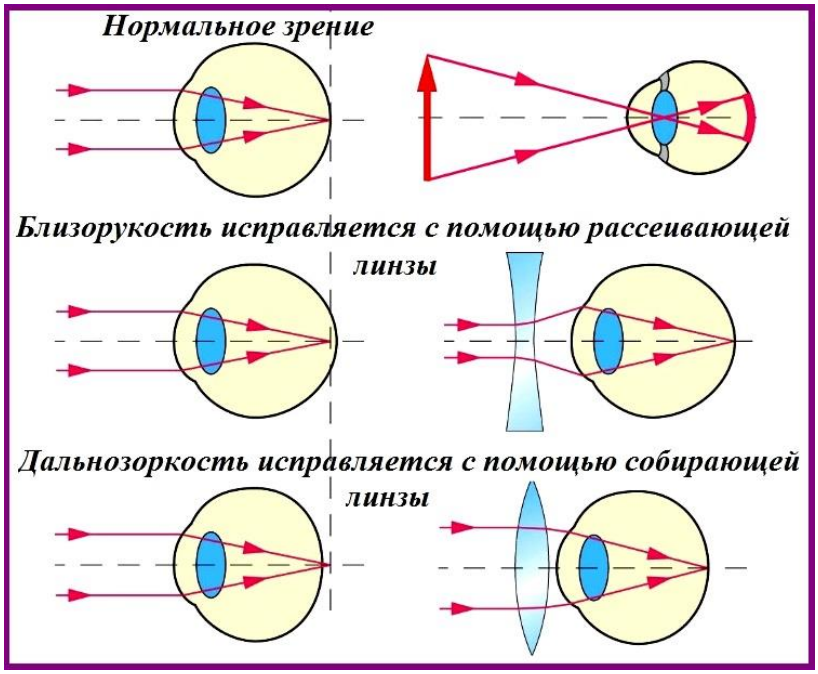
Глаз как оптическая система

Роль линзы в оптической системе глаза играет **хрусталик** — прозрачное тело, которое может быть более или менее выпуклым, т.е. его фокусное расстояние может изменяться. За хрусталиком расположено **стекловидное тело**, заполняющее остальную часть глаза. Хрусталик и стекловидное тело играют ***роль линзы***, преломляющей падающие лучи. На задней стенке глаза находится **сетчатка**, на которой после преломления получается действительное уменьшенное, перевёрнутое изображение. Нервные волокна сетчатки передают ощущение света в мозг.

Существуют 2 основных ***дефекта зрения***: дальнозоркость и близорукость. **Близорукий** человек хорошо видит близкие предметы и плохо — удалённые. У него изображение предмета формируется за сетчаткой. Для коррекции зрения в этом случае необ-

ходимы очки с рассеивающими линзами, делающие входящий в глаз световой пучок расходящимся. В этом случае глаз соберёт лучи на сетчатке.

Дальнозоркий человек хорошо видит удалённые предметы и плохо — близкие. У него изображение предмета формируется за сетчаткой. Для коррекции зрения в этом случае необходимы очки с собирающими линзами. На хрусталик в этом случае падает сходящийся световой пучок, который он преломляет так, что лучи собираются на сетчатке.



Физика цвета.

Цвет мы видим только благодаря тому, что наши глаза способны регистрировать электромагнитное излучение в оптическом его диапазоне. А электромагнитное излучение это и радиоволны и гамма излучение и рентгеновское излучение, терагерцевое, ультрафиолетовое, инфракрасное.

Цвет — качественная субъективная характеристика электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании возникающего физиологического зрительного ощущения и зависящая от ряда физических, физиологических и психологических факторов.

Восприятие цвета определяется индивидуальностью человека, а также спектральным составом, цветовым и яркостным контрастом с окружающими источниками света, а также несветящимися объектами. Очень важны такие явления, как метамерия, индивидуальные наследственные особенности человеческого глаза (степень экспрессии полиморфных зрительных пигментов) и психики.

Говоря простым языком цвет — это ощущение, которое получает человек при попадании ему в глаз световых лучей.

Одни и те же световые воздействия могут вызвать разные ощущения у разных людей. И для каждого из них цвет будет разным.

Отсюда следует что споры "какой цвет на самом деле" бессмысленны, поскольку для каждого наблюдателя истинный цвет — тот, который видит он сам.

Человеческий глаз – это орган, дающий нам возможность видеть окружающий мир. Зрение дает нам информации об окружающей действительности больше, чем другие органы чувств: самый большой поток информации в единицу времени мы получаем именно глазами.

Задачи

Пример №11 Определите сопротивление проводника, если при напряжении 110 В сила тока в нем 2 А.

Дано:	*Решение:*
$U = 110$ В $I = 2\ A$	$I = \frac{U}{R}$; $R = \frac{U}{I}$
$R - ?$	$R = \frac{110\ \text{В}}{2\ \text{А}} = 55$ Ом *Ответ:* 55 Ом

Пример №12Определить оптическую силу стеклянной линзы, находящейся в воздухе, если линза: 1) двояковыпуклая с радиусом кривизны поверхностей R_1 = 50 см; R_2 = 30 см; 2) выпукло-вогнутая с радиусом кривизны поверхностей R_1 = 25 см; R_2 = 40 см.

а)

Дано:	Решение:
$n_л$= 1,6 $n_{ср}$= 1 R_1 = 25 см R_2 = 40 см.	Во всех случаях будем использовать формулу линзы в виде: $D = \left(\frac{n_л}{n_{ср}} - 1\right)\left(\pm\frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2}\right)$. Значения радиусов кривизны обеих поверхностей линзы берем со знаком «+», т. к. обе поверхности - выпуклые.
D - ?	$D = \left(\frac{1,6}{1} - 1\right)\left(\frac{1}{0,5\ м} + \frac{1}{0,3\ м}\right) = 0,6$ дптр. Линза собирающая (D > 0).

б)

Дано:	Решение:
$n_л$= 1,6 $n_{ср}$= 1 R_1 = 0,25 м R_2 = - 0,4 м.	$D = \left(\frac{1,6}{1} - 1\right)\left(\frac{1}{0,25\ м} - \frac{1}{0,4\ м}\right) = 0,9$ дптр. Линза собирающая (D > 0).
D - ?	

Вопросы для самопроверки

1. Что называется электрическим током и каковы условия возникновения тока проводимости?
2. Что называют плотностью тока? силой тока?
3. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
4. Сформулируйте закон Ома для полного участка цепи.
5. Что называют удельным сопротивлением? удельной проводимостью проводника?
6. Как зависит сопротивление проводника от его длины, площади поперечного сечения и материала?
7. Сформулируйте определение магнитного потока
8. Сформулируйте правило Ленца
9. Сформулируйте определение ЭДС индукции
10. Сформулируйте определение вихревого электрического поля
11. Сформулируйте определение самоиндукции
12. Сформулируйте определение индуктивности
13. Перечислите свойства электромагнитного поля

РАЗДЕЛ 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Тема 5.1. Кванты и атомы

Квантовая физика — раздел физики, изучающий квантовую оптику и квантовую теорию излучения, атомную и ядерную физику, а также дающий представление о современной физической картине мира.

В соответствии с современными представлениями *свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу*: в одних явлениях свет обнаруживает свойства волн, а в других — свойства частиц. Волновые и квантовые свойства неотъемлемо дополняют друг друга. Волновые световые явления: интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия — изучены волновой оптикой. При этом частицу (корпускулу) электромагнитного излучения называют *фотоном* или *квантом.* Квантовые световые явления: фотоэффект, эффект Комптона, давление света, линейчатость спектров испускания и поглощения атомов и молекул — изучаются квантовой оптикой. Мы привыкли, что волны на воде и бильярдные шары (частицы) совершенно не похожи друг на друга и проявляют себя абсолютно по-разному. Однако свет не обязан быть похожим на привычные нам объекты макромира и способен одновременно проявлять и волновые, и корпускулярные свойства.

Не всегда волну можно рассматривать как поток фотонов. Достаточно в опыте Юнга уменьшить интенсивность источника света (например, до уровня излучения одного фотона в час), а для регистрации интерференционной картины использовать фотопластинку. В таком опыте каждый фотон на фотопластинке регистрируется точкой и как частица локализован в пространстве. Однако, по мере накопления информации о разных фотонах распределение точек не соответствует классическим представлениям о поведении частиц: на фотопластинке появляется характерная для волн интерференционная картина.

Фотон является элементарной частицей, движущейся в любой системе отсчета со скоростью света c и обладающей определенными энергией и импульсом. Энергия E и импульс p частицы в соответствии с теорией относительности связаны через массу m частицы релятивистским инвариантом

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4.$$

При этом для движущегося в вакууме со скоростью света c фотона знаменатели релятивистских выражений для импульса и энергии (8.28) и (8.32) обращаются в нуль. Поэтому, чтобы эти выражения не давали бесконечность, логично обратить и числитель в нуль, предположив, что масса фотона равна нулю. Это предположение подтверждается электродинамическими расчетами и астрофизическими наблюдениями. Нулевая масса фотона позволяет получить из релятивистского инварианта простое выражение, связывающее энергию и импульс фотона:

$$E = pc.$$

В 1900 г. Макс Планк создал теорию теплового излучения (см. ниже), высказав гипотезу, что излучение электромагнитных волн происходит квантами (порциями) с энергией

$$E = h\nu.$$

где ν — частота электромагнитной волны; $h = 6{,}63 \cdot 10^{34}$ Дж • с — *постоянная Планка.* Часто используют также *приведенную* (*перечеркнутую*) *постоянную Планка*: $\hbar = 1{,}05\text{-}10^{34}$ Дж • с.

В развитие *гипотезы Планка* Альберт Эйнштейн предположил, что эта дискретность определяется не механизмом поглощения и испускания, а тем, что само излучение состоит из неделимых квантов энергии, поглощаемых или испускаемых только целиком. Это позволило Эйнштейну создать теорию фотоэффекта.

Из вышеприведенных формул несложно получить выражение для *импульса фотона*

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

где *X* — длина волны света.

В квантовой физике часто удобным оказывается использовать понятие *волнового вектора* /г, модуль которого *(волновое число)* выражается через длину волны света:

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

Легко получить, что энергия и импульс фотона симметрично выражаются через волновой вектор и приведенную постоянную Планка:

$$E = pc = \hbar ck; \quad p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k,$$

в векторном виде

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}.$$

Фотоэффект.

В конце XIX в. было открыто явление, которое не могла объяснить классическая электродинамика Максвелла. Этим явлением оказался фотоэлектрический эффект.

Фотоэлектрическим эффектом **(фотоэффектом)** называют явление испускания электронов веществом под действием света. Оно было открыто Г. Герцем в 1887 г., а первые экспериментальные исследования были выполнены русским ученым А. Г. Столетовым, который установил ряд закономерностей фотоэффекта.

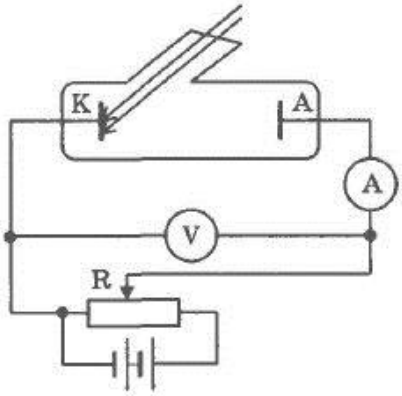
Для решения проблемы излучения энергии абсолютно черным телом М. Планк в 1900 г. высказал гипотезу: излучение электромагнитных волн происходит порциями. Энергия порции излучения пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu,$$

где h - постоянная Планка и равна $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$Дж*/с, v - частота излучения. Впоследствии эта порция излучения была названа квантом, фотоном.

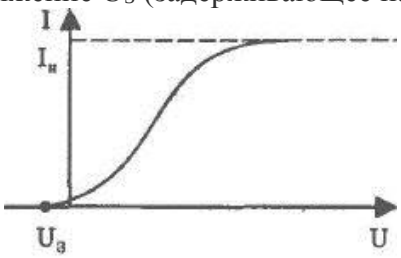
В дальнейшем при изучении фотоэффекта различными учеными были открыты его законы. При этом использовалась установка, собранная по схеме (рис.110).

В стеклянный баллон, из которого выкачали воздух, помещали два электрода. Внутрь баллона через кварцевое стекло, которое пропускает ультрафиолетовые лучи, поступает свет. На электроды подается напряжение, причем освещаемый электрод подключается к отрицательному полюсу источника тока. Напряжение, подаваемое на электроды, можно изменять с помощью потенциометра и измерять вольтметром. Под действием света отрицательно заряженный электрод испускает электроны, которые, направляясь к положительно заряженному электроду, образуют электрический ток. Если, не меняя интенсивность излучения, изменять разность потенциалов между электродами, то можно получить вольт-амперную характеристику (зависимость I от U).



При достижении максимального значения сила тока не меняется. Максимальное значение силы тока I_B называют *током насыщения*. Изменяя в опыте интенсивность излучения, удалось установить **первый закон фотоэффекта:** *количество электронов, вырываемое с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощенной энергии световой волны*.

Электроны, вылетающие с поверхности катода, имеют некоторую скорость и могут достичь анода. Чтобы ток стал равен нулю, необходимо изменить полярность батареи и подать напряжение $U_З$ (задерживающее напряжение), которое определяется выражением:



$$eU_з = \frac{m\upsilon^2}{2}.$$

При изменении интенсивности света задерживающее напряжение не меняется. Оно меняется с изменением частоты падающего света.

Второй закон фотоэффекта: *максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с его частотой и не зависит от интенсивности падающего света*.

Если частота света меньше некоторой постоянной величины для данного вещества, то фотоэффект не наблюдается.

Третий закон фотоэффекта: *для каждого вещества существует "красная граница" - минимальная частота V_K (максимальная длина волны $Л_к$), при которой фотоэффект еще наблюдается.*

Классическая электродинамика Максвелла не смогла объяснить второй и третий законы фотоэффекта и, кроме того, безынерционность этого явления. Квантовая теория легко объясняет все законы фотоэффекта.

1-й закон. Согласно квантовой теории свет испускается в виде потока квантов. Чем больше поток квантов, тем больше интенсивность света и тем большее число электронов будет выбито с поверхности металла. Если напряжение будет таким, что все электроны, выбитые фотонами, достигнут электрода (положительного), то ток насыщения будет зависеть от интенсивности света.

А. Эйнштейн предположил, что свет не только испускается квантами, как это показал М. Планк, но и поглощается квантами. Энергия кванта света расходуется на сообщение электрону кинетической энергии и на работу его выхода из катода, т. е.

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m\upsilon^2_{max}}{2},$$

где hv - энергия поглощенного кванта, $A_{вых}$- работа выхода электронов из вещества,

$$\frac{m\upsilon^2_{max}}{2}$$

- кинетическая энергия электрона. Уравнение А. Эйнштейна представляет собой закон сохранения энергии при фотоэффекте.

2-й закон. Примем условие, что один электрон поглощает один квант. Тогда его потенциальная и кинетическая энергия увеличивается, при этом совершается работа выхода (А) и приобретается скорость v. Энергия кванта света hv идет на совершение работы выхода $A_{вых}$, т. е. работы, которую надо совершить для вырывания электронов из металла и на сообщение ему кинетической энергии:

$$\frac{m\upsilon_{max}^2}{2} = E_{к_{max}}, \; E_{к_{max}}$$

= hv - A. Так как работа выхода для данного вещества постоянна, то очевидно, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов (выбитшьяад дейнявием свете) линейно зависит от частоты.

3-й закон. Как видно из уравнения А. Эйнштейна, фотоэффект будет наблюдаться, если $h\nu > A_{вых}$. При $h\nu < A_{вых}$ фотоэффект не наблюдается. Если $h\nu_{кр} = A$, то электроны освобождаются с нулевой скоростью. Учитывая, что

$\nu_{кр} = \frac{c}{\lambda_{кр}}$, можно записать:

$$h\nu_{кр} = h\frac{c}{\lambda_{кр}} = A_{вых}.$$

Отсюда можно вычислить красную границу фотоэффекта $\nu_{кр}$

Строение атома.

Реальные атомы, конечно, более сложны и мы пока знаем о них далеко не все. Однако современная теоретическая модель электронного стоения атома позволяет успешно объяснить и даже предсказать многие свойства химических элементов, поэтому широко используется в естественных науках.

Для начала рассмотрим более подробно "планетарную" модель, которую предложил Н. Бор (рис. 32).

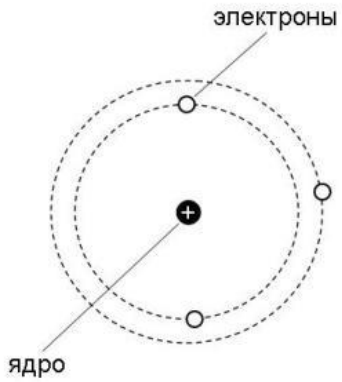


Рис. 32. "Планетарная" модель Бора.

Датский физик Н. Бор в 1913 году предложил модель атома, в которой электроны-частицы вращаются вокруг ядра атома примерно так же, как планеты обращаются вокруг Солнца. Бор предположил, что электроны в атоме могут устойчиво существовать только на орбитах, удаленных от ядра на строго определенные расстояния. Эти орбиты он назвал стационарными. Вне стационарных орбит электрон существовать не может. Почему это так, Бор в то время объяснить не мог. Но он показал, что такая модель позволяет объяснить многие экспериментальные факты.

Электронные орбиты в модели Бора обозначаются целыми числами 1, 2, 3, … n, начиная от ближайшей к ядру. В дальнейшем мы будем называть такие орбиты уровнями. Для описания электронного строения атома водорода достаточно одних только уровней. Но в более сложных атомах, как выяснилось, уровни состоят из близких по энергии подуровней.

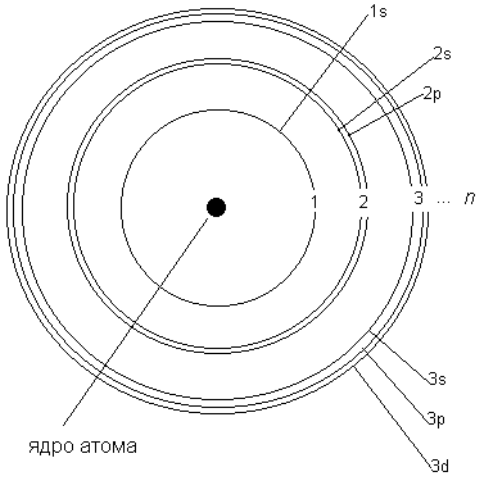


Рис. 33. Модель Бора для атомов более сложных, чем атом водорода.

Рисунок сделан не в масштабе - на самом деле подуровни одного уровня находятся гораздо ближе друг к другу.

В электронной оболочке любого атома ровно столько электронов, сколько протонов в его ядре, поэтому атом в целом электронейтрален. Электроны в атоме заселяют ближайшие к ядру уровни и подуровни, потому что в этом случае их энергия меньше, чем если бы они заселяли более удаленные уровни. На каждом уровне и подуровне может помещаться только определенное количество электронов.

Атомные спектры

В 1913 году Бором предложена теория излучения света, которая основывается на двух постулатах.

1. Внутренняя энергия атома дискретна, то есть может принимать только определённые дозволенные значения или уровни, кратные характерным для данного атома количествам, или квантам энергии. Состояния атома, соответствующие этим уровням энергии, являются стационарными: в таком состоянии атом не излучает электромагнитных волн, несмотря на происходящее в нём движение электронов.
2. Испускание (или поглощение) электромагнитного излучения происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. При этом испускается (или поглощается) фотон монохроматического излучения с энергией, равной разности энергетических уровней E_m и E_n, соответствующих этим состояниям:

$h\nu = E_m - E_n$,

где E_m и E_n - энергия системы в первом и втором состояниях.

На основе этих постулатов Бор разработал теорию излучения и поглощения энергии света атомом водорода. Он предположил, что из всех возможных орбит электрона осуществляются только те, для которых момент импульса (момент количества движений) равен целому кратному постоянной Планка, делённой на 2π:

$$mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (11.)$$

Число n, называется главным квантовым числом, соответствует порядковому номеру орбиты.

В случае атома водорода кулоновская сила взаимного притяжения протона и электрона является центростремительной силой, удерживающей электрон на орбите, то есть:

$$\frac{m\ v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}, \qquad (12)$$

где m и e - масса и заряд электрона, r - радиус орбиты.

Исключая v из (11) и (12), получим, что радиус электронных орбит в атоме может принимать лишь ряд дискретных значений:

из (1) $v = \frac{n\hbar}{m r}$, подставляем в (12) $\frac{e^2}{r^2} = \frac{m n^2 \hbar^2}{r m^2 r^2}$, откуда $r = \frac{n^2 \hbar^2}{m e^2}$,

(n = 1, 2, 3, ...).

Таким образом, радиусы орбит стационарных атома водорода прямо пропорциональны квадрату квантового числа n^2.

Для первой, основной, орбиты n = 1 и радиус $r_1 = \frac{\hbar^2}{m e^2} = 0.529\,\overset{0}{A}$, то есть величина порядка газокинетических размеров атома.

Из рассмотренных соотношений находится и скорость движения электрона по стационарной орбите $v = \frac{e^2}{n\hbar}$. Для основной орбиты атома водорода (n = 1): $v_1 = \frac{e^2}{\hbar}$, $v_1 =$ 2,3·10^8 см/сек. Таков порядок скорости движения электронов по орбите.

Энергетический уровень атома обусловлен полной энергией электрона, которая слагается из кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и энергии взаимодействия электрона с ядром (потенциальной энергии). Потенциальная энергия электрона (по знаку она отрицательна как потенциальная энергия сил притяжения):

$$E_П = -\frac{e^2}{r}.$$

Полная внутренняя энергия:

$$E_Э = E_П + E_K = -\frac{e^2}{r} + \frac{mv^2}{2},$$

учитывая, что $\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$,

находим: $E_Э = -mv^2 + \frac{mv^2}{2} = -\frac{mv^2}{2}$.

Таким образом, энергия электрона, связанного в атоме с ядром, отрицательна. Энергия же свободного электрона равна нулю.

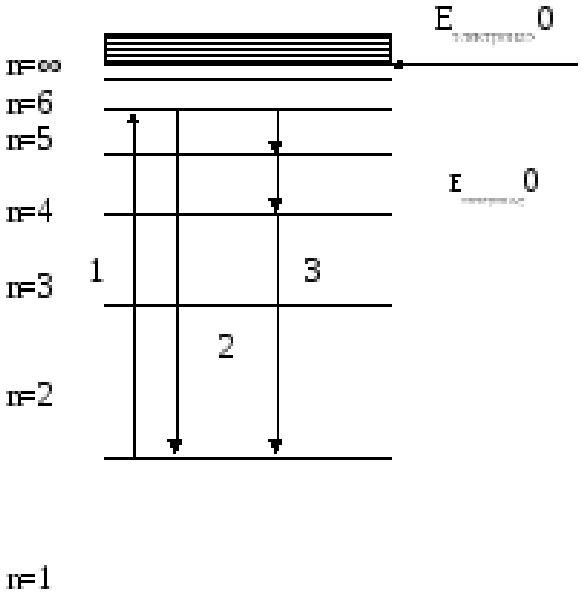


Рис. 34. Структура энергетических уровней атома водорода.

Подставляя в это выражение значения скорости электрона, находим:

$$E_Э = \frac{m}{2}\left(\frac{e^2}{n\hbar}\right)^2 = -\frac{me^4}{2\hbar^2}\cdot\frac{1}{n^2}.$$

Для атома водорода получаются следующие значения:

основной (нулевой) уровень, $n = 1$, $E_1 = -13{,}55$ эВ;

$n = 2$, $E_2 = -3{,}38$ эВ;

$n = 3$, $E_3 = -1{,}5$ эВ.

Схема энергетических уровней атома водорода представлена на рисунке 34.

$E_{электрона}=0$

Поскольку энергетические уровни обратно пропорциональны квадрату квантового числа n^2, разность между каждыми двумя соседними уровнями по мере возрастания числа и по абсолютной величине уменьшается. Таким образом, по мере удаления от ядра разность между двумя соседними энергетическими уровнями атома убывает:

$E_2 - E_1 > E_3 - E_2 > E_4 - E_3$,. . .

Стационарный уровень с наименьшей энергией называется основным, он соответствует состоянию атома, не подвергающегося никаким внешним воздействиям. Остальные стационарные уровни называются возбуждёнными.

Возбуждение атома, то есть переход электрона на орбиту большего радиуса (Рис. 34., путь 1), требует сообщения атому дополнительной энергии и, следовательно, происходит в результате каких-либо внешних воздействий, например, при соударении частиц в процессе интенсивного теплового движения или при электрическом разряде в газах, при поглощении фотона электромагнитного излучения, в результате рекомбинации ионов в газе или электронов и дырок в полупроводнике, при действии на атом частиц радиоактивного излучения и т.д.

Возбужденное состояние неустойчиво, примерно через 10^{-8} сек электрон возвращается на основную орбиту, при этом излучается фотон, уносящий дополнительную энергию, полученную при возбуждении, и атом переходит в основное состояние (Рис.34., путь 2).

Электрон может возвращаться на основную орбиту не только единым переходом, но и ступеньками через промежуточные уровни. В этом случае при переходе будет излучаться несколько фотонов (Рис.34., путь 3) с частотами, соответствующими разности энергий этих уровней.

Зависимость величины излучаемой атомами или молекулами энергии от длины волны или частоты световой волны называется ***спектром испускания***, а поглощаемой - ***спектром поглощения***. Интенсивность спектральных линий определяется числом одинаковых переходов, происходящих в единицу времени, и поэтому зависит от количества излучающих (поглощающих) атомов и вероятности соответствующего перехода.

Атомными спектрами называют как спектры испускания, так и спектры поглощения, которые возникают при квантовых переходах между уровнями свободных или слабо взаимодействующих атомов. Атомные спектры линейчаты.

Принцип действия лазера.

Одним из самых замечательных достижений физики второй половины двадцатого века было открытие физических явлений, послуживших основой для создания удивительного прибора -оптического квантового генератора, или лазера.

Лазер представляет собой источник монохроматического когерентного света с высокой направленностью светового луча. Само слово “лазер” составлено из первых букв английского словосочетания, означающего усиление света в результате вынужденного излучения”.

Действительно, основной физический процесс, определяющий действие лазера, - это вынужденное испускание излучения. Оно происходит при взаимодействии фотона с возбужденным атомом при точном совпадении энергии фотона с энергией возбуждения атома (или молекулы).

В результате этого взаимодействия атом переходит в невозбужденное состояние, а избыток энергии излучается в виде нового фотона с точно такой же энергией, направлением

распространения и поляризацией, как и у первичного фотона. Таким образом, следствием данного процесса является наличие уже двух абсолютно идентичных фотонов. При дальнейшем взаимодействии этих фотонов с возбужденными атомами, аналогичными первому атому, может возникнуть “цепная реакция” размножения одинаковых фотонов, “летящих” абсолютно точно в одном направлении, что приведет к появлению узконаправленного светового луча. Для возникновения лавины идентичных фотонов необходима среда, в которой возбужденных атомов было бы больше, чем невозбужденных, поскольку при взаимодействии фотонов с невозбужденными атомами происходило бы поглощение фотонов. Такая среда называется средой с инверсной населенностью уровней энергии.

Итак, кроме вынужденного испускания фотонов возбужденными томами происходят также процесс самопроизвольного, спонтанного испускания фотонов при переходе возбужденными атомами в невозбужденное состояние и процесс поглощения фотонов при переходе атомов из невозбужденного состояния в возбужденное. Эти три процесса, сопровождающие переходы атомов в возбужденные состояния и обратно, были постулированы А.Эйнштейном в 1916 г.

Если число возбужденных атомов велико и существует инверсная выделенность уровней (в верхнем, возбужденном состоянии атомов больше, чем в нижнем, невозбужденном), то первый же фотон, родившийся в результате спонтанного излучения, вызовет всенарастающую лавину появления идентичных фотонов. Произойдет усиление спонтанного излучения.

На возможность усиления света в среде с инверсной населенностью за счет вынужденного испускания впервые указал в 1939 г. Советский физии В.А.Фабрикант, предложивший создавать инверсную населенность в электрическом разряде в газе.

Существует, однако, и другой вариант получения лазерного луча, связанный с использованием системы обратной связи. Спонтанно родившиеся фотоны, направление распространения которых не перпендикулярно плоскости зеркал, создадут лавины фотонов, выходящие за пределы среды. В то же время фотоны, направление распространения которых перпендикулярно плоскости зеркал, создадут лавины, многократно усиливающиеся в среде вследствие многократного отражения от зеркал. Если одно из зеркал будет обладать небольшим пропусканием, то через него будет выходить направленный поток фотонов перпендикулярно плоскости зеркал. При правильно подобранном пропускании зеркал, точной их настройке относительно друг друга и относительно продольной оси среды с инверсной населенностью обратная связь может оказаться настолько эффективной, что излучением “вбок” можно будет полностью пренебречь по сравнению с излучением, выходящим через зеркала. На практике это, действительно, удается сделать. Такую схему обратной связи называют оптическим резонатором, и именно этот тип резонатора используют в большинстве существующих лазеров.

В 1955 г. одновременно и независимо Н.Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР и Ч. Таунсом в США был предложен принцип создания первого в мире генератора квантов электромагнитного излучения на среде с инверсной населенностью, в котором вынужденное испускание в результате использования обратной связи приводило к генерации чрезвычайно монохроматического излучения.

Спустя несколько лет, в 1960 г., американским физиком Т. Мейманом тбыл запущен первый квантовый генератор оптического диапазона - лазер, в котором обратная связь осуществлялась с помощью описанного выше оптического резонатора, а инверсная населенность возбуждалась в кристаллах рубина, облучаемых излучением ксеноновой лампы-вспышки. Рубиновый кристалл представляет собой кристалл оксида алюминия AL_2O_3 с небольшой добавкой = 0,05% хрома. При добавлении атомов хрома прозрачные кристаллы рубина приобретают розовый цвет и поглощают излучение в двух полосах ближней ультрафиолетовой области спектра.

Квантовая механика

Квантовая механика — это физическая теория, устанавливающая способ описания и законы движения на микроуровне. Ее начало совпало с началом века. М. Планк в 1900 году предположил, что свет испускается неделимыми порциями энергии — квантами, и математически представил это в виде формулы E=hv, где v — частота света, а h—универсальная постоянная, характеризующая меру дискретной порции энергии, которой обмениваются вещество и излучение. В атомную теорию вошли таким образом прерывистые физические величины, которые могут изменяться только скачками.

Последующее изучение явлений микромира привело к результатам, которые резко расходились с общепринятыми в классической физике и даже теории относительности представлениями. Классическая физика видела свою цель в описании объектов, существующих в пространстве и в формулировке законов, управляющих их изменениями во времени. Но для таких явлений, как радиоактивный распад, дифракция, испускание спектральных линий можно утверждать лишь, что имеется некоторая вероятность того, что индивидуальный объект таков и что он имеет такое-то свойство. В квантовой механике нет места для законов, управляющих изменениями индивидуального объекта во времени.

Для классической механики характерно описание частиц путем з'адания их положения и скоростей и зависимости этих величин от времени. В квантовой механике одинаковые частицы в одинаковых условиях могут вести себя по-разному. Эксперимент с двумя отверстиями, через которые проходит электрон, позволяет и требует применения вероятностных представлений. Нельзя сказать, через какое отверстие пройдет данный электрон, но если их много, то можно предположить, что часть их проходит через одно отверстие, часть — через другое. Законы квантовой механики—законы статистического характера. «Мы можем предсказать, сколько приблизительно атомов (радиоактивного вещества — А. Г.) распадутся в следующие полчаса, но мы не можем сказать... почему именно эти отдельные атомы обречены на гибель»

В микромире господствует статистика, а не уравнения Максвелла или законы Ньютона. «Вместо этого мы имеем законы, управляющие изменениями во времени» Статистические законы можно применить только к большим совокупностям, но не к отдельным индивидуумам.

Квантовая механика отказывается от поиска индивидуальных законов элементарных частицы и устанавливает статистические законы

На базе квантовой механики невозможно описать положение и скорость элементарной частицы или предсказать ее будущий путь. Волны вероятности говорят нам о вероятности встретить электрон в том или ином месте.

В. Гейзенберг делает такой вывод; «В экспериментах с атомными процессами мы имеем дело с вещами и фактами, которые столь же реальны, сколь реальны любые явления повседневной жизни. Но атомы или элементарные частицы реальны не в такой степени. Они образуют скорее мир тенденций или возможностей, чем мир вещей и фактов»

В первой модели атома, построенной на основе экспериментального обнаружения квантования света, Н. Бор (1913 год) объяснил это явление тем, что излучение происходит при переходе электрона с одной орбиты на другую, при этом рождается квант света с энергией, равной разности энергий уровней, между которыми осуществлялся переход. Так возникает линейчатый спектр — основная особенность атомных спектров (в спектрах оказываются лишь определенные длины волн).

Важная особенность явлений микромира заключается в том, что электрон ведет себя подобно частице, когда движется во внешнем электрическом или магнитном поле, и подобно волне, когда дифрагирует, проходя сквозь кристалл. Поведение потока частиц—электронов, атомов, молекул — при встрече с препятствиями или отверстиями атомных размеров подчиняется волновым законам: наблюдаются явления дифракции, интерференции, отражения, преломления и т. п. Луи де Бройль предположил, что электрон — это волна определенной длины.

Дифракция подтверждает волновую гипотезу, отсутствие увеличения энергии выбиваемых светом частиц — квантовую. Это и получило название корпускулярно-волнового дуализма. Как же описывать процессы в микромире, если «нет никаких шансов последовательно описать световые явления, выбрав только какую-либо одну из двух возможных теорий — волновую или квантовую»

Некоторые эффекты объясняются волновой теорией, некоторые другие — квантовой. Поэтому следует использовать разные формулы и из волновой и из квантовой теории для более полного описания процессов — таков смысл принципа дополнительности Н. Бора. «Усилия Бора были направлены на то, чтобы сохранить за обоими наглядными представлениями, корпускулярным и волновым, одинаковое право на существование, причем он пытался показать, что хотя эти представления возможно исключают друг друга, однако они лишь вместе делают возможным полное описание процессов в атоме»

С принципом дополнительности связано и так называемое «соотношение неопределенностей», сформулированное в 1927 году Вернером Гейзенбергом, в соответствии с которым в квантовой механике не существует состояний, в которых и местоположение, и количество движения (произведение массы на скорость) имели бы вполне определенное значение. Частица со строго определенным импульсом совершенно не локализована. Чем более определенным становится импульс, тем менее определенно ее положение.

Соотношение неопределенностей гласит, что для абсолютно точной локализации микрочастицы необходимы бесконечно большие импульсы, что физически не может быть осуществлено. Более того, современная физика элементарных частиц показывает, что при очень сильных воздействиях на частицу, она вообще не сохраняется, а происходит даже множественное рождение частиц.

В более общем плане можно сказать, что только часть относящихся к квантовой системе физических величин может иметь одновременно точные значения, остальные величины оказываются неопределенными. Поэтому во всякой квантовой системе не могут одновременно равняться нулю все физические величины.

Энергию системы также можно измерить с точностью, не превышающей определенной величины. Причина этого — во взаимодействии системы с измерительным прибором, который препятствует точному измерению энергии. Из соотношения неопределенностей вытекает, что энергии возбужденных состояний атомов, молекул, ядер не могут быть строго определенными. На этом выводе и основана гипотеза происхождения Вселенной из «возбужденного вакуума».

Значение эксперимента возросло в квантовой механике до такой степени, что, как пишет Гейзенберг, «наблюдение играет решающую роль в атомном событии, и что реальность различается в зависимости оттого, наблюдаем мы ее илинет» Из данного обстоятельства, заключающегося в том, что сам измерительный прибор влияет на результаты измерения и участвует в формировании изучаемого явления, следовало, во-первых, представление об особой «физической реальности», которой присущ данный феномен, а, во-вторых, представление о субъект- объектном единстве как единстве измерительного прибора и изучаемой реальности. «Квантовая теория уже не допускает вполне объективного описания природы» Человек перешел на тот уровень исследования, где его влияние оказывается неустранимым в ходе эксперимента и фиксируемым результатом является взаимодействие изучаемого объекта и измерительного прибора.

Итак, принципиально новыми моментами в исследовании микромира стали:

1) каждая элементарная частица обладает как корпускулярными, так и волновыми свойствами;

2) вещество может переходить в излучение (аннигиляция частицы и античастицы дает фотон, т. е. квант света);

3) можно предсказать место и импульс элементарной частицы только с определенной вероятностью;

4) прибор, исследующий реальность, влияет на нее;

5) точное измерение возможно только при потоке частиц, но не одной частицы.

По существу, относительность восторжествовала и в квантовой механике, так как ученые признали, что нельзя:

1) найти объективную истину безотносительно от измерительного прибора;

2) знать одновременно и положение и скорость частиц;

3) установить, имеем ли мы в микромире дело с частицами или волнами.

Это и есть торжество относительности в физике XX века.

Тема 5.2. Атомное ядро и элементарные частицы

Атомное ядро

Атомное ядро характеризуется зарядом Ze, массой M, спином J, магнитным и электрическим квадрупольным моментом Q, определенным радиусом R, изотопическим спином T и состоит из нуклонов - протонов и нейтронов.

Число нуклонов A в ядре называется массовым числом. Число Z называют зарядовым числом ядра или атомным номером. Поскольку Z определяет число протонов, а A - число нуклонов в ядре, то число нейронов в атомном ядре N=A-Z. Атомные ядра с одинаковыми Z, но различными A называются изотопами. В среднем на каждое значение Z приходится около трех стабильных изотопов. Например, 28Si, 29Si, 30Si являются стабильными изотопами ядра Si. Кроме стабильных изотопов, большинство элементов имеют и нестабильные изотопы, для которых характерно ограниченное время жизни.

Ядра с одинаковым массовым числом A называются изобарами, а с одинаковым числом нейтронов-изотонами.

Все атомные ядра разделяются на стабильные и нестабильные. Свойства стабильных ядер остаются неизменными неограниченно долго. Нестабильные же ядра испытывают различного рода превращения.

Энергия связи

Экспериментальные измерения масс атомных ядер, выполненные с большой точностью, показывают, что масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов.

Энергия связи - это энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны.

Энергия связи, отнесенная к массовому числу A, называется средней энергией связи нуклона в атомном ядре (энергия связи на один нуклон).

Энергия связи приблизительно постоянна для всех стабильных ядер и примерно равна 8 МэВ. Исключением является область легких ядер, где средняя энергия связи растет от нуля (A=1) до 8 МэВ для ядра 12C.

Аналогично энергия связи на один нуклон можно ввести энергию связи ядра относительно других составных его частей.

В отличие от средней энергии связи нуклонов количество энергии связи нейрона и протона изменяется от ядра к ядру.

Часто вместо энергии связи используют величину, называемую дефектом массы и равную разности масс и массового числа атомного ядра.

Радиоактивные излучения и их воздействие на живые организмы.

Явление радиоактивности, или спонтанного распада ядер, была открыта французским физиком А. Беккерелем в 1896 г. Он обнаружил, что уран и его соединения испускают лучи или частицы, проникающие сквозь непрозрачные тела и способные засвечивать фотопластинку, Беккерель установил, что интенсивность излучения пропорциональна только концентрации урана и не зависит от внешних условий (температура, давление) и от того, находится ли уран в каких-либо химических соединениях.

Английскими физиками Э. Резерфордом и Ф. Содди было доказано, что во всех радиоактивных процессах происходят взаимные превращения атомных ядер химических элементов. Изучение свойств излучения, сопровождающего эти процессы в магнитном и электрическом полях, показало, что оно разделяется на α-частицы (ядра гелия), β- частцы (электроны) и γ- лучи (электромагнитное излучение с очень малой длиной волны).

Атомное ядро, испускающее γ-кванты, α-, β- или другие частицы, называется радиоактивным ядром. В природе существует 272 стабильных атомных ядра. Все остальные ядра радиоактивны и называются радиоизотопами.

Альфа-распад.

Энергия связи ядра характеризует его устойчивость к распаду на составные части. Если энергия связи ядра меньше энергии связи продуктов его распада, то это означает, что ядро может самопроизвольно (спонтанно) распадаться. При альфа-распаде альфа-частицы уносят почти всю энергию и только 2 % ее приходится на вторичное ядро. При альфа-распаде массовое число изменяется на 4 единицы, а атомный номер на две единицы.

$$^{A}_{Z}Э \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Э + ^{4}_{2}He$$

Начальная энергия альфа-частицы составляет 4-10 МэВ. Поскольку альфа-частицы имеют большую массу и заряд, длина их свободного пробега в воздухе невелика. Так, например, длина свободного пробега в воздухе альфа-частиц, испускаемых ядром урана, равна 2,7 см, а испускаемых радием, - 3,3 см.

Бета-распад.

Это процесс превращения атомного ядра в другое ядро с изменением порядкового номера без изменения массового числа. Различают три типа b-распада: электронный, позитронный и захват орбитального электрона атомным ядром. Последний распада принято также называть К-захватом, поскольку при этом наиболее вероятно поглощение электрона с ближайшей к ядру К оболочки. Поглощение электронов с L и M оболочек также возможно, но менее вероятно. Период полураспада b -активных ядер изменяется в очень широких пределах.

Число бета-активных ядер, известных в настоящее время, составляет около полутора тысяч, но только 20 из них являются естественными бета-радиоактивными изотопами. Все остальные получены искусственным путем.

Непрерывное распределение по кинетической энергии испускаемых при распаде электронов объясняется тем обстоятельством, что наряду с электроном испускается и антинейтрино. Если бы не было антинейтрино, то электроны имели бы строго определенный импульс, равный импульсу остаточного ядра. Резкий обрыв спектра наблюдается при значении кинетической энергии, равной энергии бета-распада. При этом кинетические энергии ядра и антинейтрино равны нулю и электрон уносит всю энергию, выделяющихся при реакции.

При электронном распаде остаточное ядро имеет порядковый номер на единицу больше исходного при сохранении массового числа. Это означает, что в остаточном ядре число протонов увеличилось на единицу, а число нейтронов, наоборот, стало меньше: N=A-(Z+1).

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + ^{0}_{+1}e + \nu_e.$$

Гамма-распад.

Стабильные ядра находятся в состоянии, отвечающем наименьшей энергии. Это состояние называется основным. Однако путем облучения атомных ядер различными частицами или высокоэнергитическими протонами им можно передать определенную энергию и, следовательно, перевести в состояния, отвечающие большей энергии. Переходя через некоторое время из возбужденного состояния в основное, атомное ядро может испустить или частицу, если энергия возбуждения достаточно высока, или высокоэнергетическое электромагнитное излучение - гамма-квант.

Поскольку возбужденное ядро находится в дискретных энергетических состояниях, то и гамма-излучение характеризуется линейчатым спектром.

Деление атомных ядер.

Явление деления тяжелых атомных ядер на два осколка было открыто Ганом и Штрассманом в 1939 г. При изучении взаимодействия нейтронов различных энергий и ядер урана. Несколько позже, в 1940 г. Советские физики К.А.Петржак и Г.И. Флеров обнаружили самопроизвольное (спонтанное) деление ядер урана. При спонтанном деление и делении, вызванном нейронами, как правило, образуется асимметричные осколки, отношение масс которых примерно равно 3 : 2.

При реакции деления выделяется очень большая энергия. Энергия деления высвобождается в виде кинетической энергии ядер-осколков, кинетической энергии испускаемых ядрами-осколками электронов, гамма-квантов, нейтрино, нейтронов.

Основная часть энергии деления приходится на энергию ядер-осколков, поскольку под действием кулоновских сил отталкивания они приобретают большую кинетическую энергию. Основная часть энергии деления выделяется в виде кинетической энергии ядер-осколков.

Замечательным и чрезвычайно важным свойством реакции деления является то, что в результате деления образуется несколько нейтронов. Это обстоятельство позволяет создать условия для поддержания стационарной или развивающейся во времени цепной реакции деления ядер. Действительно, если в среде, содержащей делящиеся ядра, один нейтрон вызывают реакцию деления, то образующиеся в результате реакции нейтроны могут с определенной вероятностью вызвать деление ядер, что может привести при соответствующих условиях к развитию неконтролируемого процесса деления. Число вторичных нейтронов не постоянно для всех тяжелых ядер и зависит как от энергии вызвавшего деление нейтрона, так и от свойств ядра-мишени. Среди нейтронов деления кроме так называемых мгновенных нейтронов,испускаемых за 10-15 с после процесса деления, есть также и запаздывающие нейтроны. Они испускаются в течении нескольких минут с постепенно убывающей интенсивность. Мгновенные нейтроны составляют более 99% полного числа нейтронов деления, а их энергия заключена в широком диапазоне: от тепловой энергии и до энергии приблизительно равной 10 МэВ.

Ядерная энергетика.

Энергетика - важнейшая отрасль народного хозяйства, охватывающая энергетические ресурсы, выработку, преобразование, передачу и использование различных видов энергии. Это основа экономики государства.

В мире идет процесс индустриализации, который требует дополнительного расхода материалов, что увеличивает энергозатраты. С ростом населения становится больше энергозатрат на обработку почвы, уборку урожая, производство удобрений и т.д.

В настоящее время многие природные легкодоступные ресурсы планеты исчерпываются. Добывать сырье приходится на большой глубине или на морских шельфах. Ограниченый мировые запасы нефти и газа, казалось бы, ставят человечество перед перспективой энергетического кризиса. Однако использование ядерной энергии и угля дает человечеству возможность избежать этого, результаты фундаментальных исследований физики атомного ядра позволяют отвести угрозу энергетического кризиса путем использования энергии, выделяемой при некоторых реакциях атомных ядер.

МИР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Во второй половине XX в., с созданием ускорителей заряженных частиц, в физике получены поистине удивительные результаты. Было открыто множество новых субатомных

частиц. Новые частицы обычно открывают, наблюдая за реакцией рассеяния уже известных частиц. Для этого в ускорителях частицы сталкивают с как можно большей энергией, а затем исследуют продукты их взаимодействия.

Мир субатомных частиц поистине многообразен. К уже известным частицам, из которых построены атомы и молекулы (протоны, нейтроны, электроны), добавилось множество других: мюонов, мезонов, гиперонов, античастиц, различных нейтральных частиц и др. Среди субатомных частиц обнаружились и такие частицы, которые в окружающем нас веществе практически не встречаются, — резонансы. Время их жизни — мельчайшие доли секунды. По истечении этого чрезвычайно короткого времени они распадаются на обычные частицы.

В 1950— 1970-е гг. физики были совершенно сбиты с толку многочисленностью, разнообразием и необычностью вновь открытых субатомных частиц. Если в конце 1940-х гг. было известно 15 элементарных частиц, то в конце 1970-х — уже около 400. Совершенно непонятно, для чего столько частиц. Являются ли элементарные частицы случайными осколками материи или, возможно, за их взаимодействиями скрывается некоторый порядок? Развитие физики в последующие десятилетия показало: миру субатомных частиц присущ глубокий структурный порядок. В основе этого порядка — фундаментальные физические взаимодействия.

Фундаментальные физические взаимодействия

Понятие фундаментального физического взаимодействия.

В своей повседневной жизни человек сталкивается с множеством сил, действующих на тела: сила ветра или потока воды; давление воздуха; мощный выброс взрывающихся химических веществ; мускульная сила человека; вес предметов; давление квантов света; притяжение и отталкивание электрических зарядов; сейсмические волны, вызывающие подчас катастрофические разрушения; вулканические извержения, приводившие к гибели цивилизаций, и т.д. Одни силы действуют непосредственно при контакте с телом, другие, например гравитация, действуют на расстоянии, через пространство. Но, как выяснилось в результате развития естествознания, несмотря на столь большое разнообразие, все действующие в природе силы можно свести к четырем фундаментальным взаимодействиям.

В порядке возрастания интенсивности эти фундаментальные взаимодействия представляются следующим образом: гравитационное взаимодействие; слабое взаимодействие; электромагнитное взаимодействие; сильное взаимодействие. Именно эти взаимодействия в конечном счете отвечают за все изменения в природе, именно они являются источником всех преобразований материальных тел, процессов. Каждое из четырех фундаментальных взаимодействий имеет сходство с тремя остальными и в то же время свои отличия.

Прежде всего следует сказать о том, что является общим для этих фундаментальных взаимодействий. Иначе говоря, как понимает современная физика сущность взаимодействия? Как уже отмечалось, еще в середине XIX в. с созданием теории электромагнитного поля выяснилось, что передача взаимодействия осуществляется не мгновенно (принцип дальнодействия), а с конечной скоростью посредством некоторого посредника — непрерывно распределенного в пространстве поля (принцип близкодействия). Скорость распространения электромагнитного поля равна скорости света.

Однако уже в первой четверти XX в., с появлением квантовой механики значительно углубилось представление о физическом поле. В свете квантово-волнового дуализма любое поле является не непрерывным, а имеет дискретную структуру, ему должны соответствовать определенные частицы, кванты этого поля. Например, квантами электромагнитного поля являются фотоны. Когда заряженные частицы обмениваются между собой фотонами, это приводит к появлению электромагнитного поля. Фотоны и являются переносчиками электромагнитного взаимодействия.

Аналогичным образом и другие виды фундаментальных взаимодействий имеют свои поля и соответствующие частицы, переносящие это полевое взаимодействие. Изучение конкретных свойств, закономерностей этих полей и частиц — носителей фундаментальных взаимодействий — главная задача современной физики.

1. Гравитация.

Гравитация первым из четырех фундаментальных взаимодействий стала предметом научного исследования. Созданная в XVII в. ньютоновская теория гравитации (закон всемирного тяготения) позволила впервые осознать истинную роль гравитации как силы природы. Релятивистской теорией гравитации является ОТО, которая в области слабых гравитационных полей переходит в теорию тяготения Ньютона.

Гравитация обладает рядом особенностей, резко отличающих ее от других фундаментальных взаимодействий. Наиболее удивительной особенностью гравитации является ее малая интенсивность. Гравитационное взаимодействие в 1039 раз меньше силы взаимодействия электрических зарядов. Поэтому в описании взаимодействий элементарных частиц оно обычно не учитывается. В микромире гравитация ничтожна.

Если бы размеры атома водорода определялись гравитацией, а не взаимодействием между электрическими зарядами, то радиус низшей (самой близкой к ядру) орбиты электрона превосходил бы радиус доступной наблюдению части Вселенной.

Как может такое слабое взаимодействие оказаться господствующей силой во Вселенной? Все дело во второй удивительной черте гравитации — ее универсальности. Ничто во Вселенной не может избежать гравитации. Каждая частица испытывает на себе действие гравитации, и сама является источником гравитации, вызывает гравитационное притяжение. Гравитация возрастает по мере образования все больших скоплений вещества. И хотя притяжение одного атома пренебрежимо мало, но результирующая сила притяжения со стороны всех атомов может быть значительной. Это проявляется и в повседневной жизни: мы ощущаем гравитацию потому, что все атомы Земли сообща притягивают нас.

Кроме того, гравитация — дальнодействующая сила природы. Это означает, что, хотя интенсивность гравитационного взаимодействия убывает с расстоянием, оно распространяется в пространстве и может сказываться на весьма удаленных от источника телах. В астрономическом масштабе гравитационное взаимодействие, как правило, играет главную роль. Благодаря дальнодействию гравитация не позволяет Вселенной развалиться на части: она удерживает планеты на орбитах, звезды в галактиках, галактики в скоплениях, скопления в Метагалактике.

Сила гравитации, действующая между частицами, всегда представляет собой силу притяжения: она стремится сблизить частицы. Гравитационное отталкивание еще никогда не наблюдалось.

Хотя в традициях квазинаучной мифологии есть целая область, которая называется левитацией — поиск «фактов» антигравитации.

Весьма трудно развиваются представления о квантовании гравитации. Тем не менее согласно общим теоретико-физическим представлениям гравитационное взаимодействие должно подчиняться квантовым законам так же, как и электромагнитное. (Иначе возникают множественные противоречия в основаниях современной физики, в том числе связанные с принципом неопределенности и др.) В таком случае гравитационному взаимодействию должно соответствовать поле с квантом гравитации — гравитоном (нейтральная частица с нулевой массой покоя и спином 2). Квантовая гравитация приводит к появлению представления о дискретности свойств пространства-времени, понятиям элементарной длины, кванта пространства $r \approx 10\text{-}33$см, и элементарного временного интервала, кванта времени $t \approx 10\text{-}43$ с. Последовательная квантовая теория гравитации пока не создана.

К сожалению, возможности современной экспериментальной гравитационной физики и астрономии не позволяют зафиксировать квантовые эффекты гравитации в силу их чрезвычайной слабости. Тем не менее явления, в которых проявляются квантовые свойства гравитации, по-видимому, существуют. Они проявляют себя в очень сильных гравитационных полях, где происходят квантовые процессы рождения частиц (точка сингулярности, начальные моменты возникновения Вселенной, гравитационный коллапс, черные дыры.

2. Электромагнетизм.

По величине электрические силы намного превосходят гравитационные, поэтому в отличие от слабого гравитационного взаимодействия электрические силы, действующие между телами обычных размеров, можно легко наблюдать. Электромагнетизм известен людям с незапамятных времен (полярные сияния, вспышки молнии и др.). Но долгое время электрические и магнитные явления изучались независимо друг от друга. И только в середине XIX в. Дж. К. Максвелл объединил учения об электричестве и магнетизме в единой теории электромагнитного поля. А существование электрона (единицы электрического заряда) было твердо установлено в 1890-е гг. Но не все элементарные частицы являются носителями электрического заряда. Электрически нейтральны, например, фотон и нейтрино. Этим электричество отличается от гравитации. Все материальные частицы создают гравитационное поле, тогда как с электромагнитным полем связаны только заряженные частицы.

Как и электрические заряды, одноименные магнитные полюсы отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Но в отличие от электрических зарядов магнитные полюсы встречаются не по отдельности, а только парами — северный полюс и южный. Еще с древнейших времен известны попытки получить посредством разделения магнита лишь один изолированный магнитный полюс — монополь. Но все они заканчивались неудачей. Может быть, существование изолированных магнитных полюсов в природе исключено? Определенного ответа на этот вопрос пока не существует. Некоторые современные теории допускают возможность существования магнитного монополя.

Электромагнитное поле неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неотрывно от этих частиц. Но при ускоренном движении частиц электромагнитное поле «отрывается» от них и участвует в независимой форме электромагнитных волн. При этом радиоволны (10^3—10^{12} Гц), инфракрасное излучение (10^{12}— 3,7 10^{14} Гц), видимый свет (3,7 10^{14}—7,5 10^{14} Гц), ультрафиолетовое излучение (7,5 10^{14}—3 10^{17} Гц), рентгеновское излучение (3 10^{17}— 3 10^{20} Гц) и гамма-излучение (3 10^2—10^{23} Гц) представляют собой электромагнитные волны различной частоты. Причем между соседними диапазонами резких границ нет (длина электромагнитной волны с ее частотой связана соотношением: $\lambda = c/v$, где λ — длина волны, v — частота, c— скорость света).

Электромагнитное взаимодействие (как и гравитация) является дальнодействующим, оно ощутимо на больших расстояниях от источника. Как и гравитация, оно подчиняется закону обратных квадратов. Электромагнитное взаимодействие проявляется на всех уровнях материи — в мегамире, макромире и микромире.

Электромагнитное поле Земли простирается далеко в космическое пространство, мощное поле Солнца заполняет всю Солнечную систему; существуют и галактические электромагнитные поля. В то же время электромагнитное взаимодействие определяет структуру атомов и молекул (положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны). Оно отвечает за подавляющее большинство физических и химических явлений и процессов (за исключением ядерных): силы упругости, трения, поверхностного натяжения, им определяются свойства агрегатных состояний вещества, химических превращений, оптические явления, явления ионизации, многие реакции в мире элементарных частиц и др.

3. Слабое взаимодействие.

К выявлению существования слабого взаимодействия физика продвигалась медленно. Слабое взаимодействие ответственно за распады частиц. Поэтому с его проявлением столкнулись при открытии радиоактивности и исследовании бета-распада.

У бета-распада обнаружилась в высшей степени странная особенность. Создавалось впечатление, что в этом распаде как будто нарушается закон сохранения энергии, что часть энергии куда-то исчезает. Чтобы «спасти» закон сохранения энергии, В. Паули предположил, что при бета-распаде вместе с электроном вылетает, унося с собой недостающую энергию, еще одна частица. Она — нейтральная и обладает необычайно высокой проникающей способностью, вследствие чего ее не удавалось наблюдать. Э. Ферми назвал частицу-невидимку «нейтрино».

Но предсказание нейтрино — это только начало проблемы, ее постановка. Нужно было объяснить природу нейтрино, здесь оставалось много загадочного. Дело в том, что электроны и нейтрино испускались нестабильными ядрами, но было известно, что внутри ядер нет таких частиц. Как же они возникали? Выяснилось, что входящие в состав ядра нейтроны, предоставленные самим себе, через несколько минут распадаются на протон, электрон и нейтрино. Какие же силы вызывают такой распад? Анализ показал, что известные силы не могут вызвать такой распад. Он, видимо, порождался какой-то иной, неизвестной силой, которой соответствует некоторое «слабое взаимодействие».

Слабое взаимодействие по величине значительно меньше всех взаимодействий, кроме гравитационного. Там, где оно присутствует, его эффекты оказываются в тени электромагнитного и сильного взаимодействий. Кроме того, слабое взаимодействие распространяется на очень незначительные расстояния. Радиус слабого взаимодействия очень мал (10-16 см). Потому оно не может влиять не только на макроскопические, но даже на атомные объекты и ограничивается субатомными частицами. Кроме того, по сравнению с электромагнитным и сильным взаимодействиями слабое взаимодействие протекает чрезвычайно медленно.

Когда началось лавинообразное открытие множества нестабильных субъядерных частиц, то обнаружилось, что большинство из них участвуют в слабом взаимодействии. Слабое взаимодействие играет в природе очень важную роль. Оно является составной частью термоядерных реакций на Солнце, звездах, обеспечивая синтез пульсаров, взрывов сверхновых звезд, синтез химических элементов в звездах и др.

Теория слабого взаимодействия была создана в конце 1960-х гг. Создание этой теории явилось крупным шагом на пути к единству физики.

4. Сильное взаимодействие.

Последнее в ряду фундаментальных взаимодействий — сильное взаимодействие, которое является источником огромной энергии. Наиболее характерный пример энергии, высвобождаемой сильным взаимодействием, — Солнце. В недрах Солнца и звезд непрерывно протекают термоядерные реакции, вызываемые сильным взаимодействием (при существенном участии и слабого взаимодействия). Но и человек научился вызывать сильное взаимодействие: создана водородная бомба, сконструированы и совершенствуются технологии управляемой термоядерной реакции.

К представлению о существовании сильного взаимодействия физика шла в ходе изучения структуры атомного ядра. Какая-то сила должна удерживать положительно заряженные протоны в ядре, не позволяя им разлетаться под действием электростатического отталкивания. Гравитация слишком слаба и не может это обеспечить; очевидно, необходимо какое-то взаимодействие, причем более сильное, чем электромагнитное. Впоследствии оно было обнаружено и получило название «сильное взаимодействие».

Выяснилось, что, хотя по своей величине сильное взаимодействие существенно превосходит все остальные фундаментальные взаимодействия, за пределами ядра оно не ощущается. Сильное взаимодействие проявляется на расстоянии, определяемом размерами ядра, т.е. примерно 10-13 см. Главная функция сильного взаимодействия в природе — создание прочной связи между нуклонами (протонами и нейронами) в ядрах атомов. При этом столкновение ядер или нуклонов, обладающих высокими энергиями, приводит к разнообразным ядерным реакциям, в том числе реакции термоядерного синтеза на Солнце, которая является основным источником энергии на Земле.

Вместе с тем выяснилось, что сильное взаимодействие испытывают не все частицы. Так, его испытывают протоны и нейтроны, но электроны, нейтрино и фотоны не подвластны ему. В сильном взаимодействии участвуют обычно только тяжелые частицы.

Теоретическое объяснение природы сильного взаимодействия развивалось трудно. Прорыв наметился только в начале 1960-х гг., когда была предложена кварковая модель. В этой теории нейтроны и протоны рассматриваются не как элементарные частицы, а как составные системы, построенные из кварков.

Таким образом, в фундаментальных физических взаимодействиях четко прослеживается различие сил дальнодействующих и близкодействующих. С одной стороны, взаимодействия неограниченного радиуса действия (гравитация, электромагнетизм), а с другой — малого радиуса (сильное и слабое). Мир физических процессов развертывается в границах этих двух полярностей и воплощает единство предельно малого и предельно большого — микромира и мегамира, элементарной частицы и всей Вселенной.

Проблема единства физики.

Познание есть обобщение действительности, и поэтому цель науки — поиск единства в природе, связывание разрозненных фрагментов знания в единую картину. Для того чтобы создать такую единую систему, нужно открыть глубинное связующее звено между различными отраслями знания. Поиск таких связей — одна из главных задач научного исследования. Всякий раз, когда удается установить такие новые связи, значительно углубляется понимание окружающего мира, формируются новые способы познания, которые указывают путь к не известным ранее явлениям.

Установление глубинных связей между различными областями природы — это одновременно и синтез знания, и новый метод, направляющий научные исследования по непроторенным дорогам. Так, выявление Ньютоном связи между притяжением тел в земных условиях и движением планет ознаменовало собой рождение классической механики, на основе которой построена технологическая база современной цивилизации. Установление связи термодинамических свойств газа с хаотическим движением молекул поставило на прочную основу атомно-молекулярную теорию вещества. В середине прошлого столетия Максвелл создал единую электромагнитную теорию, охватившую как электрические, так и магнитные явления. Затем в 1920-х гг. Эйнштейн предпринимал попытки объединить в единой теории электромагнетизм и гравитацию.

Но к середине XX в. положение в физике радикально изменилось: были открыты два новых фундаментальных взаимодействия — сильное и слабое. При создании единой физики приходится считаться уже не с двумя, а с четырьмя фундаментальными взаимодействиями. Это несколько охладило пыл тех, кто надеялся на быстрое решение проблемы единства физики. Однако сам замысел под сомнение всерьез не ставился.

В современной теоретической физике господствует точка зрения, что все четыре (или хотя бы три) взаимодействия представляют собой явления одной природы и может быть найдено их единое теоретическое описание. Перспектива создания единой теории мира физических элементов (на основе одного-единственного фундаментального взаимодействия) — высший идеал современной физики. Это главная мечта физиков. Но долгое время она оставалась лишь мечтой, и очень неопределенной.

Однако во второй половине XX в. появились предпосылки осуществления мечты и уверенность, что это дело отнюдь не отдаленного будущего. Похоже, что вскоре она вполне может стать реальностью. Решающий шаг на пути к единой теории был сделан в 1960—1970-х гг. с созданием сначала теории кварков, а затем и теории электрослабого взаимодействия. Появились основания считать, что мы стоим на пороге более могущественного и глубокого объединения, чем когда-либо ранее. Среди физиков зреет убеждение, что начинают вырисовываться контуры единой теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий — Великого объединения. А там не за горами и единая теория всех фундаментальных взаимодействий — Супергравитация.

Классификация элементарных частиц

Характеристики субатомных частиц.

В XX в., особенно в его второй половине, был открыт новый глубинный пласт структурной организации материи — мир элементарных частиц. Это название не является, однако, точным. Под элементарной частицей в точном значении понимают далее неразложимые «кирпичики» материи, из которых складывается ее структурная организация. На самом же деле большинство из открытых частиц оказались системными образованиями, состоящими из еще более элементарных частиц. Поэтому правильнее сказать, что «мир элементарных ча-

стиц — это особый уровень организации материи — субъядерная материя, из форм которой структурируются ядра и атомы вещества, физические поля. Но поскольку термин «элементарные частицы» устоялся и широко употребляется, мы будем использовать его в значении «субъядерная материя».

Изучение элементарных частиц показало, что они рождаются и уничтожаются при взаимодействии с другими элементарными частицами. Кроме того, они могут спонтанно распадаться. Все эти преобразования частиц (распад, рождение, уничтожение) реализуются через последовательные акты поглощения и испускания частиц.

Свойства элементарных частиц многообразны. Так, каждой частице соответствует своя античастица, отличающаяся от нее лишь знаком заряда. Для частиц с нулевыми значениями всех зарядов античастица совпадает с частицей (например, фотон). Каждая элементарная частица характеризуется собственным набором значений определенных физических величин. К таким величинам относятся: масса, электрический заряд, спин, время жизни частицы, магнитный момент, пространственная четность, лептонный заряд, барионный заряд и др.

Общие характеристики всех частиц: масса, время жизни, спин. Когда говорят о массе частицы, имеют в виду ее массу покоя, поскольку она не зависит от состояния движения. Частица, имеющая нулевую массу покоя, движется со скоростью света (фотон). Нет двух частиц с одинаковыми массами. Электрон — самая легкая частица с ненулевой массой покоя. Протон и нейтрон тяжелее электрона почти в 2000 раз. А самая тяжелая из полученных в ускорителях элементарных частиц (Z-бозон) обладает массой, в 200 000 раз большей массы электрона.

Важная характеристика частицы — спин — собственный момент импульса частицы. Так, протон, нейтрон и электрон имеют спин 1/2, а спин фотона равен 1. Известны частицы со спином 0,3/2,2. Частица со спином 0 при любом угле поворота выглядит одинаково. Частица со спином 1 принимает тот же вид после полного оборота на 360°. Частица со спином 1/2 приобретает прежний вид после оборота на 720° и т.д. Частица со спином 2 (гипотетический гравитон) принимает прежнее положение через пол-оборота (180°). В зависимости от спина все частицы делятся на две группы: бозоны — частицы с целыми спинами 0, 1 и 2; фермионы — частицы с полуцелыми спинами (1/2, 3/2). Частицы со спином более 2, возможно, вообще не существуют.

Частицы характеризуются и временем жизни. По этому признаку частицы делятся на стабильные и нестабильные. Стабильные частицы — это электрон, протон, фотон и нейтрино. (До конца пока не решен вопрос о стабильности протона. Возможно, он распадается за $t = 10^{31}$ лет.) Нейтрон стабилен, когда находится в ядре атома, но свободный нейтрон распадается примерно за 15 мин. Все остальные известные частицы нестабильны; время их жизни колеблется от нескольких микросекунд до 10^{-24} с. Самые нестабильные частицы резонансы. Время их жизни 10^{-22}—10^{-24} с.

Большую роль в физике элементарных частиц играют законы сохранения, устанавливающие равенство между определенными комбинациями величин, характеризующих начальное и конечное состояния системы. Арсенал законов сохранения в квантовой физике больше, чем в классической физике. Он пополнился законами сохранения различных четностей (пространственной, зарядовой), зарядов (лептонного, барионного и др.), внутренних симметрий, свойственных тому или иному типу взаимодействий. При этом чем интенсивнее взаимодействие, тем больше ему отвечает законов сохранения, т.е. тем более оно симметрично. В квантовой физике законы сохранения всегда являются законами запрета. Но если какой-то процесс разрешен законами сохранения, то он обязательно происходит реально.

Вершиной развития представлений о законах сохранения в квантовой физике является концепция спонтанного нарушения симметрии, т.е. существования устойчивых асимметричных решений для некоторых типов задач. В 1960-х гг. экспериментально было подтверждено так называемое нарушение комбинированной четкости. Иначе говоря, обнаружилось, что в микромире имеются абсолютные различия между частицами и античастицами, между «пра-

вым» и «левым», между прошлым и будущим (стрела времени, или необратимость, микропроцессов, а не только макропроцессов).

Выделение и познание характеристик отдельных субатомных частиц — важный, но только начальный этап познания их мира. На следующем этапе нужно еще понять, какова роль каждой отдельной частицы, каковы ее функции в структуре материи.

Физики выяснили, что прежде всего свойства частицы определяются ее способностью (или неспособностью) участвовать в сильном взаимодействии. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, образуют особый класс и называются адронами. Частицы, участвующие преимущественно в слабом взаимодействии и не участвующие в сильном, называются лептонами. Кроме того, существуют частицы — переносчики взаимодействий.

Рассмотрим свойства этих основных типов частиц.

Лептоны.

Лептоны ведут себя как точечные объекты, не обнаруживая внутренней структуры даже при сверхвысоких энергиях. Они, по-видимому, являются элементарными (в собственном смысле этого слова) объектами, т.е. они не состоят из каких-то других частиц. Хотя лептоны могут иметь электрический заряд, а могут и не иметь, спин у всех у них равен 1/2.

Среди лептонов наиболее известен электрон. Электрон — это первая из открытых элементарных частиц. Электрон — носитель наименьшей массы и наименьшего электрического заряда (не считая кварков) в природе.

Другой хорошо известный лептон — нейтрино. Нейтрино наряду с фотонами являются наиболее распространенными частицами во Вселенной. Вселенную можно представить безбрежным фотонно-нейтринным океаном, в котором изредка встречаются острова атомов. Но, несмотря на такую распространенность нейтрино, изучать их очень сложно. Как мы уже отмечали, нейтрино почти неуловимы, обладают огромной проникающей способностью, особенно при низких энергиях. Не участвуя ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях, они проникают через вещество, как будто его вообще нет. Нейтрино — это некие «призраки» физического мира. С одной стороны, это усложняет их детектирование, а с другой – создает возможность изучения внутреннего строения звезд, ядер галактик, квазаров и др.

Одна из интересных страниц истории изучения нейтрино связана с вопросом о его массе: имеет или не имеет нейтрино массу покоя. Теория допускает, что в отличие от фотона нейтрино может иметь небольшую массу покоя. Если нейтрино действительно обладает массой покоя (по оценкам, от 0,1 эВ до 10 эВ), то это влечет за собой фундаментальные следствия в теории Великого объединения, космологии, астрофизике. Длящаяся уже почти 60 лет «погоня» физиков за массой неуловимой частицы, похоже, подходит к концу. Есть основания предполагать, что на новых экспериментальных установках (Япония, Италия) в ближайшие годы вопрос будет решен окончательно.

Достаточно широко распространены в природе мюоны, на долю которых приходится значительная часть космического излучения. Мюон — одна из первых известных нестабильных субатомных частиц, открытая в 1936 г. Во всех отношениях мюон напоминает электрон: имеет тот же заряд и спин, участвует в тех же взаимодействиях, но имеет большую массу и нестабилен. Примерно за две миллионные доли секунды мюон распадается на электрон и два нейтрино. Проникая в вещество, мюоны взаимодействуют с ядрами и электронами атомов и образуют необычные соединения. Положительный мюон, присоединяя к себе электрон, образует систему, аналогичную атому водорода – мюоний, химические свойства которого во многом подобны свойствам водорода. А отрицательный мюон может замещать на электронной оболочке один из электронов, образуя так называемый мезоатом. В мезоатоме мюоны расположены в сотни раз ближе к ядру, чем электроны. Это позволяет использовать мезоатом для изучения формы и размеров ядра.

В конце 1970-х гг. был обнаружен третий заряженный лептон, получивший название тау-лептон. Это очень тяжелая частица. Ее масса около 3500 масс электрона, но во всем остальном он ведет себя подобно электрону и мюону.

Значительно расширился список лептонов в 1960-х гг. Было установлено, что существует несколько типов нейтрино: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино. Таким образом, общее число разновидностей нейтрино равно трем, а общее число лептонов – шести. Разумеется, у каждого лептона есть своя античастица; таким образом, общее число различных лептонов равно 12. Нейтральные лептоны участвуют только в слабом взаимодействии; заряженные – в слабом и электромагнитном.

Адроны.

Если лептонов всего 12, то адронов насчитываются сотни. Подавляющее большинство из них – резонансы, т.е. крайне нестабильные частицы. Тот факт, что адронов существует сотни, наводит на мысль, что адроны сами построены из более мелких частиц.

Все адроны встречаются в двух разновидностях – электрически заряженные и нейтральные. Наиболее известны и широко распространены такие адроны, как нейтрон и протон. Остальные адроны быстро распадаются. Адроны подразделяются на два класса. Это – класс барионов (тяжелые частицы) (протон, нейтрон, гипероны и барионные резонансы) и большое семейство более легких мезонов (мюоны, бозонные резонансы и др.).

Существование и свойства большинства известных адронов были установлены в опытах на ускорителях. Открытие множества разнообразных адронов в 1950-1960-х гг. крайне озадачило физиков. Но со временем частицы удалось классифицировать по массе, заряду и спину. Постепенно стала выстраиваться более или менее четкая картина. Появились конкретные идеи о том, как систематизировать хаос эмпирических данных, раскрыть тайну адронов в целостной научной теории. Решающий шаг был сделан в 1963 г., когда была предложена кварковая модель адронов.

Частицы — переносчики взаимодействий.

Перечень известных частиц не исчерпывается лептонами и адронами, образующими строительный материал вещества. Есть еще один тип частиц, которые не являются строительным материалом материи, а непосредственно обеспечивают фундаментальные взаимодействия, т.е. образуют своего рода «клей», не позволяющий материи распадаться на части.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия выступает фотон. Теория электромагнитного взаимодействия представлена квантовой электродинамикой.

Глюоны (их всего восемь) — переносчики сильного взаимодействия между кварками. Последние благодаря глюонам связываются парами или тройками.

Переносчиками слабого взаимодействия являются три частицы — W± и Z° -бозоны. Они были открыты лишь в 1983 г. Радиус слабого взаимодействия чрезвычайно мал, поэтому его переносчиками должны быть частицы с большими массами покоя. В соответствии с принципом неопределенности время жизни частиц с такой большой массой покоя должно быть чрезвычайно коротким — всего лишь около 10-26 с.

Высказывается мнение, что возможно существование и переносчика гравитационного поля — гравитона. Подобно фотонам, гравитоны движутся со скоростью света; следовательно, это частицы с нулевой массой покоя. Но в то время как фотон имеет спин 1, спин гравитона равен 2. Это важное различие определяет направление силы: при электромагнитном взаимодействии одноименно заряженные частицы (электроны) отталкиваются, а при гравитационном — все частицы притягиваются друг к другу.

Особенно важно то, что каждая группа этих переносчиков взаимодействий характеризуется своими специфическими законами сохранения. А каждый закон сохранения может быть представлен как проявление определенной внутренней симметрии уравнений поля (движения). Это обстоятельство используется для построения единой теории фундаментальных взаимодействий.

Классификация частиц на адроны, лептоны и переносчики взаимодействий исчерпывает мир известных нам субъядерных частиц. Каждый вид частиц играет свою роль в формировании структуры материи, Вселенной.

Теории элементарных частиц

Квантовая электродинамика.

Квантовая механика позволяет описывать движение элементарных частиц, но не их порождение или уничтожение, т.е. применяется лишь для описания систем с неизменным числом частиц. Обобщением квантовой механики является квантовая теория поля — это теория систем с бесконечным числом степеней свободы (физических полей), учитывающая требования и квантовой механики, и теории относительности. Потребность в такой теории порождается квантово-волновым дуализмом, существованием волновых свойств у всех частиц. В квантовой теории поля взаимодействие представляют, как результат обмена квантами поля, а полевые величины объявляются операторами, которые связывают с актами рождения и уничтожения квантов поля, т.е. частиц.

В середине XX в. была создана теория электромагнитного взаимодействия — квантовая электродинамика (КЭД). Это продуманная до мельчайших деталей и оснащенная совершенным математическим аппаратом теория взаимодействия электромагнитного поля и заряженных частиц, а также заряженных частиц (прежде всего, электронов или позитронов) между собой. Эта теория удовлетворяет основным принципам как квантовой теории, так и теории относительности.

В КЭД для описания электромагнитного взаимодействия использовано понятие виртуального фотона, который «видят» только заряженные частицы, претерпевающие рассеяние. Если в классическом описании электроны представляются в виде твердого точечного шарика, то в КЭД окружающее электрон электромагнитное поле рассматривается как облако виртуальных фотонов, которое неотступно следует за электроном, окружая его квантами энергии. Фотоны возникают и исчезают очень быстро, а электроны движутся в пространстве не по вполне определенным траекториям. Еще можно тем или иным способом определить начальную и конечную точки пути — до и после рассеяния, но сам путь в промежутке между началом и концом движения остается неопределенным.

Рассмотрим, например, акт испускания (виртуального) фотона электроном. После того как электрон испускает фотон, тот порождает (виртуальную) электрон-позитронную пару, которая может аннигилировать с образованием нового фотона. Последний может поглотиться исходным электроном, но может породить новую пару и т.д. Таким образом, электрон покрывается облаком виртуальных фотонов, электронов и позитронов, находящихся в состоянии динамического равновесия.

В КЭД взаимодействие электромагнитного поля и заряженной частицы предстает в виде испускания и поглощения частицей виртуальных фотонов. А взаимодействие между заряженными частицами толкуется как результат их обмена фотонами: каждая заряженная частица испускает фотоны, которые затем поглощаются другой заряженной частицей. Кроме того, КЭД рассматривает такие эффекты, которые в классической электродинамике вообще не существовали. Во-первых, это эффект рассеяния света на свете, т.е. взаимодействия фотонов между собой. С точки зрения КЭД такое рассеяние возможно благодаря взаимодействию фотонов с флуктуациями электронно-позитронного вакуума. И, во-вторых, КЭД предсказала рождение в сильных электромагнитных и гравитационных полях пар частица—античастица, среди которых может быть нуклон—антинуклон.

КЭД проверена на большом количестве очень тонких опытов. Теоретические предсказания и экспериментальные результаты проверок совпадают с высочайшей точностью — иногда до девяти знаков после запятой. Столь поразительное соответствие дает право считать КЭД наиболее совершенной из существующих естественно-научных теорий. За создание КЭД С. Томонага, Р. Фейнман и Дж. Швингер были удостоены Нобелевской премии за 1965 г. Большой вклад в становление КЭД был внесен и нашим выдающимся физиком-теоретиком Л.Д. Ландау.

После подобного триумфа КЭД была принята как модель для квантового описания трех других фундаментальных взаимодействий. (Разумеется, полям, связанным с другими взаимодействиями, должны соответствовать иные частицы-переносчики.) В настоящее время КЭД выступает как составная часть более общей теории — единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий.

Теория кварков.

Теория кварков — это теория строения адронов. Основная идея этой теории очень проста: все адроны построены из более мелких частиц — кварков. Кварки несут дробный электрический заряд, который составляет либо —1/3, либо +2/3 заряда электрона. Комбинация из двух и трех кварков может иметь суммарный заряд, равный нулю или единице. Все кварки имеют спин 1/2, следовательно, относятся к фермионам. Основоположники теории кварков Гелл-Манн и Цвейг, чтобы учесть все известные в 1960-е гг. адроны, ввели три сорта (аромата) кварков: и (от up — верхний), d (от down — нижний) и s (от strange — странный).

1 Термин «кварк» выбран совершенно произвольно. В романе Дж. Джойса «Поминки по Финнегану» герою снится сон, в котором мечущиеся над бурным морем чайки кричат резкими голосами: «Три кварка для мистера Марка!» Такой подход вполне отвечает чрезвычайно абстрактному характеру понятий современных физических теорий.

Кроме того, каждый кварк обладает аналогом электрического заряда, служащим источником глюонного поля. Его назвали цветом. Если электромагнитное поле порождается зарядом только одного сорта, то более сложное глюонное поле создается тремя различными цветовыми зарядами. Каждый кварк «окрашен» в один из трех возможных цветов, которые (совершенно произвольно) назвали красным, зеленым и синим. И соответственно, антикварки бывают антикрасные, антизеленые и антисиние.

Как и в случае с термином «кварк», термин «цвет» здесь выбран произвольно и никакого отношения к обычному цвету не имеет.

Кварки могут соединяться друг с другом одним из двух возможных способов: либо тройками, либо парами кварк — антикварк. Из трех кварков состоят сравнительно тяжелые частицы — барионы; наиболее известные барионы — нейтрон и протон. Например, протон состоит из двух u- и одного d-кварка (uud), а нейтрон — из двух d-кварков и одного u-кварка (udd). Более легкие пары кварк — антикварк образуют частицы, получившие название мезоны. Например, положительный пи-мезон состоит из u-кварка и $\bar{d}$ -кварка, а отрицательный пи-мезон состоит из $\bar{u}$- кварка и d-кварка. Чтобы это «трио» кварков не распадалось, необходима удерживающая их сила, некий «клей». А «цветовые заряды» кварков в совокупности компенсируются так, что в результате адроны оказываются «белыми» (или бесцветными).

Оказалось, что взаимодействие между нейтронами и протонами в ядре представляет собой остаточный эффект более мощного взаимодействия между самими кварками. Это объяснило, почему сильное взаимодействие кажется столь сложным и почему кварки в свободном состоянии не были обнаружены. Когда протон «прилипает» к нейтрону или другому протону, во взаимодействии участвуют шесть кварков, каждый из которых взаимодействует со всеми остальными. Значительная часть энергии тратится на прочное «склеивание» трио кварков, а небольшая — на скрепление двух трио кварков друг с другом.

То обстоятельство, что из различных комбинаций трех основных частиц можно получить все известные адроны, стало триумфом теории кварков. Но в 1970-е гг. были открыты новые адроны (пси-частицы, ипсилон-мезон и др.). Это нанесло чувствительный удар по первому варианту теории кварков, поскольку в нем не оказалось места ни для одной новой частицы. Все возможные комбинации из кварков и их антикварков были уже исчерпаны. Проблему удалось решить за счет введения трех новых ароматов. Они получили названия charm (очарование), или c; b (от beauty — красота или прелесть) и t (от top — верхний).

Итак, кварки скрепляются между собой в результате сильного взаимодействия. Переносчики последнего — глюоны (цветовые заряды). Область физики элементарных частиц, изучающая взаимодействие кварков и глюонов, носит название квантовой хромодинамики. Как квантовая электродинамика — теория электромагнитного взаимодействия, так квантовая хромодинамика — теория сильного взаимодействия.

В настоящее время большинство физиков считает кварки подлинно элементарными частицами — точечными, неделимыми и не обладающими внутренней структурой. В этом отношении они напоминают лептоны, и уже давно предполагается, что между этими двумя

различными, но сходными по своей структуре семействами должна существовать глубокая взаимосвязь.

В 1969 г. удалось получить прямые физические доказательства существования кварков в серии экспериментов по рассеянию (разогнанных до высоких энергий) электронов на протонах. Эксперимент показал, что рассеяние электронов происходило так, как если бы электроны налетали на крохотные твердые вкрапления и отскакивали от них под самыми невероятными углами. Такими твердыми вкраплениями внутри протонов являются кварки.

Правда, у некоторых физиков (коль скоро число кварков оказывается чрезмерно большим) возникает искушение предположить, что кварки состоят из еще более мелких частиц.

Таким образом, на конец XX в. наиболее вероятное число истинно элементарных частиц (не считая переносчиков фундаментальных взаимодействий) равно 48: лептонов (6 • 2) = 12 плюс кварков (б • 3) • 2 = 36. Эти 48 частиц — подлинные «кирпичики» вещества, основа материальной организации мира.

Теория электрослабого взаимодействия.

Понятия калибровочного поля и спонтанного нарушения симметрии. В 1960-е гг. в естествознании произошло выдающееся событие: два фундаментальных взаимодействия из четырех физики объединили в одно. Электромагнитное и слабое взаимодействия, казалось бы, весьма разные по своей природе, предстали как разновидности единого электрослабого взаимодействия. Картина фундаментальных взаимодействий несколько упростилась.

Теория электрослабого взаимодействия в окончательной форме была создана двумя независимо работавшими физиками — С. Вайн-бергом и А. Саламом. Составной частью этой теории является теория слабого взаимодействия, которая разрабатывалась одновременно и в тесной связи с теорией электрослабого взаимодействия.

Создание теории электрослабого взаимодействия оказало глубокое и решающее влияние на развитие физики элементарных частиц во второй половине XX в. Главная идея этой теории состояла в описании слабого взаимодействия на языке концепции калибровочного поля, ключом к которой является понятие симметрии. Здесь следует особо отметить, что одна из фундаментальных идей физики второй половины XX в. — это убеждение, что все взаимодействия существуют лишь для того, чтобы поддерживать в природе некий набор абстрактных симметрий. Но, казалось бы, какое отношение имеет симметрия к фундаментальным взаимодействиям? Ведь, на первый взгляд, утверждение о существовании подобной связи выглядит надуманным, умозрительным, искусственным. Рассмотрим этот вопрос детальнее.

Прежде всего, что понимается под симметрией? Принято считать, что предмет симметричен, если он остается неизменным после той или иной операции по его преобразованию. Иначе говоря, в самом общем смысле симметрия означает инвариантность структуры объекта относительно его преобразований. По отношению к физике это означает, что симметрия — это инвариантность физической системы (законов, ее характеризующих, и соответствующих величин) относительно некоторых определенных преобразований. (Например, законы электричества симметричны относительно замены положительных зарядов отрицательными, и наоборот; а закрытые механические системы симметричны относительно времени и т.д.)

Отсюда следует, что физическая система в своих существенных свойствах определяется набором (группой) его симметрических преобразваний. Если группе преобразований соотнести некоторое пространство, наделенное соответствующей преобразованиям симметрической структурой, то сам объект можно представить в качестве элемента такого пространства (поскольку преобразования объекта являются в таком случае преобразованиями пространства). При этом исследование симметрий объекта сводится к изучению инвариантных характеристик данного пространства.

Математическим средством анализа симметрических преобразований является теория групп. Так, для решения конкретных задач применяется следующий подход. Прежде всего, уравнением задается некоторое векторное пространство. Затем исследуется группа инвариантных преобразований такого уравнения. Каждому элементу группы может быть соотнесе-

но некоторое преобразование в векторном пространстве решений этого уравнения. Знание соотношений между элементами группы и такого рода преобразованиями позволяет во многих случаях находить решения уравнения. А значит и определять существование реальных симметрических свойств того объекта, с которым может быть соотнесено данное пространство.

Под группой в самом общем смысле в математике понимают непустое множество, на котором задана некоторая бинарная алгебраическая операция, определена элементарная единица этого множества и обратный ей элемент. (В частности, в геометрии группой называется совокупность всех ортогональных (зеркальных) преобразований, совмещающих фигуру саму с собой.) Теория групп как самостоятельная область математики оформилась на рубеже XIX— XX вв. (М.С. Ли и др.) на базе идей, сложившихся в XIX в. в теории решения алгебраических уравнений в радикалах (Н. Абель, Э. Галуа), «Эрлангенская программа» Ф. Клейна, теория чисел (К. Гаусс и др.).

В становлении релятивистской квантовой теории большую роль играло изучение симметрий уравнений теории поля. В самом общем плане такие симметрии делятся на внешние, связанные со свойствами пространства-времени, и внутренние, связанные со свойствами элементарных частиц. Примером внешней симметрии является симметрия законов квантовых объектов относительно пространственной инверсии (P), обращения времени (T) и зарядного сопряжения (C), т.е. замены частиц на соответствующую античастицу. Была доказана важная «теорема CPT», согласно которой уравнения квантовой теории поля не меняют своего вида, если одновременно провести следующие преобразования: заменить частицу на античастицу, осуществить пространственную инверсию (заменить координату частицы r на —r), обратить время (заменить t на —t). Обнаружение в экспериментах отдельных нарушений этой теоремы для слабых взаимодействий является предпосылкой для представления о возможности вообще спонтанного нарушения симметрий в микромире.

Но, кроме внешних, существуют еще и внутренние симметрии, связанные со свойствами самих частиц, а не со свойствами пространства-времени. Как мы уже отмечали, каждая группа частиц характеризуется прежде всего своими специфическими законами сохранения. А каждый из законов сохранения рассматривается как проявление определенной внутренней симметрии уравнений поля. Подключая те или иные внутренние симметрии, можно как бы осуществлять переход от описания характеристик одной частицы к описанию характеристик другой. Так, «отключив» в уравнениях поля законы сохранения, присущие электромагнитному и слабому взаимодействиям, мы приходим к полному отождествлению протона и нейрона, они становятся неотличимыми друг от друга.

Среди внутренних симметрий уравнений поля, соответствующих законам сохранения, особую роль играют калибровочные симметрии. Несколько слов о калибровочных симметриях вообще. Система обладает калибровочной симметрией, если ее существенные свойства остаются неизменными при изменении уровня, масштаба или значения некоторой физической величины. Например, в физике работа зависит от разности высот, а не от абсолютной высоты; напряжение — от разности потенциалов, а не от их абсолютных величин и др.

Калибровочные преобразования симметрий могут быть глобальными и локальными. Глобальные преобразования изменяют систему в целом, во всем ее пространственно-временном объеме. В квантовой физике это выражается в том, что во всех точках пространства-времени значения волновой функции подвергаются одному и тому же изменению. Локальными калибровочными преобразованиями называются преобразования, которые изменяются от точки к точке. В таком случае волновая функция в каждой точке характеризуется своей особой фазой, которой соответствует определенная частица.

Анализ показал, что в квантовой теории поля глобальное калибровочное преобразование можно превратить в локальное. В этом случае в уравнениях движения с необходимостью появляется слагаемое, учитывающее взаимодействие частиц. Это значит, что для связи и поддержания симметрии в каждой точке пространства необходимы новые силовые поля — калибровочные. Другими словами, калибровочная симметрия предполагает существование

векторных калибровочных полей, квантами которых частицы обмениваются, реализуя данное взаимодействие. Так, силовые поля можно рассматривать как средство, с помощью которого в природе создаются присущие ей локальные калибровочные симметрии. Значение концепции калибровочной симметрии заключается в том, что на ее основе теоретически моделируются все четыре фундаментальных взаимодействия, рассматриваемые как калибровочные поля.

Простейшей калибровочной симметрией обладает электромагнетизм. Иначе говоря, электромагнитное поле — не просто определенный тип силового поля, существующего в природе, а проявление простейшей (совместимой с принципами специальной теории относительности) калибровочной симметрии, в которой калибровочные преобразования соответствуют изменениям потенциала от точки к точке.

Учение об электромагнетизме складывалось столетиями на основе кропотливых эмпирических исследований, но оказывается, что результаты этих исследований можно вывести чисто теоретически, основываясь на знании лишь двух симметрий — простейшей локальной калибровочной симметрии и так называемой симметрии Лоренца — Пуанкаре специальной теории относительности. Основываясь только на существовании этих двух симметрий, не проведя ни единого эксперимента по электричеству и магнетизму, можно построить уравнения Максвелла, вывести все законы электромагнетизма, доказать существование радиоволн, возможность создания динамо-машины и т.д.

Для представления поля слабого взаимодействия как калибровочного прежде всего необходимо было установить точную форму соответствующей калибровочной симметрии. Дело в том, что симметрия слабого взаимодействия гораздо сложнее, чем электромагнитного, поскольку само слабое взаимодействие является более сложным. Это иллюстрируется рядом обстоятельств. Так, в слабом взаимодействии нередко участвуют частицы по крайней мере четырех различных типов (при распаде нейтрона, например, нейтрон, протон, электрон и нейтрино). Кроме того, действие слабых сил приводит к изменению их природы (превращению одних частиц в другие за счет слабого взаимодействия). Напротив, электромагнитное взаимодействие не изменяет природы участвующих в нем частиц.

Выяснилось, что для поддержания симметрии слабого взаимодействия необходимы три новых силовых поля в отличие от единственного электромагнитного поля. Значит, должны существовать три новых типа частиц — переносчиков взаимодействия, по одному для каждого поля. Они называются тяжелыми векторными бозонами со спином 1 и являются переносчиками слабого взаимодействия. Частицы W+ и W- являются переносчиками двух из трех связанных со слабым взаимодействием полей. Третье поле соответствует электрически нейтральной частице-переносчику, получившей название Z° -частицы. Существование Z° -частицы означает, что слабое взаимодействие может не сопровождаться переносом электрического заряда.

В создании теории электрослабого взаимодействия ключевую роль сыграло понятие спонтанного нарушения симметрии. Некоторые физические системы, обладающие определенной симметрией, могут лишаться ее в тех случаях, когда симметрическое состояние энергетически невыгодно (оно не обладает минимумом энергии), а энергетически выгодное состояние не обладает исходной симметрией и неоднозначно. Эта неоднозначность математически выражается в том, что уравнение движения данной физической системы представлено не одним решением, а серией решений, не обладающих исходной симметрией. В конце концов из этой серии решений реализуется какое-либо одно. Ведь не всякое решение задачи обязано обладать всеми свойствами его исходного уровня. И потому частицы, совершенно разные при низких энергиях, при высоких энергиях могут оказаться на самом деле одной и той же частицей, но находящейся в разных состояниях. Таким образом идея спонтанного нарушения симметрии Вайнберга и Салама объединила электромагнетизм и слабое взаимодействие в единую теорию калибровочного поля.

В теории Вайнберга — Салама представлено всего четыре поля: электромагнитное и три поля, соответствующие слабым взаимодействиям. В этой теории фотоны и тяжелые век-

торные бозоны (W± и Z°) имеют общее происхождение и тесно связаны друг с другом. Кроме того, было введено постоянное на всем пространстве скалярное поле (так называемое поле Хиггса), с которым фотоны и векторньге бозоны взаимодействуют по-разному, что и определяет различие их масс. Кванты скалярного поля представляют собой массивные элементарные частицы с нулевым спином. Их называют хиггсовскими (по имени физика П. Хиггса, предположившего их существование). Число таких хиггсовских бозонов может достигать нескольких десятков.

Недавно было сообщено об экспериментальном обнаружении хиггсовских бозонов. В настоящее время результаты этого эксперимента проверяются.

Почему же электромагнитное и слабое взаимодействия обладают столь непохожими свойствами? Теория Вайнберга — Салама объясняет эти различия нарушением симметрии. Если бы симметрия не нарушалась, то оба взаимодействия были бы сравнимы по величине. Первоначально W- и Z-кванты не имеют массы, но из-за нарушения симметрии некоторые частицы Хиггса сливаются с W- и Z-частицами, наделяя их массой. А фотон не участвует в этом процессе слияния с частицами Хиггса и потому не обладает массой покоя. Нарушение симметрии влечет за собой резкое уменьшение слабого взаимодействия, поскольку оно непосредственно связано с массами W- и Z-частиц. Можно сказать, что слабс взаимодействие столь мало потому, что W- и Z -частицы очень массивны.

Лептоны редко сближаются на столь малые расстояния ($r = 10^{-18}$ м), на которых становится возможным обмен тяжелыми векторными бозонами. Но при больших энергиях (более 100 ГэВ), когда частицы W и Z могут свободно рождаться, обмен W- и Z-бозонами осуществляется столь же легко, как и обмен фотонами (безмассовыми частицами), разница между фотонами и бозонами стирается. В этих условиях должна существовать полная симметрия между электромагнитным и слабым взаимодействием — электрослабое взаимодействие.

Наиболее убедительная экспериментальная проверка новой теории заключалась в подтверждении существования гипотетических W- и Z-частиц. Их открытие в 1983 г. стало возможным только с созданием очень мощных ускорителей новейшего типа и означало торжество теории Вайнберга — Салама. Было окончательно доказано, что электромагнитное и слабое взаимодействия являются двумя компонентами единого электрослабого взаимодействия.

В 1979 г. С. Вайнбергу, А. Саламу и Ш. Глэшоу была присуждена Нобелевская премия за создание теории электрослабого взаимодействия.

Квантовая хромодинамика.

Следующий шаг на пути познания фундаментальных взаимодействий — создание теории сильного взаимодействия. Для этого необходимо придать черты калибровочного поля сильному взаимодействию. Последнее можно представлять, как результат обмена глюонами, который обеспечивает связь кварков (попарно или тройками) в адроны. Обмен глюонами изменяет «цвет» кварков, но оставляет неизменными остальные характеристики, т.е. сохраняет их сорт («аромат»).

Теория сильного взаимодействия создавалась по той же схеме, что и теория слабого взаимодействия. Требование локальной калибровочной симметрии (т.е. инвариантности относительно изменений «цвета» в каждой точке пространства) приводит к необходимости введения компенсирующих силовых полей. Всего требуется восемь новых компенсирующих силовых полей. Частицами-переносчиками этих полей являются глюоны. Таким образом, из теории следует, что должно быть целых восемь различных типов глюонов.

Как и фотоны, глюоны имеют нулевую массу покоя и спин 1. Глюоны также имеют различные цвета, но не чистые, а смешанные; глюоны состоят из «цвета» и «антицвета» (например, сине-антизеленый). Поэтому испускание или поглощение глюона сопровождается изменением цвета кварка («игра цветов»). Например, красный кварк, теряя красно-антисиний глюон, превращается в синий кварк, а зеленый кварк, поглощая сине-антизеленый глюон, превращается в синий кварк.

С точки зрения квантовой хромодинамики (квантовой теории цвета) сильное взаимодействие есть не что иное, как стремление поддерживать определенную абстрактную симметрию природы: сохранение белого цвета всех адронов при изменении цвета их составных частей — кварков. В протоне, например, три кварка постоянно обмениваются глюонами, изменяя свой цвет. Однако такие изменения носят не произвольный характер, а подчиняются жесткому правилу: в любой момент времени «суммарный» цвет трех кварков должен представлять собой белый свет, т.е. сумму «красный + зеленый + синий». Это распространяется и на мезоны, состоящие из пары кварк — антикварк. Поскольку антикварк характеризуется антицветом, такая комбинация заведомо бесцветна («белая»), например, красный кварк в комбинации с антикрасным кварком образует бесцветный («белый») мезон.

Лептоны, фотоны и промежуточные бозоны (W- и Z-частицы) не несут цвета, а поэтому не участвуют в сильном взаимодействии).

Квантовая хромодинамика великолепно объясняет правила, которым подчиняются все комбинации кварков, взаимодействие глюонов между собой (глюон может распадаться на два глюона или два глюона слиться в один — поэтому и появляются нелинейные члены в уравнении глюонного поля), взаимодействие кварков и глюонов по типу КЭД (кварки покрыты облаками виртуальных глюонов и кварк-антикварковых пар), сложную структуру адрона, состоящего из «одетых» в облака кварков, и др.

Возможно, пока преждевременно оценивать квантовую хромодинамику как окончательную и завершенную теорию сильног взаимодействия, но экспериментальный статус ее достаточно прочен и достижения многообещающи.

На пути к Великому объединению.

С созданием квантовой хромодинамики появилась надежда на построение единой теории всех (или хотя бы трех из четырех) фундаментальных взаимодействий. Модели, единым образом описывающие три (сильное, слабое, электромагнитное) из четырех фундаментальных взаимодействий, называются моделями Великого объединения.

Опыт успешного объединения слабого и электромагнитного взаимодействий на основе идеи калибровочных полей подсказал возможные пути дальнейшего развития принципа единства физики, объединения фундаментальных физических взаимодействий. Один из них основан на том удивительном факте, что константы взаимодействия электрослабого и сильного взаимодействий при переходе к малым расстояниям (т.е. к высоким энергиям) становятся равными друг другу при одной и той же энергии. Эту энергию называли энергией объединения. Она равна примерно 10^{14}—10^{16} ГэВ; ей соответствует расстояние =10-29 см.

При энергии более 10^{14}—10^{16} ГэВ, или на расстояниях менее 10^{-29} см, сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия описываются единой константой, т.е. имеют общую природу. Кварки и лептоны здесь практически не различимы, а глюоны, фотоны и векторные бозоны W± и Z° являются квантами калибровочных полей с единой калибровочной симметрией. Ведь если электрослабое и сильное взаимодействия в действительности представляют собой лишь две стороны Великого единого взаимодействия, то последнему также должно соответствовать калибровочное поле с некоторой сложной симметрией. Она должна быть достаточно общей, способной охватить все калибровочные симметрии, содержащиеся и в квантовой хромодинамике, и в теории электрослабого взаимодействия. В то же время ее спонтанное нарушение должно приводить к разделению электрослабого и сильного взаимодействия. Отыскание такой симметрии — главная задача на пути создания единой теории электрослабого и сильного взаимодействия.

Существуют разные подходы, порождающие конкурирующие варианты теорий Великого объединения. Тем не менее все эти гипотетические варианты Великого объединения имеют ряд общих особенностей. Во-первых, во всех гипотезах кварки и лептоны — носители электрослабого и сильного взаимодействий — включаются в единую теоретическую схему. До сих пор они рассматривались как совершенно различные объекты. Во-вторых, привлечение абстрактных калибровочных симметрии приводит к открытию новых типов полей, обладающих новыми свойствами, например, способностью превращать кварки в лептоны.

В простейшем варианте теории Великого объединения для превращения кварков в лептоны требуется 24 поля, причем 12 из квантов этих полей уже известны: фотон, две W-частицы, Z°-частица и восемь глюонов. Остальные 12 квантов — новые сверхтяжелые промежуточные бозоны, объединенные общим названием X- и Y-частицы (обладающие цветом и электрическим зарядом). Эти кванты соответствуют полям, поддерживающим более широкую калибровочную симметрию и перемешивающим кварки с лептонами. Следовательно, X- и Y-частицы могут превращать кварки в лептоны (и наоборот).

О прямом экспериментальном обнаружении X- и Y-бозонов речь пока не идет. Ведь теории Великого объединения имеют дело с энергией частиц выше 10^{14} ГэВ. Это очень высокая энергия. Трудно сказать, когда удастся получить частицы столь высоких энергий в ускорителях. В обозримом будущем такая возможность не предусматривается. Современные ускорители с трудом достигают энергии 100 ГэВ. И потому основной сферой проверки теорий Великого объединения являются ее следствия (для космологии и для низкоэнергетических областей). Так, без теорий Великого объединения невозможно описать раннюю стадию эволюции Вселенной, когда температура первичной плазмы достигала 10^{27}К. Именно в таких условиях могли рождаться и аннигилировать сверхтяжелые бозоны X и Y.

Кроме того, на основе теорий Великого объединения предсказаны две важные закономерности в низкоэнергетических областях, которые могут быть проверены экспериментально. Во-первых, кварк-лептонные переходы должны вызывать распады протона. Это означает его нестабильность: время жизни протона должно составлять примерно 10^{31} лет. Во-вторых, неизбежным следствием этих теорий является существование магнитного монополя — стабильной и очень тяжелой (10^8 массы протона) частицы, несущей в себе один магнитный полюс. Экспериментальное обнаружение распада протона и магнитных монополей могло бы стать веским доводом в пользу теорий Великого объединения. На проверку этих предсказаний направлены усилия экспериментаторов. Обнаружение распада протона будет самым великим физическим экспериментом XXI в.! Но пока еще твердо установленных данных на этот счет нет.

Супергравитация.

Но объединение трех из четырех фундаментальных взаимодействий — это еще не единая теория в полном смысле слова. Ведь остается еще гравитация. Теоретические схемы, в рамках которых объединяются все известные типы взаимодействий (сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное), называются моделями супергравитации. Теоретические модели, в которых объединяются все четыре взаимодействия (супергравитация) базируются на идее суперсимметрии, т.е. такого перехода от глобальной калибровочной симметрии к локальной, который бы позволил переходить от фермионов (носителей субстрата материи) к бозонам (носителям структуры материи, переносчикам взаимодействий), и наоборот.

Поэтому супергравитация — это теория не только переносчиков всех фундаментальных взаимодействий, но и частиц, из которых состоит вещество (кварков и лептонов). В супергравитации все они объединяются в единой теории материи (вещества и поля). Одна из теоретических моделей сводит воедино 70 частиц со спином 0; 56 частиц со спином 1/2; 28 частиц со спином 1; 8 частиц по спином 3/2 (их назвали гравитино) и 1 частица со спином 2 (гравитон). Все эти частицы образовались в первые мгновения нашей Вселенной.

Супергравитация — это кульминация теоретической физики, та самая общая и абстрактная теория, которая венчает собой длительный и напряженный, а часто и драматический поиск единства физики. На уровне суперсимметрии появляется необходимость обоснования абстрактных симметрий калибровочных полей. Иначе говоря, вновь возникает необходимость обоснования физики геометрией, в частности, представления калибровочных полей как геометрических симметрий, связанных с дополнительными измерениями пространства. Это привело к возрождению идей многомерности нашего мира.

Появляются модели суперсимметрии, в которых наш мир рассматривается как 11-мерное (или 10-мерное, или даже 26-мерное) пространство-время. Из 11 измерений только четыре проявляются в нашем мире, а остальные 7 остались скрученными, замкнутыми. Эти

«скрытые измерения» существуют в масштабе $r = 10^{-33}$ см. Для проникновения в такие масштабы необходима энергия, сравнимая со всей энергией нашей Галактики! Разумеется, проекты проникновения в такие мельчайшие области нашего мира в обозримом будущем для человечества нереальны. (Возможно, они нереальны и в принципе.)

Несомненным достоинством и свидетельством перспективности программы супергравитации является то, что под ее влиянием сложился новый подход к объединению фундаментальных взаимодействий — теория суперструн. В этой теории частица рассматривается как струна — колебательная система с распределенными параметрами. При низких энергиях струна ведет себя как частица, а при высоких — в описания движения струны нужно вводить параметры, характеризующие ее вибрацию. Математическая сторона теории суперструн оказывается проще, чем в стандартной теории: исчезают нежелательные бесконечности. Одно из важных космологических следствий теории суперструн — возможность множественности вселенных, в каждой из которых существует свой набор фундаментальных взаимодействий.

Итак, подведем некоторые итоги. Объединение фундаментальных взаимодействий по существу началось еще в XIX в. с синтеза электричества и магнетизма в теории электромагнитного поля Максвелла. Попытки синтеза гравитации и электромагнетизма, предпринятые А. Эйнштейном в «единой теории поля», не удались. Зато теоретическое объединение слабого и электромагнитного взаимодействий получило надежное подтверждение в 1983 г. благодаря экспериментальному обнаружению W- и Z-бозонов. Твердо обоснованных данных, подтверждающих Великое объединение (распад протона, существование магнитного монополя), пока нет, но их ожидают. Программа супергравитации — яркий пример того, как теория может значительно опередить практику, опыт, возможности эксперимента. Но и здесь можно ожидать косвенных эмпирических обоснований моделей супергравитации данными внегалактической астрономии, астрофизики и космологии. Таким образом, физика стоит на пороге создания единой теории материи, т.е. всех фундаментальных взаимодействий (поля) и структуры вещества. Возможно, что уже в первой половине XXI в. эта величайшая задача всей истории науки будет решена. В определенном смысле это означает конец физической науки как познания фундаментальных оснований материи.

Правда, на этом пути предстоит решить еще много серьезных задач. Так, надо убедиться в существовании ряда элементарных частиц, которые предсказываются современной теорией (прежде всего, бозонов Хиггса). Кроме того, должна быть создана квантовая теория гравитации, без которой реализация программы суперсимметрии невозможна. Только с созданием квантовой теории гравитации, по-видимому, можно будет ответить на следующие вопросы: почему наше пространство трехмерно, а время одномерно? почему существует только четыре фундаментальных взаимодействия, и именно те, которые мы имеем? почему нам дан именно такой набор элементарных частиц? чем определяется масса элементарных частиц? почему мировые константы имеют именно такие, а не иные значения? почему в природе существует элементарный электрический заряд и от чего зависит его величина? почему столь мала масса нейтрино? и др.

Многое в решении этих задач будет зависеть от возможностей эксперимента в области физики элементарных частиц. Нынешние ускорители (коллайдеры), в которых сталкиваются разгоняющиеся навстречу друг другу сгустки элементарных частиц (электроны, протоны и др.), обеспечивают энергию сталкивающихся частиц около 200 ГэВ. Обсуждаются проекты ускорителей, повышающих эту энергию на 2—3 порядка. Но технические возможности здесь не беспредельны. Повышение энергии требует создания сильных энергетических полей. А этому есть свой предел, ведь очень сильные поля будут разрушать атомы любого вещества; это значит, что в таком поле ускоритель сам себя будет разрушать! Сейчас обсуждаются проекты создания ускорителей, использующих нанотехнологии, которые позволяют быстро регенерировать разрушенные сильным электромагнитным полем ячейки материала. Выполнение такой программы, если это вообще реально, — дело очень далекого будущего. Правда, остается возможность изучать космические лучи (потоки нейтрино, гравитоны и др.) с высокой энергией. Для этого нужно научиться их уверенно регистрировать. Однако не исключе-

ны и другие варианты развития физики XXI в. Наука всегда должна быть готова к революционным поворотам. И потому, например, открытие новых фундаментальных взаимодействий, субкварковых частиц и др. может потребовать кардинального пересмотра современной (релятивистской и квантовой) физики, поставить на повестку дня вопрос о создании принципиально «новой физики». Много необычного и неожиданного несет для познания физического мира та область, где Микромир оказывается связанным с Мегамиром, ультрамалое с ультрабольшим, элементарная частица со Вселенной в целом, физика с астрономией.

Задачи

Пример №13 Найти длину волны де Бройля для электрона, кинетическая энергия которого равна:1) 10 кэВ, 2) 1 МэВ.

Дано:

$$W_1 = 10\ \text{кэВ} = 10 \cdot 10^3 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж} = 1{,}6 \cdot 10^{-15}\ \text{Дж}$$

$$W_2 = 1\ \text{Мэв} = 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж} = 1{,}6 \cdot 10^{-13}\ \text{Дж}$$

$$m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{кг}$$

Найти: $\lambda_1,\ \lambda_2$

Решение: Длина волны де Бройля связана с импульсом:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

где $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка;

p - импульс частицы.

Импульс частицы зависит от ее скорости. Если скорость движения частицы много меньше скорости света в вакууме (v<<c), то это случай нерелятивистский. Если скорость движения частицы соизмерима со скоростью света в вакууме, то это случай релятивистский. Импульс частицы связан с энергией. Поэтому, чтобы выяснить, какой это случай, вычислим энергию покоя частицы и сравним ее с энергией движущейся частицы. Вычислим энергию покоя электрона:

$$E_0 = mc^2 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}(3 \cdot 10^8)^2 = 8{,}16 \cdot 10^{-14}\ \text{Дж}$$

Сравним кинетическую энергию электрона с энергией покоя E_0. В первом случае $W_1 << E_0$, значит это случай нерелятивистский и импульс равен: p = mv. Импульс связан с кинетической энергией соотношением:

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$$

Отсюда: $p = \sqrt{2mW}$

Тогда:

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2mW_1}} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-15}}} = 1{,}22 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Во втором случае $W_2 > E_0$, значит это случай релятивистский. Импульс равен: $p = \frac{1}{c}\sqrt{W(W + 2E_0)}$, где с - скорость света. Тогда:

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\sqrt{W_2(W_2 + 2E_0)}} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{\sqrt{1{,}6 \cdot 10^{-13}(1{,}6 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 8{,}16 \cdot 10^{-14})}} = 8{,}7 \cdot 10^{-13} \text{ м}$$

Ответ: $\lambda_1 = 1{,}22 \cdot 10^{-10}$ м, $\lambda_2 = 8{,}7 \cdot 10^{-13}$ м

Пример №14. Каков импульс фотона с энергией $6 \cdot 10^{-19}$ Дж?

Дано: $E=6 \cdot 10^{-19}$ Дж,

Найти: p−?

Решение: Запишем формулу длины волны де Бройля: $\lambda=hp$

Откуда найдем импульс фотона: $p=h\lambda$

Согласно формуле Планка, энергия фотона E пропорциональна частоте колебаний ν и определяется следующим образом: $E=h\nu$

В этой формуле h — это постоянная Планка, равная 6,62·10-34 Дж·с.

Известно, что частоту колебаний ν можно выразить через скорость света с, которая равна $3 \cdot 10^{8}$ м/с, и длину волны λ по следующей формуле: $\nu=c\lambda$

Это выражение подставим в формулу: $E=hc\lambda$

Откуда длина волны λ равна: $\lambda=hcE$

Полученное выражение подставим в формулу: $p=hEhc$

Окончательно получим: $p=Ec$

Посчитаем численный ответ задачи: $p=6 \cdot 10^{-19} 3 \cdot 10^{8}=2 \cdot 10^{-27}$кг·м/с

Ответ: 2·10кг·м/с.

Вопросы:

1. Назовите источники различных видов излучений.
2. Почему в горах легко получить солнечные ожоги?
3. Почему облачные дни теплее солнечных?
4. Почему в тени дерева прохладно?
5. От чего зависят свойства электромагнитных волн?
6. Какое свойство доказывает волновую природу рентгеновского излучения?

РАЗДЕЛ 6. ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Пришло время поговорить о более масштабных образованиях — галактиках. На осеннем ночном небе в ясную безлунную ночь с запада на восток через зенит тянется хорошо заметная светящаяся полоса. Древние греки назвали её Галактикой, что в переводе означает — «млечный» или «молочный». Сейчас же эту полосу мы называем Млечным путём.

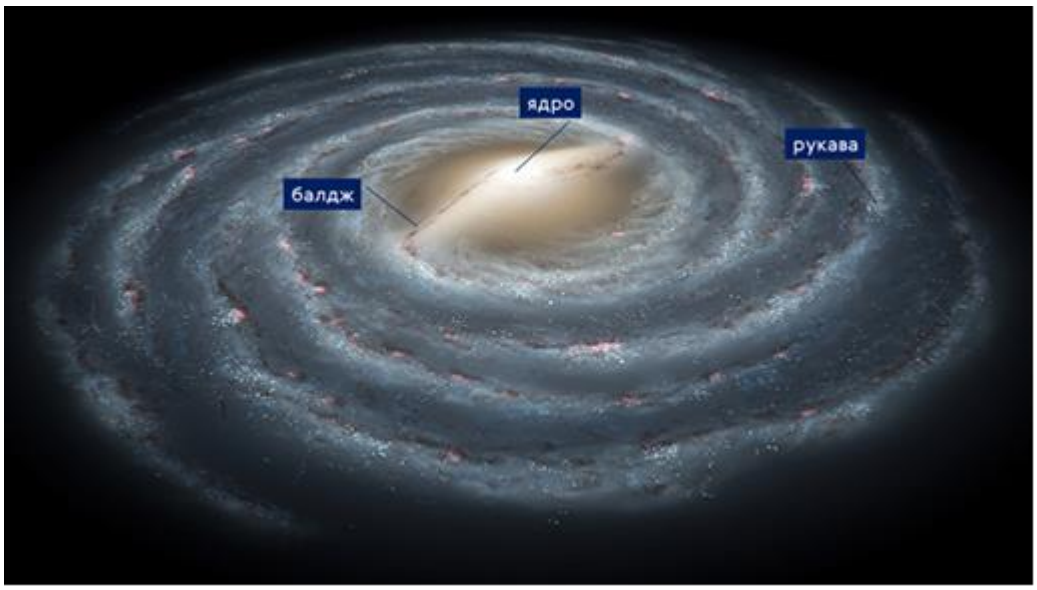
Ещё Галилео Галилей в 1609 году обнаружил, что Млечный Путь состоит из огромного числа слабых звёзд. Он проходит через оба полушария по большому кругу небесной сферы.

Таким образом, Галактика — это гравитационно-связанная система, состоящая из сотен миллиардов звёзд и межзвёздной среды.

По некоторым оценкам число звёзд в Галактике составляет порядка 10^{12}. Светлая полоса, тянущаяся через всё небо и называемая нами Млечным Путём, — это основная часть Галактики, в которой сосредоточено основное число звёзд. Диаметр Галактики составляет около 30, а толщина около 4 килопарсек (или соответственно около 100 000 и 12 000 световых лет).

Уточним, что в астрономии под **световым годом понимается расстояние, которое проходит свет в течение года.**

А **парсеком называется расстояние, с которого радиус земной орбиты был бы виден под углом в одну угловую секунду.** Иными словами, один парсек — это расстояние, примерно равное 206265 средним расстояниям от Земли до Солнца или 3,26 светового года.



Звёздный диск Галактики имеет структуру в виде спиральных ветвей (рукавов). Шарообразное утолщение в середине диска получило название **балдж** (от английского слова «вздутие»).

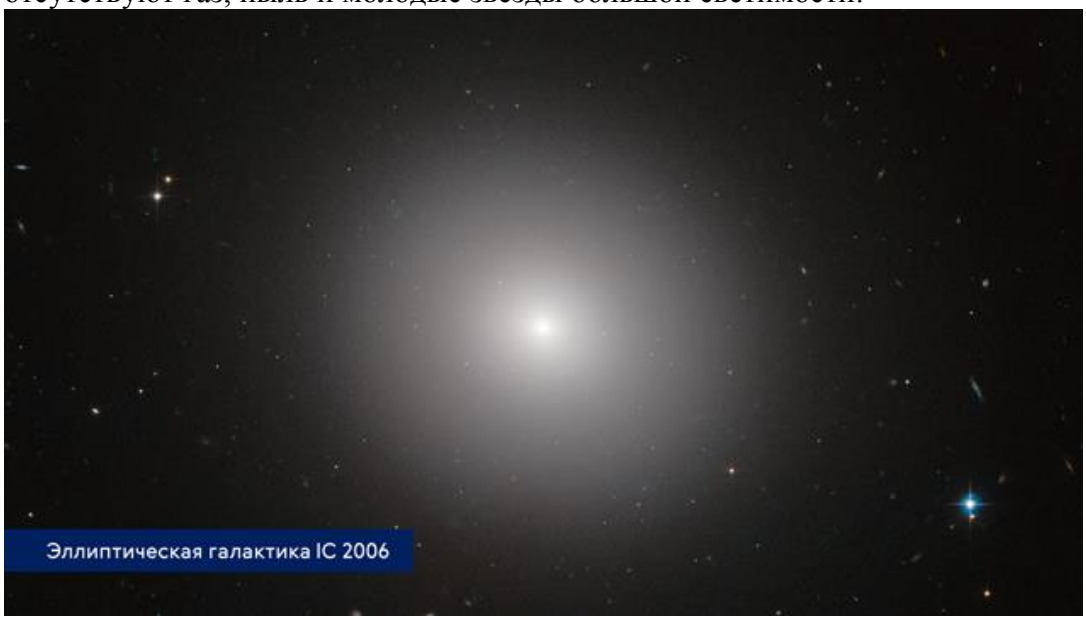
Наиболее плотная и компактная центральная часть Галактики, расположенная в созвездии Стрельца, называется **ядром**. По некоторым оценкам, его масса составляет несколько десятков миллионов масс Солнца. Также исследования процессов, происходящих в центральной области Галактики, дают основания предполагать, что в ядре располагается сверхмассивная чёрная дыра. Часть звёзд нашей Галактики не входит в состав диска, а образует сферическую составляющую — звёздное гало, радиус которого не менее 20 килопарсек. Гало окружает очень разряженная и большая по размерам (порядка 50—60 килопарсек) внешняя часть Галактики — корона. Масса всей Галактики в пределах объёма радиусом 15 килопарсек, оценивается примерно 200 миллиардов масс Солнца. А с учётом остальной части — в триллион масс.

В 1924 году с помощью крупнейшего телескопа того времени известный американский астроном Эдвин Хаббл заметил, что туманность Андромеды — это не сплошное туманное пятно, как считали ранее, а огромное количество звёзд. Дальнейшее изучение известных туманностей показало, что все они также являются гигантскими удалёнными системами, в которых находится миллионы и миллиарды звёзд. Такие **гигантские гравитационно-связанные си-**

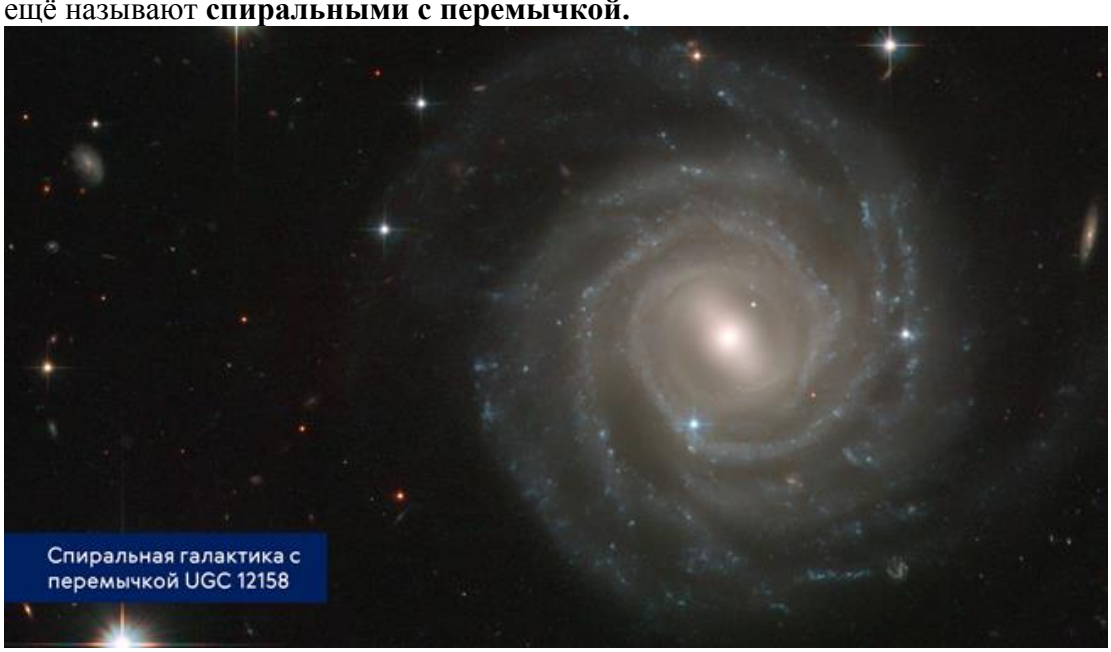
стемы звёзд и межзвёздного вещества, расположенные вне нашей Галактики, стали называть галактиками.

Также Хабблом было замечено, что галактики могут отличаться друг от друга по своему внешнему виду и структуре. В связи с этим им было предложено классифицировать галактики по их форме. В современной классификации принято различать четыре основных типа галактик: эллиптические (E), спиральные (S), неправильные (Ir) и линзовидные (SO).

Эллиптические галактики в проекции на небесную сферу выглядят как круги или эллипсы. Они вращаются очень медленно, а количество звёзд в них плавно убывает от центра к краю. Основную часть таких галактик составляют жёлтые и красные звёзды. В них практически отсутствуют газ, пыль и молодые звёзды большой светимости.

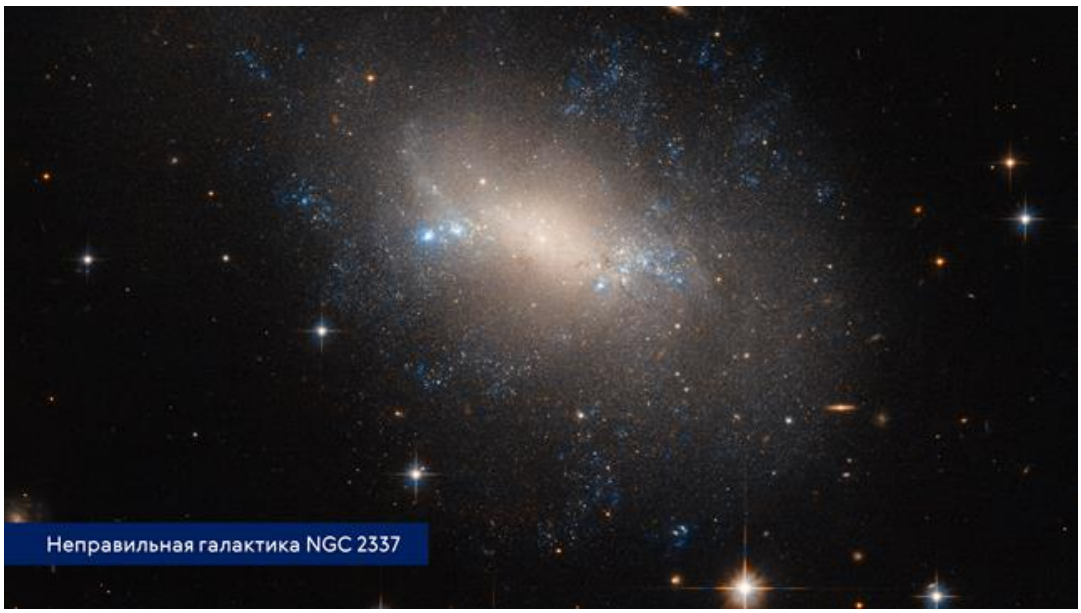


Около половины изученных галактик, относится к галактикам **спирального типа** — это сильно сплюснутые системы с центральным уплотнением и заметной спиральной структурой.
Почти у половины известных спиральных галактиках имеется почти прямая звёздная перемычка — бар, от которой происходит закручивание спиральных рукавов. Такие галактики ещё называют **спиральными с перемычкой.**



В рукавах спиральных галактик располагаются самые яркие и молодые звёзды, яркие туманности и звёздные комплексы. Именно поэтому спиральный узор хорошо виден даже у сильно удалённых галактик. Как вы понимаете, наша Галактика, является спиральной. Ближайшая звёздная система, похожая по структуре и типу на нашу, — это туманность Андромеды, свет от которой идёт к нам примерно два миллиона лет.

К **неправильным галактикам** относят маломассивные галактики неправильной структуры. У них не видно чётко выраженного ядра и вращательной симметрии. Видимая яркость таких галактик обусловлена молодыми звёздами большой светимости и областями ионизированного водорода. Самыми близкими к нам неправильными галактиками являются Магела́новы облака (Большое и Малое). Обратите внимание, что на небе выглядят они, как два туманных облака серебристо-голубого цвета.



Последний тип галактик — **линзовидные** — внешне очень похожи на эллиптические, однако у них сплюснутый звёздный диск. Так же у таких галактик отсутствует плоская составляющая и спиральные ветви.

Совокупность наблюдаемых галактик всех типов и их скоплений, а также межгалактической среды, образует Вселенную.

Самым главным свойством Вселенной является её постоянное расширение. Впервые гипотезу о расширении Вселенной выдвинул Альберт Эйнштейн, однако строгих расчётов им предложено не было.

В 1920 году русский учёный Александр Александрович Фридман занялся анализом десяти сложнейших уравнений теории относительности и пришёл к фундаментальному выводу: ни при каких условиях их решение не может быть единственным. Это означало, что невозможно точно ответить на вопрос о том, какой формой обладает Вселенная, каков её радиус кривизны и вообще, стационарна она или нет.

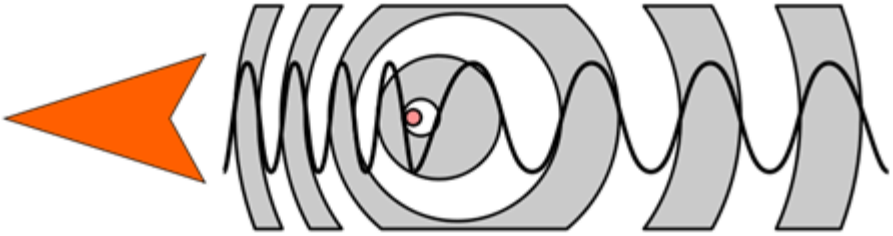
Но тем не менее Фридманом было получено три возможные модели нестационарной Вселенной: две из них описывали монотонно расширяющуюся Вселенную. А третья модель

предполагала периодичность Вселенной, то есть радиус кривизны её пространства сначала возрастает от нуля до некоторого значения, а затем вновь уменьшается до нуля. Всё это говорило о том, что Вселенная не может находится в стационарном состоянии, она должна расширяться и сжиматься под действием гравитационных сил.

Подтвердить теорию Фридмана о нестационарности Вселенной удалось спустя 7 лет Эдвину Хабблу. Наблюдая за спектрами галактик с помощью мощного телескопа, он обнаружил, что их спектральные линии смещены в длинноволновую область, то есть в сторону красных линий.

Поясним, что это значит. В 1842 году австрийский физик Кристиан Доплер исследуя звуковые волны обнаружил у них интересную особенность. Объясним её на простом примере, с которым вы, наверняка, встречались в своей жизни. Итак, представьте, что вы находитесь на переходе и ждёте, пока проедут машины, чтобы перейти дорогу. Вдруг где-то вдалеке вы слышите звук сирены скорой помощи. Вам переходить нельзя, и вы ждёте пока скорая проедет. Так вот, по мере приближения машины скорой помощи частота звуковых волн, издаваемых сиреной, будет увеличиваться, и вы будите слышать более высокий тон. Это происходит из-за того, что за время испускания одного пика волны от сирены до следующего, скорая проедет некоторое расстояние в вашу сторону. Из-за этого источник каждого следующего пика волны будет ближе, а волны будут достигать ушей чаще. Когда машина проедет мимо вас вы услышите тот самый тон, который издаёт сирена на самом деле. В дальнейшем машина скорой начнёт от вас удаляться, а её тон будет становиться более низким из-за уменьшения частоты звуковых волн.

Другими словами, если источник волн догоняет испускаемые им волны, то длина волны уменьшается. Если удаляется — длина волны увеличивается.



Вот такое вот изменение частоты принимаемых волн при относительном движении источника и приёмника называется **эффектом Доплера.** Он наблюдается не только для звуковых волн, но и для электромагнитных.

Итак, Хаббл обнаружил смещение спектральных линий галактик в сторону длинноволновой области. В соответствии с эффектом Доплера это означало, что расстояние между наблюдателем с Земли и галактиками увеличивается. Более того, Эдвину Хабблу даже удалось вывести закон, согласно которому скорости удаления галактик пропорциональны расстоянию до них.

$$\boxed{\upsilon = Hr}$$

$H \approx 70\ \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпс}}$ — постоянная Хаббла.

Тут сделаем маленькую оговорку. В модели расширяющейся Вселенной, постоянная Хаббла не является константой, то есть она изменяется со временем. Но термин «постоянная» оправдан тем, что в каждый данный момент времени во всех точках Вселенной постоянная Хаббла одинакова.

Но почему же Вселенная расширяется? Ответ на этот вопрос впервые предложили бельгийский священник Жорж Леметр и советско-американский физик Георгий Антонович Гамов. Итак, согласно их теории, Вселенная возникла около 14 миллиардов лет назад в результате Большого взрыва и с тех пор непрерывно расширяется, и охлаждается.

До взрыва не было ничего: ни материи, ни пространства, ни времени. Четыре фундаментальных взаимодействия объединены в одно. А сама Вселенная представляла собой некую субстанцию с бесконечно малым объёмом и бесконечно большой плотностью. Такое состояние материи принято называть **сингулярностью.**

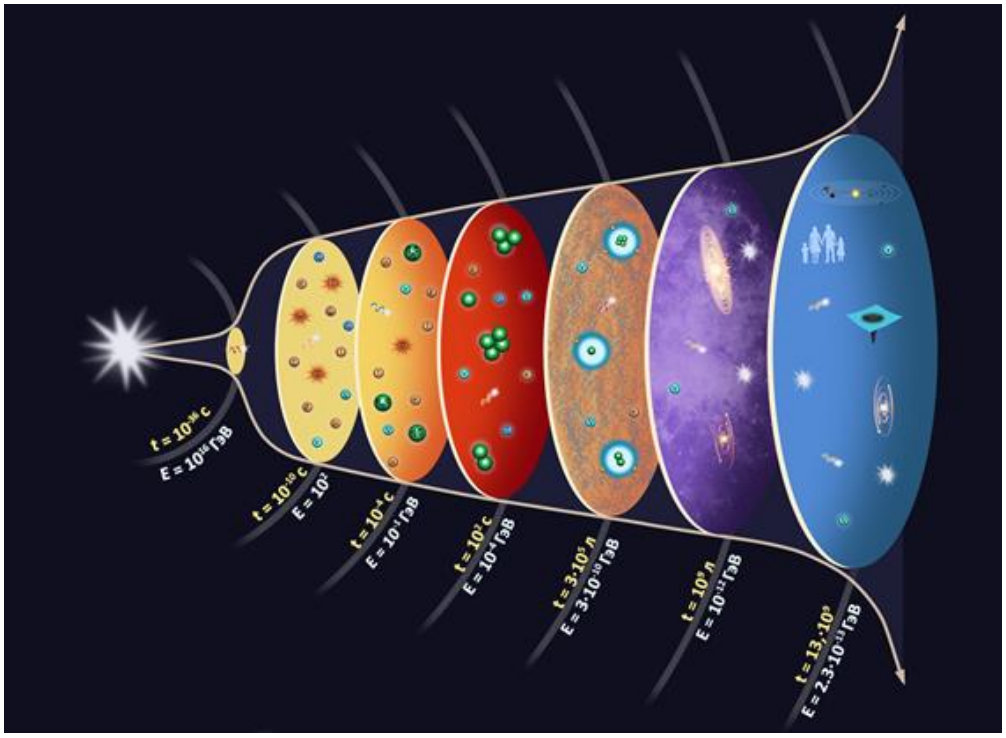
Через 10^{-43} секунды после Большого взрыва гравитационное взаимодействие отделилось от объединённого электрослабого и сильного взаимодействия.

Спустя 10^{-35} секунды отделяются сильное и электрослабое взаимодействия. В этот же миг началось скачкообразное расширение Вселенной, которое называется **инфляционным**, продолжавшееся до отметки в 10^{-32} секунды. В момент времени 10^{-10} секунды все четыре

фундаментальных взаимодействия существуют отдельно друг от друга. Вселенная заполнена кварк-глюонной плазмой, лептонами, фотонами, бозонами Хиггса. Примерно через 10^{-4} секунды после запуска механизма рождения Вселенной — кварки слились в элементарные частицы. В первые 3 минуты существования Вселенной её температура была настолько высокой, что элементарные частицы не успев объединиться в ядра, при следующем столкновении вновь разлетались. Начиная с четвёртой минуты, Вселенная остыла до такой степени, что начинают образовываться стабильные ядра самых лёгких химических элементов.

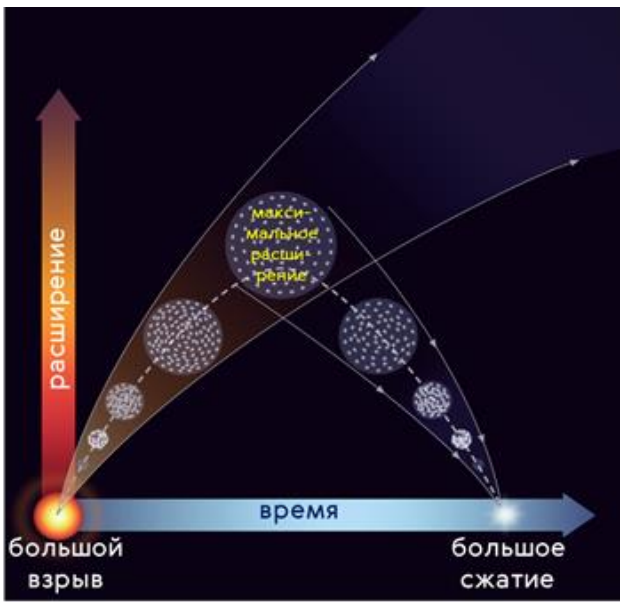
В таком состоянии Вселенная находилась около 300 тысяч лет. За это время она остыла на столько, что электроны начали прочно удерживаться ядрами и появились стабильные атомы. После их формирования Вселенная стала прозрачной, а вещество в ней разреженным настолько, чтобы под действием гравитации начали формироваться устойчивые сгустки материи. Но для начала формирования галактик пространство было очень сильно разрежено. Этот парадокс получил название галактическая проблема. Для её устранения в сценарий формирования Вселенной было введено понятие «тёмная материя». **Под тёмной материей понимают гипотетическую форму материи, которая не испускает электромагнитного излучения и не взаимодействует с ним, поэтому и не может быть обнаружена прямыми наблюдениями.**

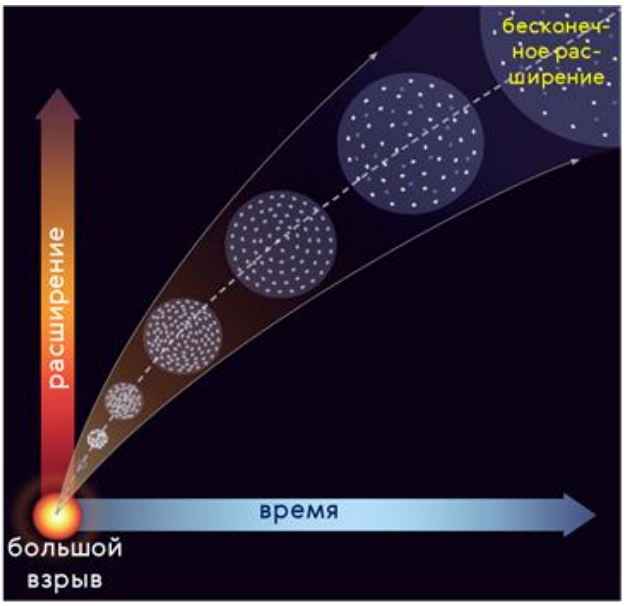
Примерно через миллиард лет началось формирование галактик, затем звёзд и планет. Вселенная стала похожа на то, что мы видим сейчас.



Дальнейшее развитие Вселенной предлагает две модели — закрытую и открытую.

В закрытой модели Вселенная — это система, испытывающая множество эволюционных циклов сжатия и расширения. Полный такой цикл составляет около 100 миллиардов лет. Каждый раз возвращаясь к сингулярности, Вселенная «теряет память» о прошлом снова рождается с новым набором фундаментальных констант.





В открытых моделях предполагается, что примерно сто триллионов лет многие звёзды остынут, планеты оторвутся от своих звёзд, а сами звёзды начнут покидать свои галактики. Затем центральные части галактик превратятся в сверхмассивные чёрные дыры, и тем самым прекратят своё существование.

Солнечная система

Множество объектов самых разнообразных форм и размеров движутся по орбитам вокруг Солнца. Среди них – тысячи больших, неправильной формы глыб из металла и камня, называемых астероидами; всюду рассеяно огромное количество пыли; и ещё, по крайней мере, девять планет. Вся совокупность этих объектов носит название Солнечная система.

Вокруг солнца вращаются планеты нескольких разных типов. Те, что расположены ближе к Солнцу, - небольшие, каменистые и очень плотные. А те, что удалены сильнее, как правило, большого размера и состоят из газа, льда и жидкости. Планеты расположены в таком порядке (от Солнца): Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. А по размерам они располагаются в таком порядке: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Земля, Венера, Меркурий, Марс, Плутон.

Спутники.

У многих планет нашей солнечной системы имеются большие компаньоны, вращающиеся вокруг них. Их называют спутниками, или лунами. Земля имеет только один спутник, а вот у Сатурна их шестьдесят один. Один из спутников Сатурна, Титан, по своим размерам превосходят планету Меркурий.

Где кончается солнечная система.

Астрономы думают, что Солнечная система простирается, по всей видимости, далеко за пределы орбиты Плутона. Недавно они получили некоторые подтверждение этой идеи в виде мини-планеты, расположенной за орбитой Плутона. Некоторые учёные считают, что границу Солнечной системы можно представить себе в виде огромного сферического нимба из комет, называемого Облаком Оорта в честь голландского астронома Яна Оорта, который первым предположил существование этого облака.

Единственная.

Всего лишь несколько лет назад ещё не было ни одного реального свидетельства в пользу существования других звёзд, кроме Солнца, вокруг которых обращаются планеты. Теперь, с помощью телескопов, установленных на земле, и обсерваторий, летающих по орбитам вокруг Земли, установлено, что у некоторых других звёзд, имеются, во всяком случае, диски вещества, обращающихся вокруг них. Возможно, эти диски находятся в процессе образования планет. Но если даже некоторые из ближайших к нам звёзд и имеют полностью сформированные планеты, вращающиеся вокруг них, всё равно современные приборы ещё недостаточно совершенны, чтобы различить эти планеты на фоне яркого звёздного света.

Для вашего интереса:

1. Ледяная планета Плутон, как правило, находится от Солнца дальше всех планет.

2. Нептун – это бирюзово-синий газовый шар.

3. Уран вращается вокруг Солнца, лёжа на боку.

4. Юпитер – самая большая планета.

5. По современным данным, Земля – единственная планета, на которой существует жизнь.

6. У Сатурна имеется очень красивая система ледяных колец.

7. Марс – холодная и пыльная планета, по размеру он вдвое меньше земли.

8. Астероиды – это куски камня и металлов. Большая их часть находится в поясе между Марсом и Юпитером.

9. Венера по величине ровна Земле.

10. Меркурий – ближайшая к Солнцу планета.

11. Кометы похожи на громадные айсберги, вращающиеся вокруг Солнца.

7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. КИНЕМАТИКА

1.1 Прямолинейное движение. Относительное движение.

1. Скорость велосипедиста 10 км/ч, а скорость встречного ветра 6 км/ч. Определите скорость ветра относительно велосипедиста.
2. Автомобиль проходит первую половину пути со средней скоростью 70 км/ч, а вторую – со средней скоростью 30 км/ч. Определить среднюю скорость на всем пути.
3. Скорость автомобиля за 20 с уменьшилась с 20 м/с до 10 м/с. С каким ускорением двигался автомобиль?
4. Ускорение тела a = -3,0 м/с^2. Записать уравнение скорости при v_0 = 24м/с. Чему равно скорость тела в конце 8-й секунды от начала отсчета? Какой физический смысл имеет полученный ответ.
5. Теплоход, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, проходит с постоянным ускорением 0,80 м/с^2. За какое время этот путь пройден? Какова скорость в конце данного участка пути?
6. Тело движется равноускоренно без начальной скорости. К концу 5-ой секунды его скорость равна 10 км/ч. Чему равен путь, пройденный телом за 5-ю секунду?
7. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью 28 м/с. На какую наибольшую высоту оно поднимется и чему равно время подъема? Через сколько времени тело достигнет высоты, равной половине максимальной?
8. Уравнение координаты материальной точки имеет вид $x = 24 + 10t - t^2$, величины измерены в единицах СИ. Опишите характер движения. Найдите начальную координату, проекцию начальной скорости, модуль и направление вектора ускорения. Напишите уравнение зависимости $\upsilon_x(t)$ и $a_x(t)$.
9. Зависимость проекции скорости от времени движения тела имеет вид $\upsilon_x = -10 + 3t$. Напишите уравнение зависимости координаты точки от времени и найдите ее координату через 15с от начала движения. Каково перемещение тела за это время? $x_0 = 0$.
10. Уравнения движения двух тел имеют вид $x_1 = 10t + 0{,}4t^2$ и $x_2 = -6t+2t^2$. Опишите характер движения каждого тела. Найдите место и время их встречи.

1.2 Криволинейное движение

1. С самолета, летящего горизонтально с постоянной по величине и направлению скоростью υ_0, сбрасывается тело. Определить горизонтальную скорость тела относительно Земли; относительно самолета; форму траектории движения тела для наблюдателя, находящегося в самолете; на Земле.
2. Тела массой 0,50 кг бросают под углом 45^0 к горизонту на расстояние 40 м. Определить кинетическую энергию, сообщаемую телу; кинетическую энергию, которой оно обладает в высшей точке траектории.
3. Какова линейная скорость точек шкива мотора, удаленных от оси вращения на R=10 см, если шкив совершает n =1200 об/мин?
4. С какой частотой должен вращаться шкив трансмиссионного вала диаметром 400 мм, чтобы скорость точек охватывающего шкив приводного ремня была 15 м/с ? Ремень движется без проскальзывания.
5. Каковы угловые и линейные скорости точек поверхности Земли, обусловленные ее вращением вокруг оси на экваторе? На широте $\alpha=45^0$? R≈6400 км.

6. Определить нормальное (центростремительное) ускорение автомобиля, движущегося со скоростью 72 км/ч по закруглению с радиусом 100м; центростремительное ускорение автомобиля при прежней скорости движения, если радиус закругления уменьшить вдвое.
7. Поезд въезжает на закругленный участок пути с начальной скоростью 54 км/ч и проходит путь 600 м за время 30 с. Радиус закругления 1 км. Определить скорость и полное ускорение поезда в конце этого пути.
8. Луна вращается вокруг Земли по орбите радиусом 384000 км. Определить центростремительное ускорение Луны, если период ее обращения вокруг Земли 27,3 суток.
9. Период вращения платформы карусельного станка 4с. Найти скорость крайних точек платформы, удаленных от оси вращения на 2м.
10. Рабочее колесо турбины Красноярской ГЭС имеет диаметр 7,5 м и вращается с частотой 93,8 об/мин. Каково центростремительное ускорение концов лопаток турбины?

2. ДИНАМИКА

2.1. Второй закон Ньютона

1. Автобус, масса которого с полной нагрузкой равна 15т, движется так, что его проекция скорости на направление движения изменяется по закону $\upsilon_x = 0{,}7t$. Найдите силу тяги, если коэффициент сопротивления равен 0,03.
2. По какому закону изменяется скорость электровоза, который трогаясь с места с железнодорожным составом развивает максимальную силу тяги 650 кН? Масса состава равна 3250 т, а коэффициент трения равен 0,005.
3. Троллейбус массой 10 т, трогаясь с места, приобрел на пути 50 м скорость 10 м/с. Найдите коэффициент трения, если сила тяги равна 14 кН.
4.Какую силу надо приложить для подъема вагонетки массой 600 кг по эстакаде с углом наклона 20^0 , если коэффициент сопротивления равен 0,05?
5. С каким ускорением скользит брусок по наклонной плоскости с углом наклона 30^0? Коэффициент трения 0,2.
6. Автомобиль массой 4 т движется в гору с ускорением 0,2 м/с^2. Найдите силу тяги, если уклон равен 0,02 и коэффициент сопротивления 0,04. (уклоном в технике называют синус угла наклона плоскости к горизонту)
7. Поезд массой 3000 т движется вниз под уклон, равный 0,003. Коэффициент сопротивления движению равен 0,008. С каким ускорением движется поезд, если сила тяги локомотива равна 300 кН?
8. Вертолет, масса которого 27,2 т, поднимает на тросах вертикально вверх груз массой 15,3 т с ускорением 0,6 м/с^2 . Найдите силу тяги вертолета и силу, действующую со стороны груза на прицепной механизм вертолета.
9. Груз массой 150 кг лежит на дне кабины опускающегося лифта и давит на дно с силой 1800 Н. Определить величину и направление ускорения лифта.
10. На нити, перекинутой через блок, подвешены грузы массой m_1= 1 кг и m_2= 2 кг. Найти ускорение грузов и силу натяжения нити. Блок и нить считать невесомыми, трением в блоке пренебречь.

2.2. Динамика материальной точки, движущейся по окружности

1. Трактор массой 3340 кг движется по выпуклому мосту 9 км/ч. Сила давления трактора на середину моста составляет 32940 Н. Определить радиус кривизны моста.
2. Самолет, летящий со скоростью 280 км/ч, описывает петлю Нестерова радиусом 100 м. Определить величину сил, прижимающих летчика к сиденью в верхней и нижней точках петли. Масса летчика 80 кг.

3. При насадке маховика на ось центр тяжести оказался на расстоянии r = 0,1 мм от оси вращения. В каких пределах меняется сила F давления оси на подшипники, если частота вращения маховика n= 10 $с^{-1}$? Масса маховика m = 100 кг.
4. С какой наибольшей скоростью может двигаться автомобиль на повороте с радиусом закругления 150 м, чтобы его не занесло? Коэффициент трения скольжения шин о дорогу равен 0,42.
5. Гирька массой m = 50 г, привязанная к нити длиной i = 25 см, описывает в горизонтальной плоскости окружность. Частота вращения гирьки n = 2 об/с. Найти силу натяжения нити Т.
6. Средняя высота спутника над поверхностью Земли равна 1700 км. Определить его скорость и период обращения, если радиус Земли равен 400 км.
7. Мальчик массой 50 кг качается на качелях с длиной подвеса 4м. С какой силой он давит на сиденье при прохождении среднего положения со скоростью 6 м/с?
8. Автомобиль массой 2 т, проходящий по выпуклому мосту радиусом 40м, имеет вес 15 кН. С какой скоростью движется автомобиль?
9. Груз, подвешенный на нити длиной ι =60 см, двигаясь равномерно, описывает в горизонтальной плоскости окружность. С какой скоростью υ движется груз, если во время его движения нить образует с вертикалью постоянный угол $\alpha = 30^0$?
10. Велотрек имеет закругление радиусом 40м. В этом месте он наклонен на 40^0 к горизонту. На какую скорость езды рассчитан такой наклон?

2.3 Закон сохранения импульса

1. Мальчик массой 22 кг, бегущий со скоростью 2,5 м/с, вскакивает сзади на платформу массой 12 кг. Чему равна скорость платформы массой с мальчиком?
2. Мяч массой 1,8 кг, движущийся со скоростью 6,5 м/с, под прямым углом ударяется в стенку и отскакивает от нее со скоростью 4,8 м/с. Чему равен импульс силы, действующей на мяч?
3. Вагон массой 30 т, движущийся по горизонтальному пути со скоростью 1,5 м/с, автоматически на ходу сцепляется с неподвижным вагоном массой 20 т. С какой скоростью движется сцепка?
4. Два неупругих шара массами 6 кг и 4 кг движутся со скоростью 8 м/с и 3 м/с соответственно, направленными вдоль одной прямой. С какой скоростью они будут двигаться после упругого соударения, если первый догоняет второй? Движутся навстречу друг другу?
5. На тележку массой 100 кг, движущуюся равномерно по гладкой горизонтальной поверхности со скоростью3 м/с, вертикально падает груз массой 50 кг. С какой скоростью будет двигаться тележка, если груз не соскальзывает с нее?
6. Граната, летевшая в горизонтальном направлении со скоростью 10 м/с, разорвалась на два осколка массами 1 кг и 1,5 кг. Скорость большего осколка осталась после разрыва горизонтальной и возросла до 25 м/с. Определите скорость и направление движения меньшего осколка.
7. Ракета, поднимающаяся вертикально вверх со скоростью 100м/с, разрывается на три части. Две части по 0,5 кг каждая разлетаются горизонтально – одна на восток, другая на запад. Чему равна скорость третьей части, масса которой равна 1 кг?
8. Снаряд массой 40 кг, летевший в горизонтальном направлении со скоростью 600 м/с, разрывается на две части с массами 30 и 10 кг. Большая часть стала двигаться в прежнем направлении со скоростью 900 м/с. Определить величину и направление скорости меньшей части снаряда.
9. Определить импульс, полученный стенкой при ударе об нее шарика массой m = 300 г, если шарик двигался со скоростью υ = 8 м/с под углом 60^0 к плоскости стенки. Удар о стенку считан упругим.

10. Шар массой m_1 = 10 кг сталкивается с шаром массой m_2= 4 кг. Скорость первого шара U_1 = 4 м/с, второго U_2 = 12 м/с. Найти общую скорость u шаров после удара, когда шары движутся навстречу друг другу. Удар считать прямым, центральным и неупругим.

2.4. Работа, мощность, энергия. Закон сохранения энергии

1. Какую работу совершает двигатель автомобиля «Жигули» массой 1,3 т трогаясь с места на первых 75 м пути, если это расстояние автомобиль проходит за 10 с, а коэффициент сопротивления движению равен 0,05?
2. Сани тянут на пути 100 м с силой 80 Н за веревку, составляющую угол 30^0 к горизонту. Какая работа совершается при этом?
3. Тело массой 100 кг поднимают с ускорением 2 м/с^2 на высоту 25 м. Какая работа совершается при подъеме тела?
4. Какую кинетическую энергию нужно сообщить телу массой 0,50 кг, чтобы оно поднялось вертикально вверх на 10 м? Сопротивлением пренебречь.
5. С какой начальной скоростью υ_0 надо бросать вниз мяч с высоты 2 м, чтобы он подпрыгнул на высоту 4 м? Считать удар о землю абсолютно упругим.
6. При подготовке игрушечного пистолета к выстрелу пружину жесткостью 8 Н/м сжали на 5 см. Какую скорость приобретет пуля массой 20 г при выстреле в горизонтальном направлении?
7. На какую высоту за минуту может поднять 400м^3 воды насос, развивающий полезную мощность 2000 кВт?
8. Поезд массой 1200 т движется по горизонтальному пути с постоянной скоростью 54 км/ч. Определить коэффициент сопротивления движению, если тепловоз развивает полезную тяговую мощность 882 кВт.
9. Поезд массой 600т равномерно поднимается в гору с уклоном 5м на 1 км пути. Коэффициент трения 0,002. Определить развиваемую тепловозом мощность при скорости движения 36 км/ч.
10. Танк массой 30т поднимается в гору с углом наклона 30^0 к горизонту. Какую максимальную скорость может развить танк при полезной мощности 360 кВт? Сопротивлением движению пренебречь.

3 МОЛЕКУЛРНАЯ ФИЗИКА

1. Сколько молекул сернистого газа SO_2 содержится в одном килограмме при нормальных условиях?
2. Масса 14,92 $\cdot 10^{25}$ молекул инертного газа составляет 5 кг. Какой это газ?
3. Определить массу 1 молекулы оксида углерода CO.
4. Сколько молекул содержится в 5 кг кислорода O_2?
5. В баллоне находится 20 моль газа. Сколько молекул газа находится в баллоне?
6. Какова масса 50 моль кислорода?
7. Определить количество вещества, содержащегося в 6 г углекислого газа. Сколько молекул газа содержится в данной массе?
8. Определить массу молекулы и атома кислорода, азота, гелия.
9. Определить массу молекул пропана C_3H_8 и его плотность при нормальных условиях.
10. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы воздуха при нормальных условиях. Концентрация молекул воздуха при нормальных условиях $n_0=2{,}7\cdot 10^{25}$м$^{-3}$.
11. Выразить температуру 300,18 и -20°С по термодинамической шкале.
12. Определить среднюю квадратичную скорость молекул азота при нормальных условиях, т.е. при $p_0=10^5$Па и плотности ρ_0=1,25кг/м^3.

13. Выразить температуру таяния льда и кипения воды при нормальном давлении по шкале Цельсия и термодинамической шкале.

14. Определить среднюю квадратичную скорость молекул водорода при нормальных условиях, т.е. при $p_0=10^5$Па и плотности ρ_0=0,09 кг/м^3.

15. Существует ли в природе как угодно низкая, как угодно высокая температура тел? Почему?

16. Определить среднюю квадратичную скорость молекул Ксенона при нормальных условиях, т.е. при давлении $p_0=10^5$Па и плотности ρ_0=5,85кг/ м^3.

17. Выразить температуру 4,313 и 250 К по шкале Цельсия.

18. Определить температуру идеального газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекулы равна $7{,}87\cdot10^{-21}$Дж.

19. Определить чисто молей воздуха в комнате объемом $5\times 6\times 3$м при температуре 27°С и давлении 10^5Па.

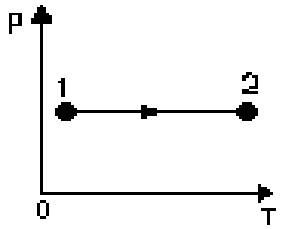
20. Определить температуру аммиака NH_3, находящегося под давлением $2{,}1\cdot10^5$Па , если объем его 0,02м^3, а масса 0,03 кг.

21. Определить массу оксида азота NO_3 в баллоне, объем которого $6\cdot10^{-2}$ м^3 при температуре 7°С и давлении $1{,}2\cdot10^5$Па.

22. Определить плотность кислорода при температуре 320К и давлении $4\cdot10^5$ Па.

23. Газ переведен из состояния 1 в состояние 2, как показано на рис.№1. Какой это процесс? Как изменилась плотность газа?

Рис. №1.



24. При изохорном нагревании идеального газа, взятого при температуре 320К, его давление увеличилось от $1{,}4\cdot10^5$ до $2{,}1\cdot10^5$ Па. Как изменится температура?

25. При температуре 727°С газ занимает объем 8 литров и производит давление $2\cdot10^5$Па на стенки сосудов. При каком давлении этот газ при температуре -23ºС будет занимать объем 160 литров?

26. При изохорном охлаждении идеального газа, взятого при температуре 480К, его давление уменьшилось в 1,5 раза. Какой стала конечная температура газа?

27. Какое давление производит углекислый газ при температуре 330К, если его плотность при этом равна 4,91 кг/м^3?

4 ТЕРМОДИНАМИКА

1. Кислород массой 160г нагрет изобарно на 100К. Определить работу, совершенную над газом при увеличении его объема, и изменении внутренней энергии этого газа.

2. На сколько уменьшится внутренняя энергия 960г. кислорода O_2 при охлаждении его на 80К.

3. Сколько водя при температуре 373К надо добывать к 200кг воды при температуре 283К, чтобы получить температуру смеси 310К?

4. При изохорном процессе газу сообщено $4\cdot10^{10}$ Дж теплоты. Рассчитать изменение внутренней энергии и работы по расширению газа.

5. При изобарном расширении 20г. водорода его объем увеличился в 2 раза. Начальная температура газа 300К. Определить работу расширения газа, изменение внутренней энергии и количество теплоты, сообщенное этому газу.

6. Определить начальную температуру 0,6кг олова, если при погружении его в воду массой 3 кг при 300К она нагрелась на 2К.

7. При медленном изотермическом процессе газу передано $8 \cdot 10^6$ Дж теплоты. Какую работу совершил газ? Что произойдет с его объемом?

8. При сообщении газу $8 \cdot 10^4$Дж теплоты он совершил работу $2 \cdot 10^5$Дж. чему равно изменение внутренней энергии газа? Что произойдет с газом (охлаждение или нагревание)?

9. Для закалки нагретую до 1073К стальную деталь массой 0,5кг опустили в воду массой 10кг. при температуре 288К. До какой температуры охладится стальная деталь?

5 ЭЛЕКТРОСТАТИКА

1. Маленькая заряженная пылинка может «висеть» между двумя горизонтальными, разноимённо заряженными пластинками. Что произойдёт, если заряд пылинки уменьшится? Что нужно сделать для восстановления равновесия?

2. Электрон влетает в пространство между пластинами плоского конденсатора под углом 30° к пластинам. Во сколько раз возрастёт его кинетическая энергия за время движения в конденсаторе, если электрон вылетает из конденсатора под углом 45° к пластинам?

3. Расстояние между обкладками плоского конденсатора 5 см, а разность потенциалов 500 В. С какой силой поле внутри конденсатора действует на заряд 0,007 мкКл, помещённый посередине между обкладками?

4. В поле между обкладками плоского конденсатора на заряд 0.2 мкКл, действует сила 50 мкН. До какого напряжения заряжен конденсатор, если расстояние между пластинами 0,03 м? Перераспределением заряда на пластинах пренебречь.

5. Частица с зарядом 0,1 мкКл влетает в плоский конденсатор ёмкостью 2 мкФ вблизи первой пластины и отклоняется ко второй. Определить изменение кинетической энергии частицы за время движения от одной пластины до другой. Заряд конденсатора равен 1,4 Кл.

6. Иногда говорят, что силовые линии электростатического поля – это траектории, по которым двигался бы в поле положительный заряд, если его, внеся в это поле, предоставить самому себе. Правильно ли это утверждение?

7. Для исследования поверхностной структуры металлов применяются металлографические микроскопы, одним из которых является электронный микроскоп. Он состоит из вакуумной трубки, в которую помещается остриё из исследуемого металла. Внутренняя поверхность трубки покрыта люминофором (материалом, который светится при поглощении частиц, имеющих большую кинетическую энергию). Между трубкой и остриём создаётся высокое напряжение: остриё служит катодом, экран – анодом. С острия стекают и радиально разлетаются пучки электронов. Попадая на люминофор, они дают изображение острия (электронограмму) с увеличением, равным отношению радиуса трубки и радиусу острия. Почему на электронограмме хорошо различим микрорельеф острия?

8. В однородном электрическом поле заряд 0,37 Кл движется вдоль силовой линии с постоянной скоростью. Определить модуль силы сопротивления движению, если напряжённость поля равна 800 В/м.

9. В однородном электрическом поле с напряжённостью 50 В/м находится в равновесии капелька с зарядом $2\ 10^{-7}$ Кл. Определить массу капельки.

10. Максимально возможное значение ускорения пылинки массой 0,1 г в однородном электрическом поле напряжённостью 100 В/м вблизи поверхности Земли равно 11 м/с^2. Определить величину заряда пылинки.

11. Определить кинетическую энергию заряда 1,41 Кл, который из состояния покоя прошёл разность потенциалов 500 В.

12. Какую разность потенциалов должен пройти первоначально покоящийся электрон, чтобы приобрести кинетическую энергию 150 эВ?

13. Определить скорость первоначально покоящейся пылинки массой 0,01 г и зарядом 5 мкКл, когда она пройдёт ускоряющую разность потенциалов 100 В.

14. Частица массой 10 –9 кг и зарядом 1 мкКл влетает в однородное электрическое поле с напряжённостью 1000 В/м перпендикулярно силовым линиям. Определить работу сил поля за первую миллисекунду движения.

15. Пылинка взвешена в плоском конденсаторе. Её масса m = 10 –11 г, расстояние между пластинами конденсатора d = 0,5 см. Пылинка освещается ультрафиолетовым светом и, теряя заряд, выходит из равновесия. Какой заряд потеряла пылинка, если первоначально к конденсатору было приложено напряжение U = 154 В, а затем, чтобы опять вернуть пылинку в равновесие, пришлось добавить 8 В?

16. В плоском конденсаторе, помещённом в вакууме, взвешена заряженная капелька ртути. Расстояние между пластинами конденсатора d = 1 см, приложенная разность потенциалов U1 = 1000 В. Внезапно разность потенциалов падает до U2 = 995 В. Через какое время капелька достигнет нижней пластины, если она первоначально находилась посередине конденсатора?

17. Электрическое поле образовано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии d = 2 см друг от друга, разность потенциалов между которыми равна U = 120 В. Какую скорость получил электрон под действием поля, пройдя по силовой линии расстояние 3 мм? Начальная скорость электрона равна нулю.

18. Ускоряющее напряжение в электронно-лучевой трубке равно 1,5 кВ, расстояние от отклоняющих пластин до экрана 30 см. На какое расстояние сместится пятно на экране осциллографа при подаче на отклоняющие пластины напряжения 20 В? Расстояние между пластинами 0,5 см, длина пластин 2,5 см.

19. Две пересекающиеся плоскости равномерно заряжены отрицательным зарядом. В некоторой точке между плоскостями помещён радиоактивный источник. Начертить примерный вид траектории движения положительно и отрицательно заряженных частиц, испускаемых источником. Что это за кривые?

20. Найти электроемкость C уединенного металлического шара радиусом R = 1 см, находящегося в вакууме.

21. Определить электроемкость C металлической сферы радиусом R = 2 см, погруженной в воду.

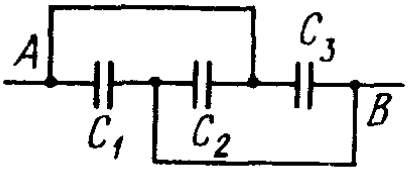
22. Определить электроемкость C Земли, принимая ее за шар радиусом R = 6400 км.

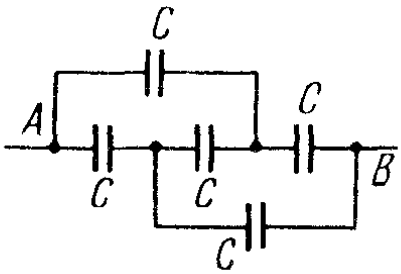
23. Два металлических шара радиусами R_1 = 2 см и R_2 = 6 см соединены проводником, емкостью которого можно пренебречь. Шарам сообщен заряд q = 1 нКл. Найти поверхностную плотность σ зарядов на шарах.

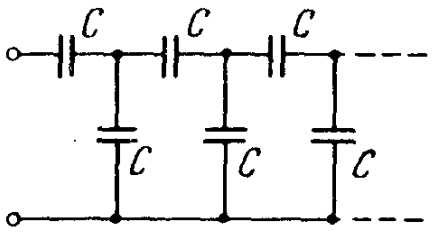
23. Шар радиусом R_1 = 6 см заряжен до потенциала φ_1 = 300 В, а шар радиусом R_2 = 4 см – до потенциала φ_2 = 500 В. Определить потенциал φ шаров после того, как их соединили металлическим проводником. Емкостью соединительного проводника пренебречь.

24. Определить электроемкость C плоского слюдяного конденсатора, площадь S пластин которого равна 100 см^2, а расстояние между ними равно 0,1 мм.

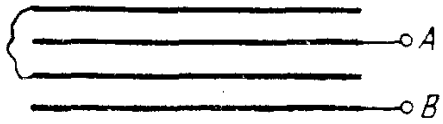
25. Найти емкость системы одинаковых конденсаторов между точками А и В, которая показана на рисунках.

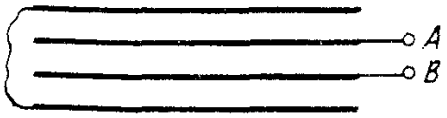






26. Четыре одинаковые металлические пластины расположены в воздухе на расстоянии d = 1 мм друг от друга. Площадь каждой пластины S = 220 см^2. Найти емкость системы между точками А и В, если пластины соединены так, как показано на рисунках.





1

27. Найти емкость бесконечной цепи, которая образована повторением одного и того же звена из двух одинаковых конденсаторов, каждый емкости C (рис. 11.5).

28. Между пластинами плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов U = 600 В, находятся два слоя диэлектриков: стекла толщиной d_1 = 7 мм и эбонита толщиной d_2 = 3 мм. Площадь S каждой пластины конденсатора равна 200 см^2. Найти: 1) электроемкость C конденсатора; 2) смещение D, напряженность E поля и падение потенциала $\Delta\varphi$ в каждом слое.

29. На пластинах плоского конденсатора равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью σ = 0,2 мкКл/м^2. Расстояние d между пластинами равно 1 мм. На сколько изменится разность потенциалов на его обкладках при увеличении расстояния d между пластинами до 3 мм?

29. В плоский конденсатор вдвинули плитку парафина толщиной d = 1 см, которая вплотную прилегает к его пластинам. На сколько нужно увеличить расстояние между пластинами, чтобы получить прежнюю емкость?

30. Электроемкость C плоского конденсатора равна 1,5 мкФ. Расстояние d между пластинами равно 5 мм. Какова будет электроемкость C конденсатора, если на нижнюю пластину положить лист эбонита толщиной d_1 = 3 мм?

31. Между пластинами плоского конденсатора находится плотно прилегающая стеклянная пластинка. Конденсатор заряжен до разности потенциалов U_1 = 100 В. Какова будет разность потенциалов U_2, если вытащить стеклянную пластинку из конденсатора?

32. Две концентрические металлические сферы радиусами R_1 = 2 см и R_2 = 2,1 см образуют сферический конденсатор. Определить его электроемкость C, если пространство между сферами заполнено парафином.

33. К воздушному конденсатору, заряженному до разности потенциалов U = 600 В и отключённому от источника напряжения, присоединили параллельно второй, незаряженный конденсатор таких же размеров и формы, но с диэлектриком (фарфор). Определить диэлектрическую проницаемость ε фарфора, если после присоединения второго конденсатора разность потенциалов уменьшилось до U_1 = 100 В.

34. Два конденсатора электроёмкостями C_1 = 3 мкФ и C_2 = 6 мкФ соединены между собой и присоединены к батарее с ЭДС E = 120 В. Определить заряды q_1 и q_2 конденсаторов и разности потенциалов U_1 и U_2 между их обкладками, если конденсаторы соединены: 1) параллельно; 2) последовательно.

35. Конденсатор электроёмкостью C_1 = 0,2 мкФ был заряжен до разности потенциалов U_1 = 320 В. После того как его соединили параллельно со вторым конденсатором, заряженным до разности потенциалов U_2 = 450 В, напряжение U на нём изменилось до 400 В. Вычислить ёмкость C_2 второго конденсатора.

36. Конденсатор электроёмкостью C_1 = 0,6 мкФ был заряжен до разности потенциалов U_1 = 300 В и соединён параллельно со вторым конденсатором электроёмкостью C_2 = 0,4 мкФ, заряженным до разности потенциалов U_2 = 150 В. Найти заряд Δq, перетекший с пластин первого конденсатора на второй.

37. Три одинаковых плоских конденсатора соединены последовательно. Электроемкость C такой батареи конденсаторов равна 89 пФ. Площадь S каждой пластины равна 100 см^2. Диэлектрик – стекло. Какова толщина d стекла?

38. Конденсатор емкости C_1 = 1мкФ, заряженный до напряжения U=110В, подключили параллельно к концам системы из двух последовательно соединенных конденсаторов, емкости которых C_2 = 2 мкФ и C_3 = 3мкФ. Какой заряд протечет при этом по соединительным проводам?

39. Конденсатору, электроемкость C которого равна 10 пФ, сообщен заряд q = 1 пКл. Определить энергию W конденсатора.

40. Расстояние d между пластинами плоского конденсатора равно 2 см, разность потенциалов U = 6 кВ. Заряд q каждой пластики равен 10 нКл. Вычислить энергию W поля конденсатора и силу F взаимного притяжения пластин.

41. Какое количество теплоты Q выделится при разряде плоского конденсатора, если разность потенциалов U между пластинами равна 15 кВ, расстояние d = 1 мм, диэлектрик – слюда и площадь S каждой пластины равна 300 см^2?

42. Сила F притяжения между пластинами плоского воздушного конденсатора равна 50 мН. Площадь S каждой пластины равна 200 см^2. Найти объемную плотность энергии ω электрического поля конденсатора.

43. Плоский воздушный конденсатор состоит из двух круглых пластин радиусом R = 10 см каждая. Расстояние d_1 между пластинами равно 1 см. Конденсатор зарядили до разности потенциалов U = 1,2 кВ и отключили от источника тока. Какую работу A нужно совершить, чтобы, удаляя пластины друг от друга, увеличить расстояние между ними до d_2 = 3,5 см?

44. Плоский воздушный конденсатор электроемкостью C = 1,11 нФ заряжен до разности потенциалов U = 300 В. После отключения от источника тока расстояние между пластинами конденсатора было увеличено в пять раз. Определить: 1) разность потенциалов U_1 на обкладках конденсатора после их раздвижения; 2) работу A внешних сил по раздвижению пластин.

45. Внутри плоского конденсатора находится параллельная обкладкам пластина, толщина которой составляет 0,6 расстояния между обкладками. Емкость конденсатора в отсутствие пластины C = 20нФ. Конденсатор сначала подключили к источнику постоянного напряжения U = 200 В, затем отключили и после этого медленно извлекли пластину из зазора. Найти работу, совершенную против электрических сил при извлечении пластины, если она: а) металлическая; б) стеклянная.

46. Конденсатор электроемкостью C_1 = 666 пФ зарядили до разности потенциалов U = 1,5 кВ и отключили от источника тока. Затем к конденсатору присоединили параллельно второй, незаряженный конденсатор электроемкостью C_2 = 444 пФ. Определить энергию, израсходованную на образование искры, проскочившей при соединении конденсаторов.

47. Конденсаторы электроемкостями C_1 = 1 мкФ, C_2 = 2 мкФ и C_3 = 3мкФ включены в сеть с напряжением U = 1,1 кВ. Определить энергию каждого конденсатора в случаях: 1) последовательного соединения; 2) параллельного соединения.

48. Электроемкость C плоского конденсатора равна 111 пФ. Диэлектрик – фарфор. Конденсатор зарядили до разности потенциалов U = 600 В и отключили от источника напряжения. Какую работу A нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора? Трение пренебрежимо мало.

49. Найти энергию W уединенной сферы радиусом R = 4 см, заряженной до потенциала φ = 500 В.

50. Вычислить энергию W электростатического поля металлического шара, которому сообщен заряд q = 100 нКл, если диаметр d шара равен 20 см.

51. Сферическую оболочку радиуса R_1, равномерно заряженную зарядом q, расширили до радиуса R_2. Найти работу, совершенную при этом электрическими силами.

52. Сферическая оболочка заряжена равномерно с повер хностной плотностью σ. Найти модуль электрической силы на единицу поверхности оболочки.

6 ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

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

2. Плоская горизонтальная фигура площадью *0,1* $м^2$, ограниченная проводящим контуром с сопротивлением *5 Ом*, находится в однородном магнитном поле. Пока проекция вектора магнитной индукции на вертикальную ось *Oz* медленно и равномерно возрастает от $B_{1Z} = -0{,}15$ *Тл* до некоторого конечного значения B_{2Z}, по контуру протекает заряд *0,008 Кл*. Найдите B_{2Z}.

3. Проводящий стержень длиной $l = 20$ *см* движется поступательно в однородном магнитном поле со скоростью $v = 1$ *м/с* так, что угол между стержнем и вектором скорости $\alpha = 30°$ (см. рисунок). ЭДС индукции в стержне равна *0,05 В*. Какова индукция магнитного поля?

4. Дуговой фонарь, требующий для своего питания напряжение 40 В и силу тока 10 А, включен в сеть с напряжением 120 В через реостат, изготовленный из константановой проволоки сечением 2 $мм^2$. Определить сопротивление реостата и длину проволоки, необходимой для его изготовления.

5. Три проводника с сопротивлениями 10, 20 и 30 Ом каждый, подключили параллельно в источнику тока с напряжением 300 В. Определите силу тока протекающую через каждый проводник. Какая сила тока и какие напряжения будут на проводниках, если их подключить последовательно друг другу?

6. Сопротивление проволоки 81 Ом. Ее разрезали на несколько частей и соединили эти части параллельно, вследствие чего сопротивление стало 1 Ом. На сколько частей разрезали проволоку?

7. На одной лампочке написано 127 В, 60 Вт, на второй – 220 В, 60 Вт. Какая мощность будет выделяться в каждой из лампочек, если первую вставить в сеть с напряжением 220 В, а вторую в сеть с напряжением 127 В?

8. Через какое время закипает 200 г воды, если через кипятильник течет ток силой 0,5 А при напряжении в сети 220 В? Начальная температура воды 20 °С.

9. Из материала, удельное сопротивление которого 20 Ом*$мм^2$/м, длина 1,1 м и площадь поперечного сечения 0,5 мм2, изготовлен нагревательный элемент и подключен к бытовой электросети. С его помощью требуется перевести лед массой 25 кг и начальной температурой -40 °С в воду при температуре 95 °С. Лед находится в медном тазу массой 12 кг. Определить: а) сопротивление нагревательного элемента; б) количество теплоты, требуемое для всего процесса; в) время, в течение которого лед будет плавиться; г) общее время на весь процесс; д) сумму, которую потребуется заплатить за электроэнергию за весь процесс из расчета 3,2 рубля за 1 кВт*ч.

7 ОПТИКА

1. Определите постоянную решётки, если при освещении её светом 656 нм, второй спектр виден под углом 15º.

2. Луч падает на стекло (n = 1,6) толщиной 1,5 см под углом 70º. Определите сдвиг луча на пластине.

3. Найдите фокус линзы, если изображение предмета, помещённого в 24 см от неё, получается в 0,4 м за ней.

4. Определите световой поток, излучаемый лампой 100 кд, внутрь телесного угла 0,4 ср.

5. Найдите скорость света в алмазе (n = 2,4).

6. Дифракционная решётка имеет 50 штрихов на 1 мм. Под каким углом виден 2 максимум для света длинной волны 400 нм?

7. Под каким углом падает свет на полностью погружённый в воду столб высотой 1,5 м, если он отбрасывает на дне тень 1,13 м?

8. Предмет отстоит на 60 см от собирающей линзы с фокусом 10 см. На каком расстоянии получится изображение?

9. Площадка размером 5*10 см имеет освещённость 60 лк. Найдите падающий световой поток.

10. Найдите показатель преломления алмаза, если скорость света в нём $1,25*10^8$ м/с.

11. На дифракционную решётку с постоянной 0,01 мм падает свет. Найдите его длину волны, если первый максимум отстоит от центрального на 3 см и расстояние до экрана 70 см.

12. Свет падает под углом 60º на стекло с показателем преломления 1,5. Найдите угол между преломлённым и отражённым лучами.

13. Найти оптическую силу линзы, если предмет находится в 15 см перед ней, а изображение в 30 см за ней.

14. Какую освещённость создаёт лампа с силой света 120 кд на расстоянии 2 м прямо под собой?

15. Найдите показатель преломления вещества, если скорость света в нём $2,3*10^8$ м/с.

16. Определить оптическую силу стеклянной линзы, находящейся в воздухе, если линза:

1) двояковогнутая с радиусами кривизны R_1 = 20 см; R_2 = 40 см;

2) плосковыпуклая с радиусом кривизны выпуклой поверхности R = 60 см;

3) вогнутовыпуклая с радиусами кривизны поверхностей R_1 = 20 см; R_2 = 35 см.

17. Свеча находится на расстоянии 12,5 см от собирающей линзы, оптическая сила которой равна 10 дптр. На каком расстоянии от линзы получится изображение и каким оно будет?

18. Человек, сняв очки, читает книгу, держа ее на расстоянии 16 см от глаз. Какой оптической силы у него очки?

8 КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

1. Излучение состоит из фотонов с энергией $5\ 10^{-19}$ Дж. Найти длину волны и частоту этого излучения в воде. Показатель преломления воды 1,33.

2. Скорость распространения фиолетовых лучей с частотой $7,5\ 10^{14}$ Гц в воде $2,33\ 10^8$ м/с. На сколько изменится частота и длина волны этих лучей при переходе из воды в вакуум?

3. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны $5,2\ 10^{-7}$ м?

4. Найти энергию, импульс и массу фотонов видимого света (λ_1 = 0,5 мкм) и рентгеновского излучения (λ_2 = 0,025 нм).

5. Какое количество фотонов с длиной волны 0,6 мкм в параллельном пучке будет иметь суммарный импульс, равный среднему импульсу атома гелия при температуре 300 К?

6. Определить энергию, импульс и массу фотона, длина волны которого соответствует γ — излучению с длиной волны 0,1 нм.

7. Вычислить частоту и длину волны фотона, энергия которого равна энергии покоя электрона.

8. Импульс излучения, состоящий из $5 \cdot 10^4$ квантов света с длиной волны 0,3 мкм, падает на фоточувствительную поверхность, у которой спектральная чувствительность для данной длины волны равна 4,5 мА/Вт. Найти количество фотоэлектронов, освобождаемых таким импульсом света.

9. Электрон выбивается из сурьмяно-цезиевого фотокатода. "Красная" граница фотоэффекта соответствует длине волны 5,77 10^{-7} м. Вычислить минимальное значение энергии кванта, необходимое для освобождения фотоэлектронов из данного покрытия фотокатода.

10. "Красная" граница фотоэффекта для сурьмяно-цезиевого фотокатода равна 5,77 10^{-7} м. Определить максимальную скорость фотоэлектронов при облучении фотокатода фиолетовыми лучами с длиной волны 4 10^{-7} м.

11. Работа выхода электронов с поверхности цезия равна 1,9 эВ. С какой максимальной скоростью вылетают электроны из цезия при освещении его желтым светом длиной волны 0,59 мкм?

12. Фотокатод освещается светом длиной волны 0,76 мкм. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, если "красная" граница фотоэффекта равна 1,75 мкм.

13. Найти число квантов, испускаемых лампочкой мощностью 58 Вт за 1 с, падающих на фотокатод с работой выхода 1,2 эВ, если задерживающий потенциал равен 1,2 В.

14. Найти количество фотоэлектронов, выбиваемых с поверхности фотокатода световым потоком с числом квантов 4 10^5 и длиной волны 0,41 мкм. Спектральная чувствительность фотокатода на данной длине волны равна 3,3 мА/Вт.

15. Во сколько раз кинетическая энергия фотоэлектронов больше работы выхода электронов из катода с "красной" границей 0,8 10^{-7} м при падении на него света длиной волны 0,4 10^{-7} м?

16. "Красная" граница фотоэффекта равна 1,3 длины волны падающего света, и задерживающий потенциал составляет 2 В. Определить работу выхода электронов из вещества фотокатода, а также частоту и длину волны используемого света.

17. При освещении двух фотокатодов одним и тем же светом длиной волны 4 10^{-7} м задерживающие потенциалы оказались равными 2,5 и 3 В. Найти отношение работ выхода фотоэлектронов из веществ катодов.

18. При освещении фотокатода светом с длинами волн, соответствующими границам видимого спектра, задерживающая разность потенциалов изменилась от 0,63 до 2,1 В. Какое значение постоянной Планка получается по этим данным?

19. На частоту света $5 \cdot 10^{15}$ Гц приходится 8% энергии, излучаемой лампочкой мощностью 100 Вт. Какая часть энергии идёт на работу выхода электронов из катода, работающего на частоте $5 \cdot 10^{15}$ Гц и освещаемого этой лампочкой, если величина энергии задерживающего потенциала составляет 1/2 работы выхода? Сколько квантов света падает на фотокатод за 5 с?

20. При освещении поверхности фотокатода светом с длинами волн 2,79 10^{-7} и 2,45 10^{-7} м задерживающие потенциалы соответственно равны 0,66 и 1,28 В. Определить значение постоянной Планка.

21. Какая доля энергии фотона расходуется на работу выхода электрона с поверхности сурьмя но-цезиевого фотокатода, если "красная" граница фотоэффекта соответствует длине волны.3,07 10^{-7} м, а кинетическая энергия электрона равна 1 эВ?

Приложение

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

I.Фундаментальные константы

Постоянная	Обозначение	Числовое значение
Атомная единица массы	а.е.м.	$1{,}6605655 \cdot 10^{-27}$ кг 931,5016 МэВ/c^2
Гравитационная постоянная	G	$6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н • $м^2$ • $кг^{-2}$
Заряд электрона	e	$1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Классический радиус электрона	r_e	$2{,}8179380 \cdot 10^{-16}$ м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн • $м^{-1}$ $1{,}2566370614 \cdot 10^{-6}$ Гн • $м^{-1}$
Масса атома водорода (^{1}H)		1,007825036 а. е. м.
Масса атома дейтерия (^{2}H)		2,014101795 а. е. м.
Масса атома гелия–4 (^{4}He)		4,002603267 а. е. м.
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}109534 \cdot 10^{-31}$ кг $5{,}4858026 \cdot 10^{-4}$ а. е. м.
Масса покоя протона	m_p	$16726485 \cdot 10^{-27}$ кг 1,007276470 а. е. м.
Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}6749543 \cdot 10^{-27}$ кг 1,008665012 а. е. м.
Молярная газовая постоянная	R	8,31441 Дж • $моль^{-1}$ • $К^{-1}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях (101,325 кПа, 273,15К)	V_m	$22{,}41383 \cdot 10^{-3}$ $м^3$ • $моль^{-1}$
Отношение массы протона к массе электрона	m_p/m_e	1836,15152
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}022045 \cdot 10^{23}$ $моль^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1{,}380662 \cdot 10^{-23}$Дж • $К^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6{,}626176 \cdot 10^{-34}$Дж • с
Постоянная Фарадея	F	96484,56 Кл • $моль^{-1}$
Скорость света в вакууме	c	$2{,}99792458 \cdot 10^8$ м • $с^{-1}$
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1{,}7588047 \cdot 10^{11}$ Кл • $кг^{-1}$
Ускорение свободного падения	g	9,80665 м • $с^{-2}$
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}854187818 \cdot 10^{-12}$ Ф • $м^{-1}$
Энергия покоя электрона	m_ec^2	0,5110034 МэВ

II.Множители и приставки

Множитель	Приставка		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
1 000 000 000 000 000 000 = 10^{18}	экса	Э	E
1 000 000 000 000 000 = 10^{15}	пета	П	P
1 000 000 000 000 = 10^{12}	тера	Т	T
1 000 000 000 = 10^{9}	гига	Г	G
1 000 000 = 10^{6}	мега	М	M
1 000 = 10^{3}	кило	к	k
100 = 10^{2}	гекто	г	h
10 = 10^{1}	дека	да	da
0,1 = 10^{-1}	деци	д	d
0,01 = 10^{-2}	санти	с	c
0,001 = 10^{-3}	милли	м	m
0,000 001 = 10^{-6}	микро	мк	μ
0,000 000 001 = 10^{-9}	нано	н	n
0,000 000 000 001 = 10^{-12}	пико	п	p
0,000 000 000 000 001 = 10^{-15}	фемто	ф	f
0,000 000 000 000 000 001 = 10^{-18}	атто	а	a

Типография г. Подольск

Зак. № Тираж экз.