



Физика

Формулы для ЕГЭ

доцент каф. Общей и космической физики ИГУ Красов В.И.
2014 г.

Оглавление

- 1. Кинематика**
- 2. Динамика**
- 3. Система тел. Законы сохранения**
- 4. Динамика вращательного движения. Статика.**
- 5. Молекулярная физика**
- 6. Термодинамика**
- 7. Тепловые свойства вещества.**
- 8. Электростатика**
- 9. Постоянный электрический ток.**
- 10. Магнитное поле**
- 11. Электродинамика. Электромагнитные волны.**
- 12. Теория относительности**
- 13. Механические колебания и волны**
- 14. Электромагнитные колебания. Переменный ток.**
- 15. Геометрическая оптика**
- 16. Волновая оптика**
- 17. Квантовая механика**
- 18. Атомная физика**
- 19. Ядерная физика**

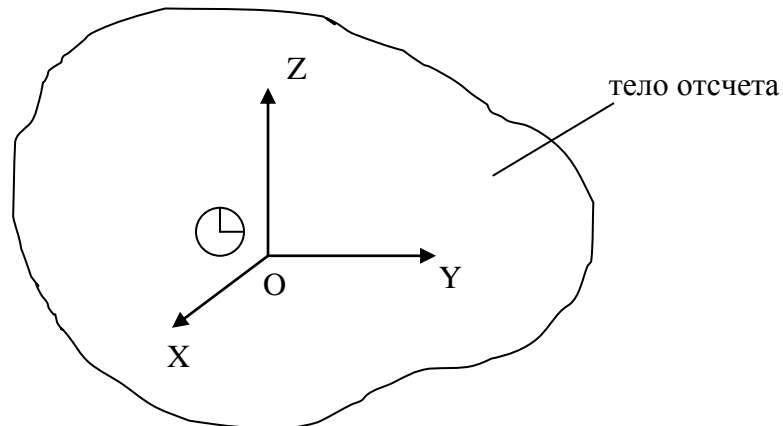
Кинематика

Материальная точка.

Объект, имеющий массу, размерами которого можно пренебречь по сравнению с размерами области, в которой он движется.

Система отсчета.

Используется для определения положения материальной точки в пространстве.

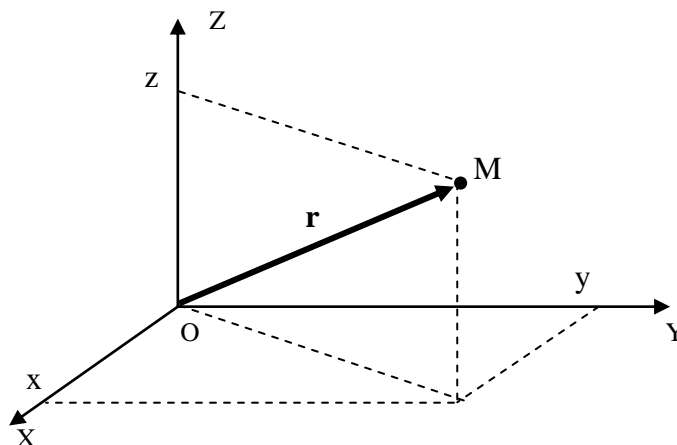


Привязана к телу отсчета, содержит три оси координат OX, OY, OZ для определения пространственных расстояний и часы для определения промежутков времени.

Положение точки в пространстве.

Два способа описания положения точки в пространстве:

1. Радиус вектор \mathbf{r} – вектор, проведенный из начала координат в точку.
2. x, y, z – координаты точки. Проекции радиус вектора на оси координат.

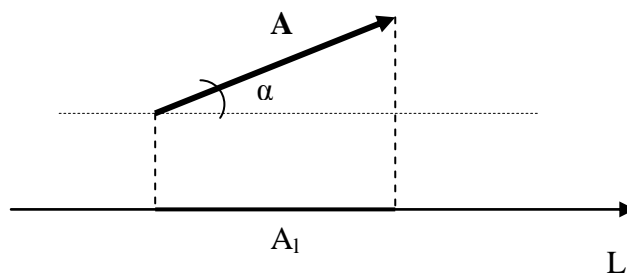


Эти способы описания равноправны $\mathbf{r} = (x, y, z)$.

Свойства векторов.

Вектор – математическая величина, имеющая длину и направление в пространстве. Скаляр не имеет направления в пространстве.

Проекция вектора на направление – расстояние между перпендикулярами на данное направление:



Если дан вектор \mathbf{A} и направление, заданное линией L , проекция вектора \mathbf{A} на это направление будет равно

$$A_l = |\mathbf{A}| \cos \alpha$$

Угол α – угол между направлениями вектора \mathbf{A} и L , $|\mathbf{A}|$ - длина вектора.

Координаты вектора – проекции его на оси координат: $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)$.

Длина вектора определяется по теореме Пифагора через его координаты

$$|\mathbf{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

Сложение векторов

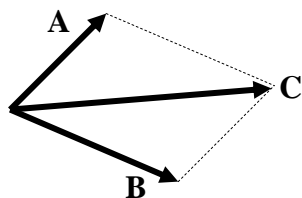
Первый способ - **алгебраический**. Сумма $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ определяется как вектор с координатами:

$$C_x = A_x + B_x$$

$$C_y = A_y + B_y$$

$$C_z = A_z + B_z$$

Второй способ – **геометрический**. Сумма определяется как диагональ параллелограмма, построенного на векторах \mathbf{A} и \mathbf{B} :



Вычитание векторов.

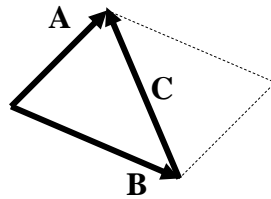
Первый способ - **алгебраический**. Разность $\mathbf{C} = \mathbf{A} - \mathbf{B}$ определяется как вектор с координатами:

$$C_x = A_x - B_x$$

$$C_y = A_y - B_y$$

$$C_z = A_z - B_z$$

Второй способ – **геометрический**. Разность определяется как диагональ параллелограмма, построенного на векторах **A** и **B**, соединяющая концы этих векторов и проведенная от **B** к **A**.

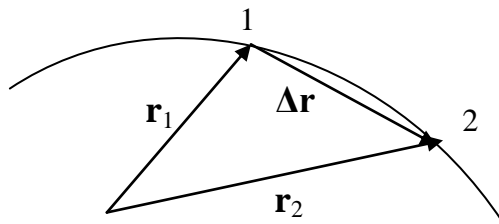


Описание движения материальной точки

Траектория – воображаемая линия, которую точка описывает при своем движении в пространстве.

Путь s – длина траектории (скаляр).

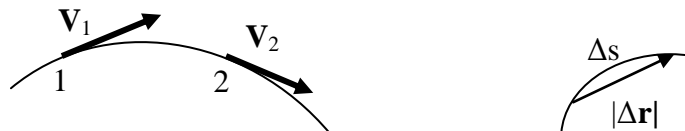
Перемещение – вектор, проведенный из начальной в конечную точку траектории: $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$



Скорость (мгновенная скорость) определяется как производная перемещения по времени:

$$\mathbf{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

Скорость – вектор, направленный по касательной к траектории в каждой точке. На рисунке изображены скорости в двух точках траектории.



Справедливо соотношение: $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}| = \Delta s$, перемещение в пределе по модулю сравнивается с путем.

Поэтому абсолютное значение скорости $|\mathbf{V}| = V = \frac{ds}{dt}$

Средняя скорость – отношение пути ко времени:

$$V_{\text{cp}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Ускорение – скорость изменения скорости:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}}{dt}$$

Тангенциальное (касательное) ускорение характеризует изменение скорости по величине, по величине равно

$$|\mathbf{a}_t| = \frac{d|\mathbf{V}|}{dt}$$

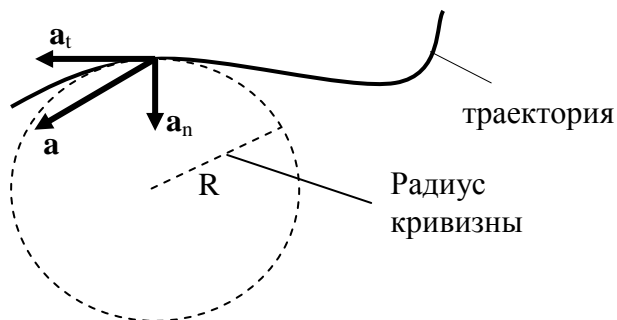
направлено по касательной к траектории.

Нормальное (центростремительное) ускорение характеризует изменение скорости по направлению, по величине равно

$$|\mathbf{a}_n| = \frac{V^2}{R}$$

где R – радиус кривизны траектории. Радиус кривизны – это радиус окружности, которой приблизительно можно описать кусок траектории. Направлено нормальное ускорение перпендикулярно к касательной $\mathbf{a}_n \perp \mathbf{a}_t$.

Полное ускорение $\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_n$. По модулю: $|\mathbf{a}| = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$



Виды движения

Основные расчетные формулы.

1. Прямолинейное равномерное движение

Обозначения: S – путь, t – время, V – скорость. Скорость постоянная:

$$\begin{aligned} V &= \text{const} \\ S &= V \cdot t \end{aligned}$$

2. Прямолинейное равноускоренное движение.

Обозначения: S – путь, t – время, V – скорость, V_0 – начальная скорость, S_0 – точка начала движения, a – ускорение. Ускорение постоянное:

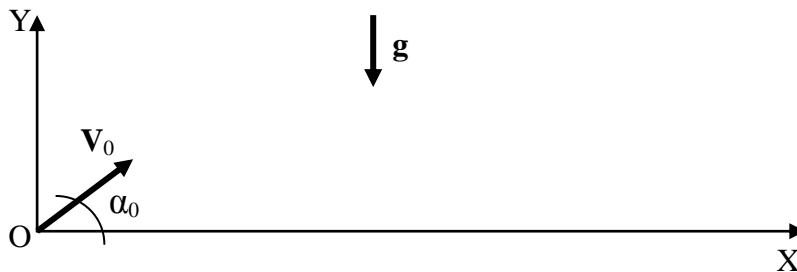
$a = \text{const}$ $V = V_0 + a \cdot t$ $S = S_0 + V_0 \cdot t + \frac{at^2}{2}$

3. Движение под углом к горизонту.

Движение происходит в двух направлениях: по горизонтали (ось OX) оно равномерное, по вертикали (ось OY) – равноускоренное, с ускорением свободного падения ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$).

Обозначения:

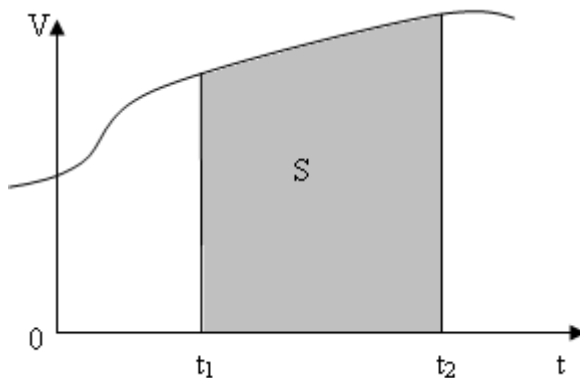
x, y – пути по оси OX и OY , x_0, y_0 – координаты начальной точки (когда $t = 0$),
 V_x, V_y – скорости по оси OX и OY , V_{x0}, V_{y0} – начальные скорости по оси OX и OY .
 φ_0 – угол между направлением начальной скорости и осью OX .



Если положительное направление оси OY направим вертикально вверх:

$V_y = V_{y0} - gt$	$V_x = V_{x0}$
$y = y_0 + V_{y0}t - \frac{gt^2}{2}$	$x = x_0 + V_x t$
$V_{x0} = V_0 \cos \varphi_0$	$V_{y0} = V_0 \sin \varphi_0$

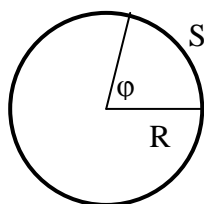
4. Прямолинейное неравномерное движение.



$$V = \frac{dS}{dt} \qquad S = \int_{t_1}^{t_2} V dt$$

Если задана зависимость скорости от времени $V(t)$, то, построив график этой зависимости можно найти путь, посчитав площадь заштрихованной фигуры

5. Движение по окружности.



Обозначения:

φ – угол поворота, R – радиус окружности, S – путь, t – время, ω – угловая скорость, β – угловое ускорение.

$\varphi = \frac{S}{R} \text{ (рад)}$	$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{R} \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{V}{R} \text{ (с}^{-1}\text{)}$	$\beta = \frac{d\omega}{dt} = \frac{a_t}{R} \text{ (с}^{-2}\text{)}$
$a_n = \frac{V^2}{R} = \omega^2 R$		

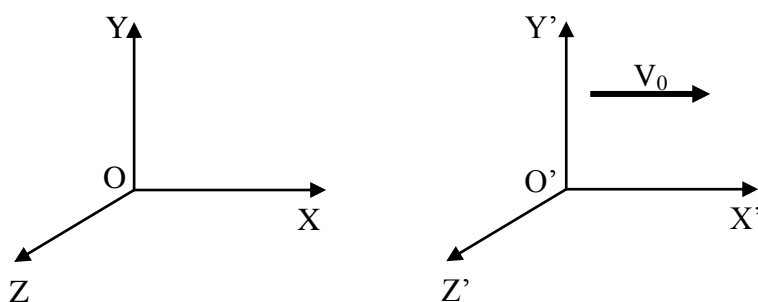
Период вращения – время полного оборота:

$T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi}{\omega}$

Частота вращения – число оборотов в секунду:

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

Переход из одной системы отсчета в другую



Система O – неподвижная (лабораторная), а система O' движется относительно нее со скоростью V_0 . Скорость тела в лабораторной системе V , тогда скорость тела в движущейся системе:

$V' = V - V_0$

Это закон сложения скоростей Галилея. Он является следствием преобразований Галилея и справедлив для скоростей, много меньших скорости света.

Динамика

Законы Ньютона

Первый закон Ньютона (закон инерции).

Существуют системы отсчета, в которых «тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения пока воздействие со стороны других тел не заставит изменить его».

Такие системы отсчета называются инерциальными. Если существует одна инерциальная система отсчета, то любая система отсчета, движущаяся прямолинейно и равномерно относительно первой тоже будет инерциальной.

Пример инерциальной системы отсчета – система, связанная с центром Солнца.

Второй закон Ньютона.

Причина изменения состояния движения тела – воздействие на него другого тела. Мерой воздействия является сила \mathbf{F} – векторная величина. Сила определяется взаимным расположением тел и их скоростями. Вид силы определяется физической природой взаимодействия. Отклик тела на это воздействие в инерциальной системе отсчета характеризуется его ускорением.

«Ускорение, возникающее при воздействии на тело, пропорционально силе воздействия»:

$$ma = F$$

Коэффициент пропорциональности – масса тела m (инертная масса), характеризует его инерционные свойства.

Третий закон Ньютона.



Воздействие одного тела на другое носит характер взаимодействия:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

«Сила действия равно силе противодействия, взятой с обратным знаком.»

Тела воздействуют друг на друга на расстоянии посредством поля. Поле – это область пространства, где в каждой точке на тело действует сила.

Третий закон Ньютона применим лишь в случае, когда взаимодействие тел передается «мгновенно», т.е. можно пренебречь скоростью перемещения тел по сравнению со скоростью распространения их взаимодействия. При конечной скорости распространения взаимодействия третий закон Ньютона

выполняется, если рассматривать взаимодействие тел через поле, которое является материальным переносчиком взаимодействия.

Виды сил

Фундаментальные взаимодействия.

В природе существуют четыре типа фундаментальных взаимодействий:

Дальнодействующие – **гравитационное** и **электромагнитное**. Эти силы действуют в масштабе вселенной.

Короткодействующие – **сильное** (ядро атома) и **слабое** (элементарные частицы).

Все силы, существующие в природе, сводятся к этим четырем.

Современная физика рассматривает единую теорию поля, объединяющую электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия. Гравитационное взаимодействие в настоящее время не описывается единой теорией поля.

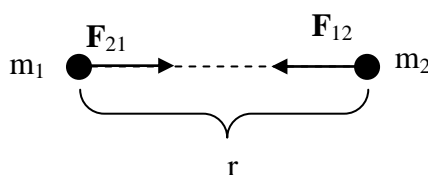
В классической физике рассматриваются только гравитационные и электромагнитные взаимодействия, при которых силы определяются взаимным расстоянием между телами и их относительными скоростями.

Гравитационные силы

Это силы притяжения между телами, обладающими массой. Силы, действующие между двумя материальными точками описываются законом всемирного тяготения:

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

Сила направлена вдоль прямой, соединяющей эти точки:



Принцип эквивалентности: Гравитационная и инертная массы эквивалентны. На этом принципе основана современная теория гравитации – общая теория относительности.

Вблизи поверхности Земли (когда высота h много меньше радиуса Земли) поле можно считать однородным, т.е. одинаковым во всех точках, сила тяжести равна:

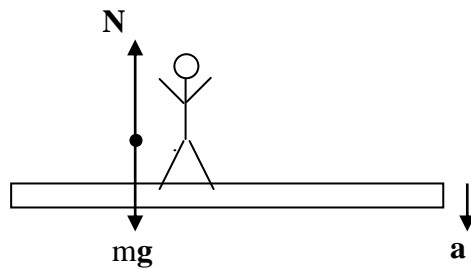
$$|\mathbf{F}| \approx G \frac{mM_3}{R_3^2} = mg$$

Ускорение свободного падения (не зависит от массы тела):

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2} = 9,8 \text{ м/с}^2$$

Вес тела – сила, с которой тело давит на опору или подвес.

Невесомость – состояние тела, движущегося только под действием силы тяжести.



На рисунке человек стоит на платформе. На человека действуют две силы – сила тяжести (mg) и сила реакции опоры (N). Сила реакции опоры N по третьему закону Ньютона равна по модулю силе, с которой человек действует на опору, то есть весу человека. Если человек покоится вместе с платформой ($a = 0$), то по второму закону Ньютона:

$$N - mg = 0 \quad \text{и} \quad mg = N.$$

На измерении силы реакции N основан метод взвешивания тел.

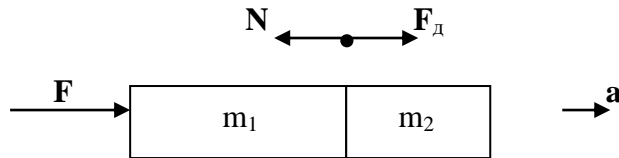
Если человек с платформой движется с ускорением a , то $N - mg = ma$, $N = mg - ma = m(g - a)$, сила реакции и, соответственно вес человека меньше, при $a = g$ наступает состояние невесомости ($N = 0$). При этом на человека действует только сила тяжести mg .

Контактные силы.

Это силы, возникающие при контакте двух тел (столкновении, давлении, скольжении и т.д.). Это силы имеют электрическую природу и сводятся к взаимодействию атомов, состоящих из заряженных частиц. В контактных силах участвует огромное количество частиц и их описание возможно только феноменологически.

Силы давления и реакции.

Если на тело 1 подействовать силой F , то часть этой силы передается на тело 2 с помощью силы давления F_d . Соответственно тело 2 действует на тело 1 с помощью силы реакции N ($N = F_d$ по третьему закону Ньютона). Силы давления и реакции перпендикулярны поверхности соприкасающихся тел.



Расчитаем силы. Система двух тел движется как одно целое под действием силы \mathbf{F} с ускорением \mathbf{a} .

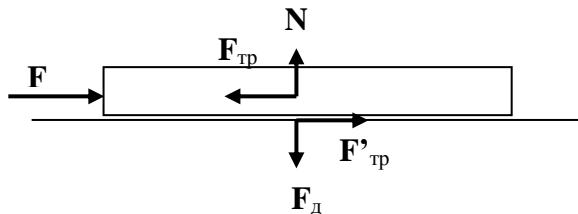
$$(m_1 + m_2)a = F$$

$$m_2 a = F_о$$

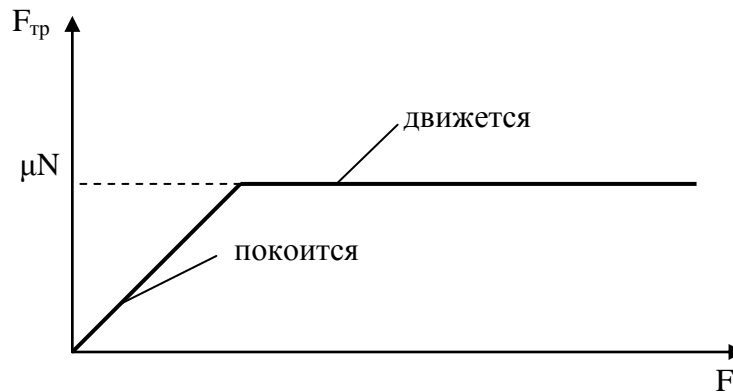
$$m_1 a = F - N$$

Отсюда: $F_о = F \frac{m_2}{m_1 + m_2}$; $N = F \frac{m_2}{m_1 + m_2}$

Сила трения (сухого)



При передвижении тела под действием силы \mathbf{F} по поверхности опоры возникает сила трения $\mathbf{F}_{тр}$, действующая со стороны опоры на первое тело, и



тормозящая его. Такая же по величине сила действует на опору со стороны движущегося тела. Причина возникновения трения – неровности поверхностей взаимодействующих тел, которые при движении цепляются друг за друга. Силы трения параллельны поверхности соприкасающихся тел.

Сила трения $\mathbf{F}_{тр}$ зависит от силы \mathbf{F} , сдвигающей тело по поверхности другого тела.

Сила трения на растущем участке зависимости по модулю точно равна силе \mathbf{F} и противоположна по направлению. Эта сила трения называется сила трения покоя. При этом тело покоится. При увеличении силы \mathbf{F} растет и сила трения до тех пор пока не достигнет максимального значения.

$$F_{тр} = \mu N$$

В дальнейшем рост силы трения прекращается и тело начинает двигаться (скользить). В этом случае сила трения называется силой трения скольжения.

Максимальное значение силы трения пропорционально силе давления тела на опору ($F_{д} = N$). Коэффициент пропорциональности μ называется коэффициентом трения. Он определяется материалом соприкасающихся тел и качеством их поверхностей.

Вязкое трение.

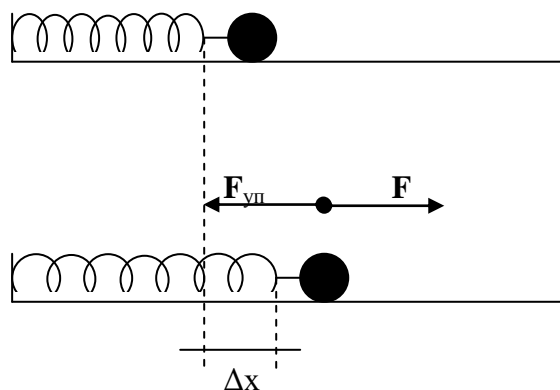
Вязкое трение возникает при движении твердого тела в жидкости или газе. Причина – взаимодействие молекул жидкости и тела на границе раздела. При этом сила трения зависит от скорости движения тела V относительно жидкости, при небольших скоростях (т.н. ламинарное течение) определяется формулой:

$$F_{mp} = kV$$

При больших скоростях возникает турбулентное течение, и сила трения резко возрастает.

Упругая сила.

Упругая сила возникает при упругой деформации (сжатии, растяжении, перекручивании и т.д.) тела. Эта сила препятствует действию внешней силы, вызывающей деформацию. Деформация считается упругой, если после прекращения действия внешней силы тело восстанавливает первоначальную форму и объем. Любая малая деформация считается упругой. Упругая сила пропорциональна деформации и подчиняется закону Гука:



Любая малая деформация считается упругой. Упругая сила пропорциональна деформации и подчиняется закону Гука:

$$F = -k\Delta x$$

Коэффициент жесткости k зависит от материала и формы пружины.

При последовательном соединении нескольких пружин:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots$$

При параллельном соенинении нескольких пружин:

$$k = k_1 + k_2 + \dots$$

Силы инерции.

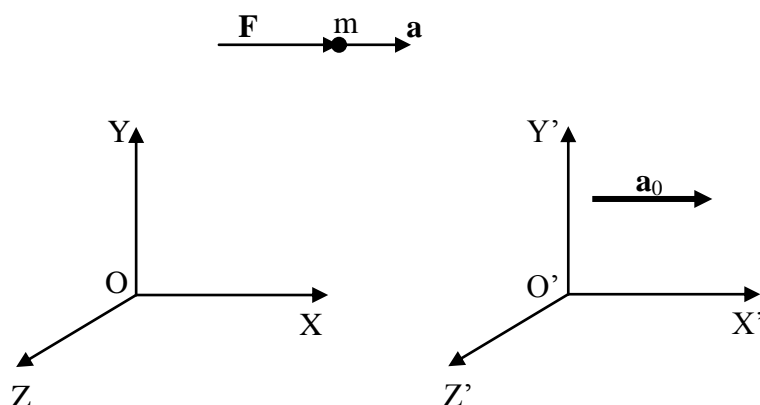
Согласно преобразованиям Галилея расстояние между телами и их относительные скорости не зависят от движения системы отсчета и не меняются при переходе к движущейся системе. Поэтому и сила взаимодействия не изменяется при таком переходе.

Рассмотрим систему отсчета O' движущуюся с ускорением \mathbf{a}_0 относительно лабораторной системы O . Такая система отсчета будет неинерциальной. Тело массы m под действием силы \mathbf{F} в лабораторной системе приобретает ускорение по второму закону Ньютона:

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}$$

В движущейся системе ускорение тела будет равно $\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{a}_0$. Отсюда:

$$m(\mathbf{a}' + \mathbf{a}_0) = \mathbf{F} \quad \text{и} \quad m\mathbf{a}' = \mathbf{F} - m\mathbf{a}_0 = \mathbf{F} + \mathbf{F}_и.$$



Как видно в записи второго закона Ньютона в неинерциальной системы отсчета появляется дополнительный член:

$$\mathbf{F}_и = -m\mathbf{a}_0$$

$\mathbf{F}_и$ называют силой инерции. Она направлена в сторону, противоположную ускорению системы. Эта сила не является результатом взаимодействия двух тел и не имеет физической природы, но ее введение позволяет использовать второй закон Ньютона для описания движения тела в неинерциальной системе отсчета. Отсутствие веса в космическом корабле, вращающемся вокруг Земли можно считать результатом того, что сила тяжести компенсируется силой инерции.

Центробежная сила инерции появляется во вращающейся системе отсчета:

$$F_ц = -m\omega^2 R$$

Она направлена от центра. Благодаря зависимости от массы тела и эквивалентности инертной и гравитационной масс сила инерции похожа на силу тяжести.

Система тел. Законы сохранения

Импульс тела

Импульсом тела называют векторную величину

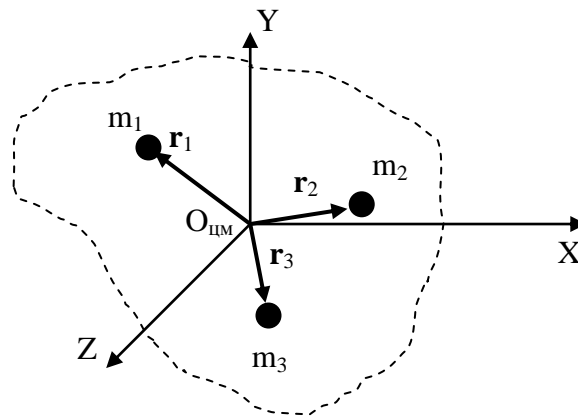
$$\mathbf{p} = m\mathbf{V}$$

Второй закон Ньютона, записанный через импульс тела:

$$m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{V})}{dt} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$$

Система материальных точек.

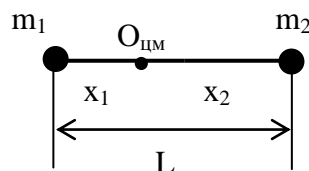
Любое тело можно рассматривать как систему материальных точек, взаимодействующих между собой. Силу, действующую на тело, можно представить как сумму сил, действующих на каждую материальную точку, входящую в систему.



Центр масс системы определяется как точка, для которой справедливо соотношение:

$$m\mathbf{r}_1 + m\mathbf{r}_2 + \dots = 0$$

Радиус векторы частиц, входящих в систему, отсчитываются из центра масс $O_{\text{ЦМ}}$. Для двух материальных точек, расположенных вдоль одной прямой это выражение записывается как: $-m_1x_1 + m_2x_2 = 0$.



Расстояния до центра масс определяются из системы уравнений:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad x_1 + x_2 = L$$

Поступательное движение системы можно рассматривать как движение одного тела с суммарной массой, сосредоточенной в центре масс.

Суммарный импульс такой системы определяется как сумма импульсов составляющих ее материальных точек:

$$\mathbf{P} = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 + \dots = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots = (m_1 + m_2 + \dots) \mathbf{V}_{\text{цм}} = M \mathbf{V}_{\text{цм}}$$

Он записывается как суммарная масса системы, умноженная на скорость центра масс.

Скорость центра масс при этом определяется как:

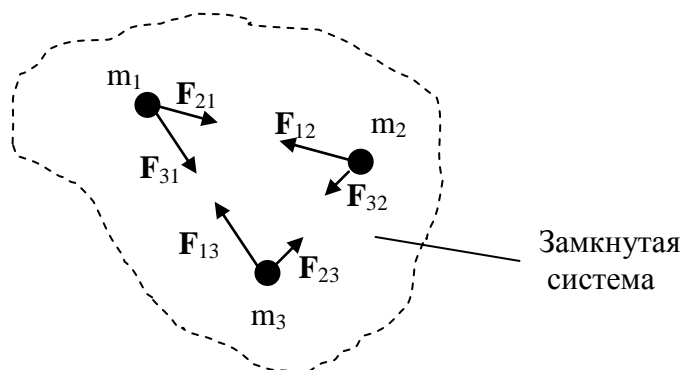
$$\mathbf{V}_{\text{цм}} = \frac{\mathbf{P}}{M} = \frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots}{M} = \frac{m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

Второй закон Ньютона для системы материальных точек записывается как:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots = \mathbf{F}$$

Изменение импульса системы определяется суммой всех сил, действующих на материальные точки, входящие в систему.

Замкнутой системой называется система, на которую не действуют внешние силы. Между частицами в такой системе существуют только внутренние силы взаимодействия.



Сумма всех сил, действующих в такой системе, равна нулю.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{21}) + (\mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{31}) + (\mathbf{F}_{23} + \mathbf{F}_{32}) = 0 + 0 + 0 = 0$$

Это следует из того, что в каждой скобке стоят силы действия и противодействия, равные друг другу по величине и противоположные по направлению, согласно третьему закону Ньютона. Этот вывод справедлив для любой замкнутой системы, состоящей из любого количества материальных точек.

Закон сохранения импульса.

Суммарный импульс замкнутой системы сохраняется. Это следует из второго и третьего законов Ньютона, так как сумма всех сил, действующих на такую систему равна нулю.

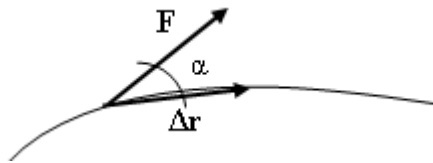
$$\mathbf{P} = \sum \mathbf{p}_i = \text{const}$$

Следствием закона сохранения импульса является невозможность привести в движение тело только за счет внутренних сил («парадокс» Мюнхаузена).

Работа и энергия

Работа силы на участке траектории движения тела определяется выражением:

$$\Delta A = |\mathbf{F}| \cdot |\Delta \mathbf{r}| \cdot \cos \alpha = |\mathbf{F}| \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha$$



Работа – скалярная величина. Для вычисления работы при перемещении тела от точки 1 до точки 2 вся траектория разбивается на небольшие участки Δs_i . На каждом участке подсчитывается работа ΔA_i , затем все работы суммируются $A_{12} = \sum \Delta A_i$. Если тело движется по прямой линии и сила не меняется, то

$$A = FS \cos \alpha$$

Мощность – работа выполняемая за единицу времени:

$$N = \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Если сила не меняется во времени, то $N = F \frac{\Delta s}{\Delta t} \cos \alpha = Fv \cos \alpha$

Кинетической энергией тела называют величину

$$E_k = \frac{mV^2}{2}$$

Работа силы на участке траектории от точки 1 до точки 2 равна приращению кинетической энергии тела (это следствие второго закона Ньютона для материальной точки):

$$A_{12} = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1}$$

Поскольку работа может быть положительной и отрицательной (зависит от знака $\cos\alpha$), то приращение кинетической энергии может быть положительным (тело ускоряется) или отрицательным (тело замедляется).

Потенциальными называются поля, в которых работа сил поля при перемещении тела не зависит от траектории движения, а определяется только начальной и конечной точками. Все фундаментальные взаимодействия потенциальны.

Работа при перемещении тела в таких полях из точки 1 в точку 2, взятая с обратным знаком, определяет изменение потенциальной энергией.

$$A_{12} = -\Delta E_n = -(E_{n2} - E_{n1}) = E_{n1} - E_{n2}$$

Это формула является определением понятия потенциальной энергии. Физический смысл имеет только разность потенциальных энергий в двух точках поля. Для определения потенциальной энергии в некоторой точке поля надо договориться относительно какой точки эта энергия отсчитывается (т.е. где $E_n = 0$).

В гравитационном поле вблизи поверхности Земли

$$E_n = mgh$$

Потенциальная энергия упругой деформации

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

До сих пор речь шла о движении тела в поле, источник которого неподвижен (как, например движение камня вблизи поверхности Земли). В реальности существует взаимодействие двух тел, при котором силы действуют как на источник поля, так и на пробное тело, движущееся в поле.

Потенциальная энергия взаимодействия двух тел определяется как работа, совершаемая силами взаимодействия при их «растаскивании» на бесконечно большое расстояние друг от друга, когда взаимодействие между ними исчезает. В этом случае потенциальная энергия взаимодействия является характеристикой пары взаимодействующих тел.

Закон сохранения энергии

При движении материальной точки в потенциальном поле неподвижного источника сумма кинетической и потенциальной энергии сохраняется:

$$A_{12} = E_{k2} - E_{k1} = E_{n1} - E_{n2}, \text{ отсюда: } E_{k2} + E_{n2} = E_{k1} + E_{n1} = \text{const}$$

Полной энергией системы материальных точек считается сумма кинетической энергии всех частиц системы плюс потенциальная энергия их взаимодействия.

$$E = \sum \frac{m_i V_i^2}{2} + U_{\text{вз}}$$

Для замкнутой системы полная энергия сохраняется.

В отличие от фундаментальных взаимодействий сила трения не является потенциальной. Работа силы трения всегда зависит от пути, по которому тело движется.

При наличии силы трения полная энергия не сохраняется. Ее изменение (уменьшение) при этом равно работе силы трения.

$$\Delta E = A_{\text{тр}}$$

Механическая энергия при этом переходит во внутреннюю энергию тела, вызывая его нагрев (энергия уходит в «тепло»).

Абсолютно упругий удар шаров

При абсолютно упругом ударе выполняются законы сохранения импульса и энергии:

$$\begin{aligned} m_1 \mathbf{V}_1 + m_2 \mathbf{V}_2 &= m_1 \mathbf{V}'_1 + m_2 \mathbf{V}'_2 \\ \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} &= \frac{m_1 V'^2_1}{2} + \frac{m_2 V'^2_2}{2} \end{aligned}$$

Абсолютно неупругий удар

При абсолютно неупругом ударе два шара после соударения слипаются и движутся как одно целое. При этом выполняется только закон сохранения импульса. Энергия не сохраняется, т.к. в результате деформации часть механической энергии уходит во внутреннюю энергию (тепло).

$$m_1 \mathbf{V}_1 + m_2 \mathbf{V}_2 = (m_1 + m_2) \mathbf{V}'$$

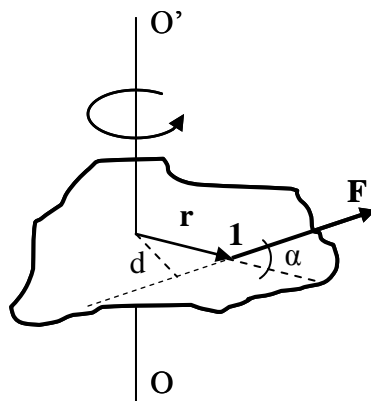
Динамика вращательного движения. Статика.

Момент силы.

Вращаться тело может под действием силы \mathbf{F} , приложенной к точке 1. Пусть вращение происходит вокруг оси OO' , точка 1 расположена на расстоянии r от оси вращения. При этом сила \mathbf{F} создает момент силы, равный

$$M = Fr \sin \alpha = Fd$$

α – угол между вектором силы \mathbf{F} и радиус-вектором \mathbf{r} точки приложения силы (точка 1 на рисунке). Положительное значение M соответствует раскручиванию тела по часовой стрелке, отрицательное – против часовой стрелки.



Плечо силы – это кратчайшее расстояние от оси вращения до линии, вдоль которой действует сила.

$$d = r \sin \alpha$$

Момент инерции.

При вращении твердого тела, оно обладает кинетической энергией.

Эту энергию можно посчитать, представив тело как систему n материальных точек:

$$\begin{aligned} E_{\text{сп}} &= \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \dots + \frac{m_n v_n^2}{2} = \frac{m_1 r_1^2 \omega^2}{2} + \frac{m_2 r_2^2 \omega^2}{2} + \dots + \frac{m_n r_n^2 \omega^2}{2} = \\ &= (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2) \frac{\omega^2}{2} = \frac{I \omega^2}{2} \end{aligned}$$

При выводе учитывалось, что все точки твердого тела вращаются с одной угловой скоростью ω . Иначе тело при вращении деформировалось бы.

Полученная формула по форме напоминает выражение для кинетической энергии материальной точки, только вместо скорости стоит угловая скорость, а вместо массы – величина I , которая называется моментом инерции тела.

Момент инерции

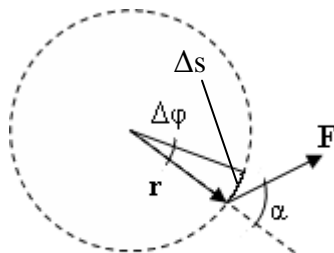
$$I = m_1 r_1^2 + m_1 r_1^2 + \dots + m_n r_n^2 = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

характеризует распределение массы на разных радиусах от оси вращения. При большом количестве точек сумма превращается в интеграл. Для симметричных тел вращения (шар, цилиндр) момент инерции вычислен.

Второй закон Ньютона для вращательного движения

При повороте тела на угол $\Delta\varphi$ сила \mathbf{F} совершает работу

$$\Delta A = F \sin \alpha \Delta s = F \sin \alpha r \Delta\varphi = M \Delta\varphi$$



Эта работа идет на увеличение кинетической энергии вращения:

$$M \Delta\varphi = \Delta(I\omega^2) = I \Delta(\omega^2)$$

Разделим обе части уравнения на Δt , промежуток времени, за который тело повернулось на угол $\Delta\varphi$:

$$M \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = I \frac{\Delta(\omega^2)}{\Delta t}$$

Продифференцируем правую часть

$$M \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = I \frac{\Delta(\omega^2)}{\Delta t} = 2I\omega \frac{\Delta(\omega)}{\Delta t}$$

Подставим $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \omega$ и $\frac{\Delta(\omega)}{\Delta t} = \beta$ - угловое ускорение, после преобразований получим:

$$M = I \frac{d\omega}{dt} = I\beta$$

Момент силы M задает телу угловое ускорение β .

Это уравнение является аналогом второго закона Ньютона для вращательного движения.

Закон сохранения момента импульса

Моментом импульса материальной точки называется величина $l = mVr \sin \alpha$, где α – это угол между вектором скорости \mathbf{V} и радиус-вектором \mathbf{r} . Если материальная точка вращается по окружности, то $\alpha = \pi/2$ и выражение для момента импульса: $l = mVr = mr^2 \omega$.

Для твердого тела, складывая моменты импульсов всех точек системы, получим:

$$L = (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2) \omega = I \omega$$

Момент импульса – вектор. Он направлен вдоль оси вращения.

Следствием законов Ньютона является закон сохранения момента импульса: момент импульса замкнутой системы сохраняется.

Для твердого тела это означает, что после прекращения действия силы (когда $M = 0$) тело будет продолжать вращаться с постоянной угловой скоростью.

Статика

Статика изучает условия равновесия тел, т.е. их неподвижности. Для материальных точек условием равновесия является отсутствие сил, действующих на тело или равенство нулю равнодействующей всех сил. В случае, если материальная точка взаимодействует с n телами и на нее действуют n сил, то условие равновесия можно записать как:

$$F_1 + F_2 + \dots + F_n = 0$$

Для тела конечных размеров равенство нулю равнодействующей всех сил означает, что центр масс тела неподвижен, но при этом возможно еще вращательное движение тела относительно центра масс.

Чтобы вращение не происходило, необходимо равенство нулю суммы моментов всех сил, действующих на тело.

Таким образом условие равновесия тела:

- 1) Равнодействующая всех сил равна нулю.
- 2) Сумма моментов всех сил равна нулю.

Для неподвижного тела моменты сил можно определять относительно любой оси вращения.

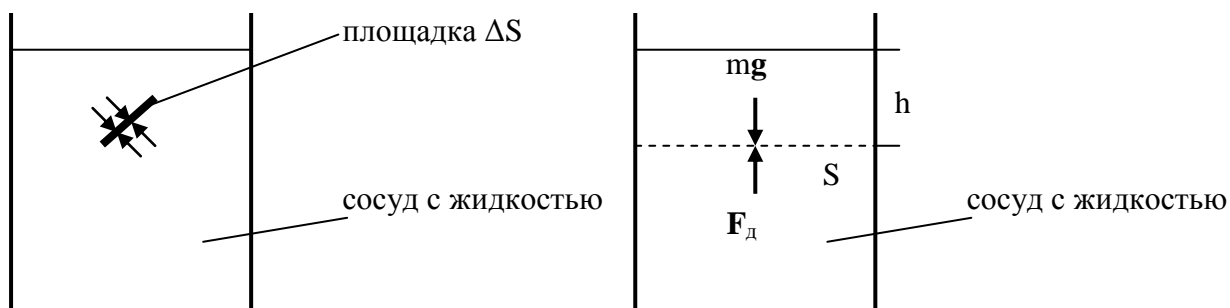
Гидростатика

Жидкость (и газ) взаимодействует с погруженным в нее телом, оказывая на него давление. Причиной возникновения давления является бомбардировка поверхности тела движущимися атомами жидкости или газа. Если площадь поверхности тела – S , а сила давления – F_d , то давление P при этом определяется выражением:

$$P = \frac{|F_d|}{S}$$

Сила давления перпендикулярна поверхности тела. Давление – величина скалярная.

Закон Паскаля – давление жидкости или газа передается во всех направлениях без изменения (давление на небольшую площадку ΔS не зависит от ее ориентации).



На высоте h на горизонтальную площадку S сверху действует сила mg – вес жидкости в объеме $V = hS$:

$$mg = \rho_{ж} Vg = \rho_{ж} hSg$$

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости. Снизу эта сила уравнивается силой давления $F_{д}$:

$$F_{д} = PS$$

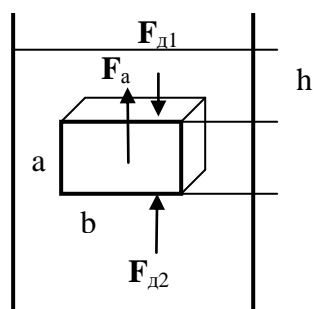
Приравнивая эти выражения и сокращая на S , получим:

$$P = \rho_{ж} gh$$

Эта формула описывает давление в жидкости (газе) в зависимости от глубины погружения.

Закон Архимеда.

Пусть в воду погружено тело, имеющее форму прямоугольного параллелепипеда высотой a и шириной b . Площадь основания у него – S . Верхняя грань погружена на глубину h .



На верхнюю грань действует сила давления $F_{д1} = S \cdot \rho_{ж} gh$. На нижнюю грань действует сила давления: $F_{д2} = S \cdot \rho_{ж} g(h + a)$. Сила давления на нижнюю грань больше, так как она находится глубже. В результате равнодействующая сил давления направлена вверх и равна:

$$F_a = F_{д2} - F_{д1} = \rho_{ж} g(Sh) = \rho_{ж} gV$$

В этой формуле $V = Sh$ – объем параллелепипеда, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости.

Сила, действующая на тело, погруженное в жидкость равна весу жидкости, вытесненной телом и направлена вверх. Она называется выталкивающей силой или силой Архимеда F_a .

Если выталкивающая сила больше, чем вес тела, то тело всплывает $\rho_{ж} Vg > mg = \rho_{т} Vg$. Отсюда условие плавания тела:

$$\rho_{ж} > \rho_{т}$$

Тело тонет, если

$$\rho_{ж} < \rho_{т}$$

Молекулярная физика

Идеальный газ

Идеальный газ определяется как система огромного количества молекул (материальных точек), находящихся в непрерывном хаотическом движении и не взаимодействующих друг с другом на расстоянии. При этом центр масс системы может оставаться неподвижным.

Взаимодействие возможно только при столкновении молекул друг с другом. Столкновение при этом рассматривается как упругое столкновение шаров, при котором молекулы передают друг другу часть своей кинетической энергии («обмениваются» энергией). Суммарная энергия системы при этом не меняется.

Температура газа.

Полная энергия системы идеального газа (ее еще называют внутренней энергией газа) определяется только суммой кинетических энергий всех молекул (потенциальная энергия взаимодействия равна нулю).

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул связана с температурой газа:

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT$$

k – постоянная Больцмана.

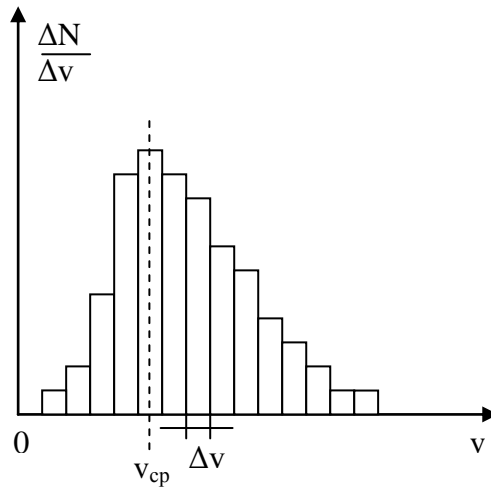
Температура газа является мерой средней кинетической энергии молекул.

Понятие температуры определяется только для системы многих тел (молекул), хаотически движущихся. Температура одной молекулы не имеет смысла.

Распределение молекул по скоростям.

Скорости молекул газа различны и постоянно меняются в результате столкновений. Скорость отдельной молекулы может принимать любое значение от нуля и почти до бесконечности. Но большинство из них имеют скорости, лежащие вблизи некоторого среднего значения. Вообще, если взять число молекул ΔN , имеющих скорости в диапазоне $\Delta v = v_1 - v_2$, то число таких молекул не будет изменяться со временем, но оно будет разным в зависимости от того, где на оси скоростей мы отложим диапазон Δv . Например, вблизи $v_{\text{ср}}$ таких молекул будет больше. В конце концов за счет многочисленных столкновений образуется универсальное распределение по скоростям (примерный вид см. на рисунке). Его вид определяется только температурой газа. Оно носит название распределения Максвелла.

На рисунке количество молекул ΔN определяется площадью прямоугольника с основанием Δv .



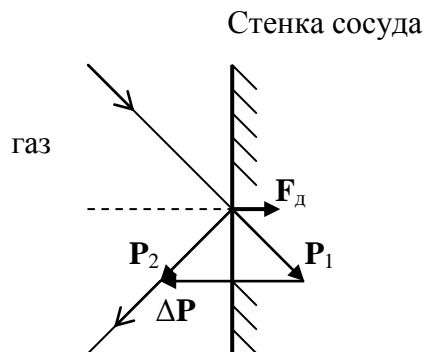
Зная среднюю кинетическую энергию молекул, можно определить средне-квадратичную скорость:

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{2\bar{\varepsilon}_k}{m}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

m – масса молекулы.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Газ находится в сосуде, объемом V , с которым он взаимодействует, оказывая давление на стенки сосуда. Причиной возникновения давления является бомбардировка стенок молекулами газа.



На рисунке показана траектория движения молекулы, сталкивающейся со стенкой сосуда. При упругом соударении молекулы со стенкой импульс молекулы изменяется $\Delta P = P_2 - P_1$. Из рисунка видно, что вектор ΔP направлен перпендикулярно стенке сосуда. Если соударение происходит за время τ , то сила, действующая на молекулу со стороны стенки $F = \frac{\Delta P}{\tau}$, также направлена перпендикулярно стенке внутрь сосуда. По третьему закону Ньютона на сосуд со стороны молекулы действует сила давления, по величине равная $|F_d| = |F|$, направленная в противоположную сторону, т.е. наружу перпендикулярно

стенке сосуда. Все молекулы, соударяющиеся со стенкой, оказывают на нее суммарную силу давления, направленную наружу перпендикулярно стенке сосуда. Если эту силу разделить на площадь стенки, то можно получить давление газа. Расчет дает формулу для давления:

$$P = nkT$$

n – концентрация молекул, то есть число молекул в единице объема газа, m_1 – масса одной молекулы.

Это уравнение называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории.

Вывод формулы

$\Delta p = p_2 - p_1$ $\Delta p = 2p_x = 2mv_x$ Если за время Δt со стенкой сталкиваются N_x частиц, то суммарный импульс, который передается стенке

$\Delta p = 2mN_x v_x$. Средняя сила давления $F_0 = \frac{2mN_x v_x}{\Delta t}$. Эта сила создает

давление $P = \frac{F_0}{S} = \frac{2mN_x v_x}{\Delta t S}$. S – площадь стенки. За время Δt о стенку

столкнутся все молекулы, движущиеся по X и находящиеся в тонком слое на расстоянии $\Delta x = v_x \Delta t$ от стенки. Количество этих частиц

$N_x = \frac{1}{2} n S \Delta x = \frac{1}{2} n S v_x \Delta t$. n обозначает число молекул в единице объема.

Здесь учтено, что половина всех молекул движутся к стенке, вторая половина – от нее. Тогда

$$P = \frac{2mN_x v_x}{\Delta t S} = \frac{mnSv_x \Delta t v_x}{\Delta t S} = mnv_x^2$$

Для средней скорости молекул можно записать

$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 = 3\bar{v}_x^2$. Отсюда

$$P = mnv_x^2 = \frac{mn\bar{v}^2}{3} = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_k. \text{ Учитывая, что } \bar{\epsilon}_k = \frac{3}{2} kT, \text{ окончательно}$$

но получим

$$P = nkT$$

Если μ – молярная масса газа, m – масса газа, ν – число молей ($\nu = \frac{m}{\mu}$),

N_A – число Авогадро – количество молекул в одном моле вещества, V – объем газа, то после простых преобразований это уравнение превращается в:

$$P = \frac{N}{V} kT = \frac{N_A \cdot \nu}{V} kT = \frac{(N_A k) m}{V \mu} T = \frac{1}{V} \frac{m}{\mu} RT$$

Отсюда получим уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu}RT$$

Универсальная газовая постоянная R определяется как произведение постоянной Больцмана k на число Авогадро N_A :

$$R = kN_A$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона называют уравнением состояния идеального газа. Оно связывает между собой три газовых параметра: P , V , T . Для одного моля газа:

$$PV = RT$$

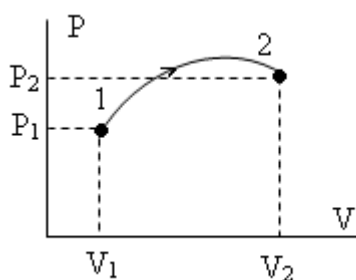
Газовые процессы

Состояние идеального газа однозначно задается двумя параметрами из трех (P , V , T). Третий определяется из уравнения Менделеева-Клапейрона.

Удобно состояние газа изображать на диаграмме в виде точки. В качестве осей можно выбрать P и V (PV - диаграмма), P и T (PT - диаграмма) или V и T (VT - диаграмма).

Под действием разных причин газ может переходить из одного состояния в другое. При этом меняются его параметры – объем V , давление P или температура T . Такой газовый процесс на диаграмме изображается в виде линии

На рисунке газ переходит из состояния 1 (P_1 , V_1) в состояние 2 (P_2 , V_2). Процесс происходит по линии $1 \rightarrow 2$.



Изопроцессы.

Изопроцессами называют такие процессы перехода газа из одного состояния в другое, при которых один из газовых параметров (P , V или T) остается постоянным.

1. Изобарный процесс – остается неизменным давление газа. Изменение двух других параметров находим из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

Это закон Гей-Люссака.

2. Изохорный процесс – остается неизменным объем газа:

$$\frac{P}{T} = \text{const}$$

Это закон Шарля.

3. Изотермический процесс – остается неизменной температура газа:

$$PV = \text{const}$$

Это закон Бойля-Мариотта.

Смесь газов.

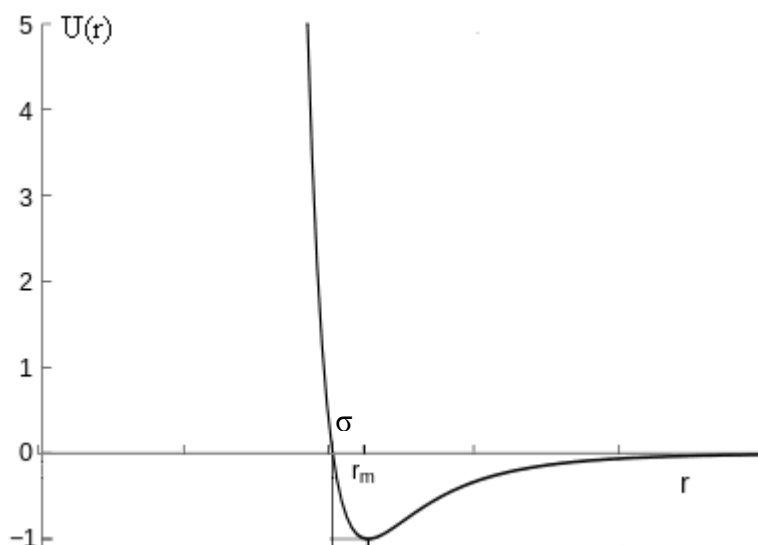
Если в сосуде находится смесь газов, то уравнение Менделеева-Клапейрона описывает состояние каждого сорта газа в отдельности. Вместо давления смеси в него при этом подставляют парциальное давление каждого сорта газа. Под парциальным давлением понимается давление, какое было бы в сосуде, если бы там находился газ только одного сорта без других газов смеси.

Справедлив закон Дальтона – давление смеси газов равно сумме парциальных давлений.

$$P = P_1 + P_2 + \dots$$

Реальные газы.

Реальный газ демонстрирует свойства идеального только при больших температурах и низких давлениях (горячий разреженный газ). Для описания реальных газов в нормальных условиях необходимо учитывать конечные размеры молекул и взаимодействие между ними на больших расстояниях.



Взаимодействие молекул (атомов) описывается потенциалом Леонарда-Джонса (это потенциальная энергия взаимодействия):

$$U(r) = \frac{a_1}{r^{12}} - \frac{a_2}{r^6}$$

r – расстояние между центрами взаимодействующих молекул. Расстояние $r = r_m$ (см. рисунок) соответствует минимальной потенциальной энергии, т.е. положению равновесия. Именно это положение занимают атомы в кристаллической решетке. При больших $r > r_m$ наблюдается слабое притяжение между атомами, при $r < r_m$ - сильное отталкивание. Поэтому атомы невозможно сблизить на меньшее расстояние.

С большей точностью состояние реального газа описывает вместо уравнения Менделеева-Клапейрона уравнение Ван-дер-Ваальса (для одного моля газа):

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT$$

a и b – коэффициенты Ван-дер-Ваальса, разные для разных газов.

При одном и том же давлении объем, занимаемый реальным газом меньше, т.е. плотность реального газа больше, чем идеального

Термодинамика

Внутренняя энергия идеального газа

Внутренняя энергия газа определяется как полная энергия замкнутой системы атомов. Центр масс считается неподвижным и отсутствуют внешние силы. В этом случае внутренняя энергия равна сумме кинетической энергии всех молекул газа и потенциальной энергии их взаимодействия:

$$U = \sum_i (\varepsilon_k + \varepsilon_{вз})_i$$

Если молекулы тоже считать сложными системами, то в эту сумму надо добавить энергию связи атомов в молекуле ($\varepsilon_{\text{мол}}$), энергию связи частиц в атомах ($\varepsilon_{\text{ат}}$), энергию связи частиц в ядрах атомов ($\varepsilon_{\text{яд}}$) и так далее. Но если при изменении состояния газа не происходит ядерных превращений, ионизации атомов, диссоциации молекул, то эта добавка меняться не будет и ее можно не рассматривать при расчетах.

Для идеального газа $\varepsilon_{вз} = 0$ (нет взаимодействия между молекулами) и внутренняя энергия определяется только кинетической энергией хаотического движения молекул ε_k . Для внутренней энергии идеального газа можно записать:

$$U = \sum_i (\varepsilon_k)_i = N\bar{\varepsilon}_k$$

Средняя кинетическая энергия молекулы может быть записана в виде:

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{m(\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2)}{2} = \frac{m\bar{v}_x^2}{2} + \frac{m\bar{v}_y^2}{2} + \frac{m\bar{v}_z^2}{2} = 3\frac{m\bar{v}_x^2}{2}$$

Эта запись означает, что в среднем энергии движения молекулы вдоль трех осей координат равны. Возможность для молекулы двигаться независимо вдоль трех осей координат означает наличие у молекулы трех степеней свободы.

Равенство энергий, приходящихся в среднем на каждую степень свободы является одним из основных положений молекулярно-кинетической теории.

Доля энергии, приходящаяся на каждую степень свободы равна $\frac{kT}{2}$.

Для одноатомных молекул число степеней свободы совпадает с числом независимых координат и равно трем (поступательные степени свободы), поэтому:

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2}kT$$

Для двухатомных молекул к трем поступательным степеням свободы прибавляются еще две вращательные и поэтому для двухатомных молекул:

$$\bar{\varepsilon}_\kappa = \frac{3+2}{2}kT$$

Для многоатомных молекул вращательных степеней свободы – три:

$$\bar{\varepsilon}_\kappa = \frac{3+3}{2}kT$$

При увеличении температуры, дополнительно могут появляться колебательные степени свободы, степени свободы, связанные с диссоциацией молекул, ионизацией и так далее.

В общем случае, если число степеней свободы равно i , то

$$\bar{\varepsilon}_\kappa = \frac{i}{2}kT$$

Поэтому внутренняя энергия идеального газа равна:

$$U = \frac{i}{2}NkT = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$$

Первое начало термодинамики.

Изменить внутреннюю энергию газа можно двумя способами – совершая над ним работу $\Delta A'$ (сжимая внешними силами), и нагревая через механизм теплопередачи. В обоих случаях увеличивается температура.

Теплопередача - это непосредственная передача энергии от горячего тела к холодному через столкновения атомов на границе раздела двух тел. При таких столкновениях быстро движущийся атом передает часть своей энергии медленному, сам при этом замедляясь. Энергия, которая передается таким образом называется количеством тепла ΔQ .

В общем случае можно записать следующее соотношение:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A'$$

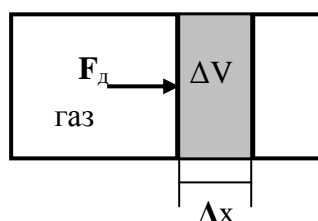
Работу совершает и сам газ, но работа газа $\Delta A = -\Delta A'$ (это следует из третьего закона Ньютона). Тогда:

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta A' = \Delta U + \Delta A$$

Записанное в таком виде соотношение называют первым началом термодинамики. Оно представляет собой закон сохранения энергии в газовых процессах. Согласно ему количество тепла, переданное газу расходуется на увеличение внутренней энергии и работу газа против внешних сил.

Работа газа.

Рассмотрим газ в цилиндрическом сосуде с подвижным поршнем площадью S .



Под действием силы давления газа F_d , поршень перемещается на расстояние Δx . При этом газ совершает работу $\Delta A = F_d \cdot \Delta x = P \cdot (S\Delta x)$.

Величина, стоящая в скобках – это изменение объема газа при расширении $\Delta V = S \cdot \Delta x$, тогда

$$\Delta A = P\Delta V$$

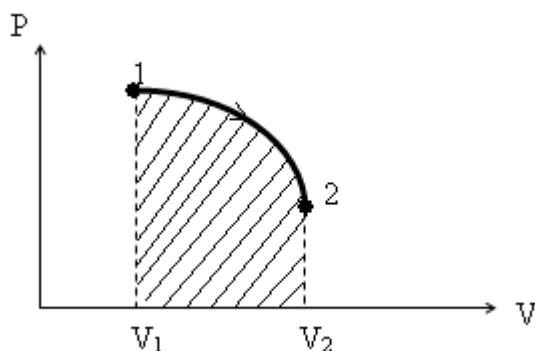
С учетом этого выражения первое начало термодинамики можно записать в виде:

$$\Delta Q = \Delta U + P\Delta V$$

При выводе формулы для работы газа предполагалось, что давление при движении поршня не меняется. В общем случае формула справедлива при малом смещении поршня Δx , когда давление измениться не успеет. Если учитывать изменение давления работа газа вычисляется как интеграл

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Если процесс изображен в виде линии на PV – диаграмме, то работу можно вычислить как площадь под этой линией (на рисунке заштрихована).



Работа газа может быть как положительной (расширение), так и отрицательной (сжатие). Это учитывается стрелкой на диаграмме.

Теплоемкость газа.

Теплоемкостью называют количество тепла, которое надо передать газу, чтобы увеличить его температуру на один кельвин.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

Различают молярную теплоемкость (теплоемкость одного моля газа) и удельную теплоемкость (теплоемкость единицы массы).

Теплоемкость зависит от процесса, с помощью которого газ нагревается.

При изохорном процессе $\Delta Q = \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$ (работа равна нулю), тогда

теплоемкость при постоянном объеме:

$$C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R$$

При изобарном процессе газ совершает работу, которую можно найти из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$P \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

Складывая эту работу и изменение внутренней энергии получим:

$$\Delta Q = \Delta U + P \Delta V = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

Отсюда теплоемкость при постоянном давлении.

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R$$

Теплоемкость при постоянном давлении больше, так как тепло расходуется не только на нагрев газа, но и на совершение работы.

Адиабатический процесс.

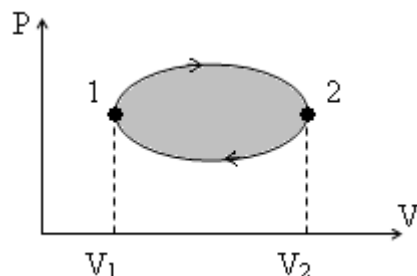
Адиабатический процесс – процесс, происходящий без теплообмена с внешней средой (т.е. $\Delta Q = 0$). Изменение параметров идеального газа подчиняется уравнению Пуассона:

$$P V^\gamma = \text{const}$$

γ называется показателем адиабаты $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$. C_p и C_v – теплоемкость при постоянном давлении и теплоемкость при постоянном объеме, i – число степеней свободы молекул газа.

Циклический процесс

Циклическим называют процесс, при котором газ периодически возвращается в первоначальное состояние. На рисунке – это процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$.



Изменение внутренней энергии за полный цикл равно нулю $\Delta U = 0$. Работа газа за полный цикл A равна площади заштрихованной фигуры. Эта работа совершается за счет тепла Q , которое передается газу. Количество тепла $Q = Q_n - Q_x$ равно разности между количеством тепла, полученным от нагревателя Q_n и количеством тепла, отданному холодильнику Q_x

$$Q_n - Q_x = A$$

По этому принципу работает тепловая машина. Если циклический процесс, изображенный на рисунке, происходит в противоположном направлении (против часовой стрелки), то такая машина является холодильником.

Коэффициент полезного действия тепловой машины:

$$\eta = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n} = \frac{A}{Q_n}$$

Он всегда меньше единицы, так как не все тепло, полученное от нагревателя переходит в работу.

Это следствие одного из фундаментальных принципов термодинамики – второго начала, который гласит, что невозможен циклический процесс, при котором система периодически возвращается в первоначальное состояние без изменений во внешней среде. В данном случае имеются в виду потеря тепла, которое отдается холодильнику.

Гипотетический механизм, производящий работу больше, чем затрачено тепла ($\eta > 1$) – это вечный двигатель первого рода. Его существование противоречит первому началу термодинамики (закону сохранения энергии).

Гипотетический механизм, полностью превращающий тепло в полезную работу ($\eta = 1$) – это вечный двигатель второго рода. Его существование противоречит второму началу термодинамики.

Идеальный цикл с максимальным к.п.д. – это цикл Карно, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. К.п.д. такого цикла

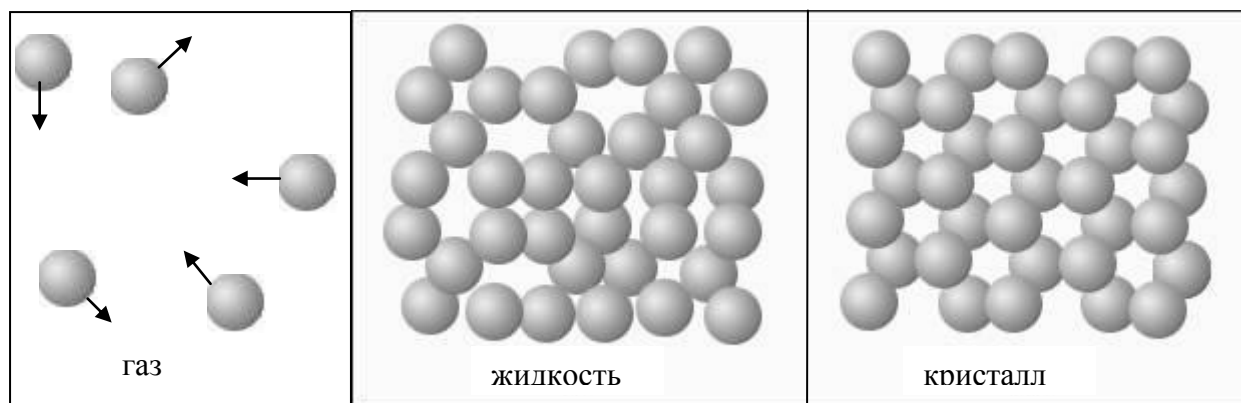
$$\eta = \frac{T_{\text{H}} - T_{\text{X}}}{T_{\text{H}}} = 1 - \frac{T_{\text{X}}}{T_{\text{H}}}$$

Тепловые свойства вещества.

Агрегатные состояния.

Различают три агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое и газообразное.

Внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией хаотически движущихся молекул. Уже для реального газа (газа Ван-дер Ваальса) кроме кинетической энергии молекул необходимо учитывать и потенциальную энергию взаимодействия молекул. Величина потенциальной энергии взаимодействия определяется расстоянием между взаимодействующими молекулами. В газе Ван-дер Ваальса это расстояние в среднем меньше, чем в идеальном газе.



В жидкости среднее расстояние между молекулами значительно меньше, чем в газе и оно сравимо с размером самих молекул. В твердом теле достигается практически плотная упаковка молекул в кристалле, когда их границы (внешние электронные уровни) перекрываются.

Потенциальная энергия взаимодействия молекул отрицательна и соответствует силам притяжения. Отрицательная энергия означает, что для отрыва молекул друг от друга надо приложить внешнюю силу (она будет совершать положительную работу).

Хаотические движения молекул в разных агрегатных состояниях меняют свой характер. В идеальном газе молекулы большую часть своего пути между столкновениями двигаются по прямой линии (нет сил взаимодействия).

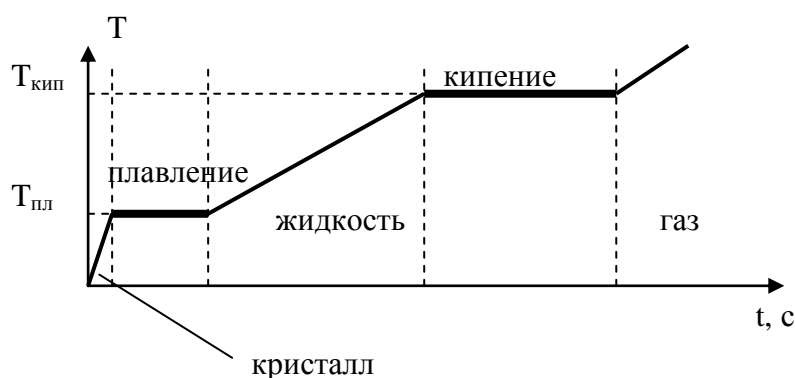
В жидкостях молекулы совершают колебательные движения на одном месте, как в твердом теле, а затем перескакивают в другое место, как молекулы газа. В твердом теле молекулы колеблются в узлах кристаллической решетки и никуда не перескакивают. Тем не менее и в жидкостях и в твердых телах молекулы обмениваются друг с другом кинетической энергией, так же как и в газах.

Среднее значение кинетической энергии одной молекулы всегда определяет температуру тела независимо от агрегатного состояния.

Фазовые переходы.

Переход из одного агрегатного состояния вещества в другое сопровождается изменением внутренней энергии. Такие переходы называются фазовыми. Во время фазового перехода температура тела не меняется. Различают температуру кристаллизации (плавления) и температуру кипения (конденсации). Они разные для разных веществ.

Изменение внутренней энергии во время фазового перехода происходит за счет изменения потенциальной энергии взаимодействия молекул. Это изменение необходимо компенсировать либо за счет подвода тепла извне, либо за счет отбора тепла у тела. Фазовые переходы отмечены на рисунке, изображающем рост температуры тела при нагреве со временем.



Удельная теплота плавления λ – количество тепла, которое необходимо затратить для плавления одного килограмма вещества.

$$Q_{пл} = \lambda \cdot m$$

Удельная теплота парообразования r – количество тепла, которое необходимо затратить для испарения одного килограмма вещества.

$$Q_{кип} = r \cdot m$$

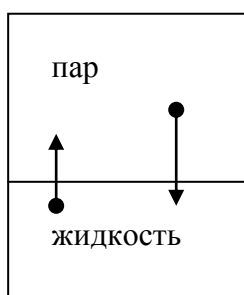
При нагреве тела без фазовых переходов тепло идет на увеличение температуры тела (c – удельная теплоемкость тела):

$$Q = cm\Delta T$$

Насыщенный пар

Фазовый переход представляет собой бурный процесс, при котором внутренняя энергия быстро меняется и вся масса вещества переходит в другое агрегатное состояние. Но возможны ситуации, когда в одном объеме находится вещество сразу в двух состояниях – жидком и газообразном при одной температуре.

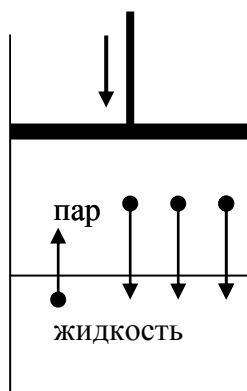
Это связано с тем, что среди огромного количества молекул всегда найдутся молекулы с большой кинетической энергией, которые за счет этой энергии могут оторваться от жидкости и вылететь наружу. В то же время часть молекул газа может влететь в жидкость и остаться там (рисунок).



Через некоторое время между жидкостью и газом в сосуде (паром) устанавливается динамическое равновесие, когда количество молекул, вылетающих из жидкости, равно количеству молекул, возвращающихся назад в это же время. Пар над жидкостью при этом называется насыщенным, а его давление – давлением насыщенных паров.

Давление насыщенного пара и его плотность зависят только от температуры. При увеличении температуры они увеличиваются.

При нагревании системы пар-жидкость равновесие смещается, все больше молекул будет уходить из жидкости и давление насыщенного пара увеличивается. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. Если сжимать насыщенный пар вместе с жидкостью с помощью поршня, то давление не изменится, просто часть пара превращается в жидкость.



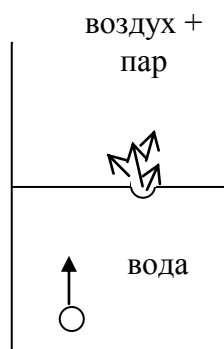
Влажность воздуха – отношение парциального давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенного пара при данной температуре, в процентах:

$$\alpha = \frac{P_{\text{пара}}}{P_{\text{нас}}} \cdot 100\%$$

Если $\alpha \geq 100\%$ (стопроцентная влажность), то водяной пар превращается в жидкость и осаждается на открытых поверхностях, что выражается в запотевании поверхностей или намерзании на них льда.

Кипение жидкости.

Кипение жидкости начинается с возникновения внутри жидкости пузырьков, наполненных паром. Это пузырьки всплывают к поверхности и там лопаются.



Внутри пузырька давление пара равно давлению насыщенного пара при данной температуре. Пузырек всплывет и лопнет на поверхности только, если давление насыщенного пара больше или равно атмосферному давлению. Вода закипает при температуре 100°C при нормальном атмосферном давлении P_0 , значит при этой температуре давление насыщенного пара воды равно P_0 . При меньшем давлении (в горах) вода закипает при меньшей температуре.

Броуновское движение

Маленькие частицы твердого тела (пылинки), помещенные в жидкость испытывают на себе случайные соударения молекул жидкости. При нескомпенсированности ударов с разных сторон, пылинка может начать двигаться. Движения пылинки характеризуются случайной скоростью и случайным направлением – пылинка «дергается» в разные стороны. Эти движения можно наблюдать в микроскоп. Броуновское движение – это доказательство существования молекул и их теплового движения.

Способы передачи тепла

Теплопроводность – это передача тепла внутри одного тела за счет теплового движения молекул и их столкновений. В результате холодные участки нагреваются, а нагретые охлаждаются. Характеризуется коэффициентом теплопроводности. Характерно для всех тел.

Конвекция – передача тепла за счет движения нагретых масс, приводящее к перемешиванию холодных и горячих участков. Характерно для жидкостей и газов. Движение происходит из-за того, что нагретые массы имеют меньшую плотность и всплывают за счет силы Архимеда.

Лучистый теплообмен – передача тепла от горячего тела к холодному через излучение электромагнитных волн в основном инфракрасного диапазона. Это передача тепла на расстоянии, например, через вакуум.

Диффузия – выравнивание концентрации за счет теплового движения.

Электростатика

Электромагнитное взаимодействие – одно из фундаментальных взаимодействий. Оно возникает между телами, имеющими электрический заряд. Электрическим зарядом обладают элементарные частицы, из которых состоят атомы вещества.

Существуют электрические заряды двух типов – положительные и отрицательные. В природе существует минимальный электрический заряд (элементарный заряд), равный заряду электрона по модулю – e . Любой другой заряд всегда кратен элементарному. Электрический заряд не изменяется при переходе из одной системы отсчета в другую.

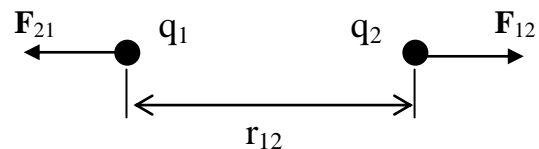
Закон сохранения заряда

Алгебраическая сумма зарядов сохраняется. Заряды ниоткуда не рождаются и никуда не исчезают. В окружающем нас мире количество положительных зарядов с огромной точностью равно количеству отрицательных зарядов, в результате окружающий нас мир нейтрален.

Закон Кулона

Электростатика рассматривает взаимодействие неподвижных электрических зарядов. Сила взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2 , находящихся на расстоянии r_{12} друг от друга, описывается законом Кулона и по абсолютной величине равна:

$$|\mathbf{F}_{12}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{12}^2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{12}^2}$$



При этом одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Величина ϵ_0 называется электрической постоянной.

Электрическое поле подчиняется принципу суперпозиции: сила действия одного заряда на другой не зависит от наличия других зарядов, поэтому суммарная сила действия нескольких зарядов равна векторной сумме сил действия каждого заряда в отдельности:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots$$

Напряженность электрического поля

Вокруг электрического заряда возникает электрическое поле. Силовой характеристикой поля является напряженность – сила, действующая в данной точке поля на единичный положительный заряд.

Если на положительный заряд q , находящийся в электрическом поле, действует сила \mathbf{F} , то напряженность поля в этой точке равна:

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

Напряженность поля точечного заряда Q по абсолютной величине равна:

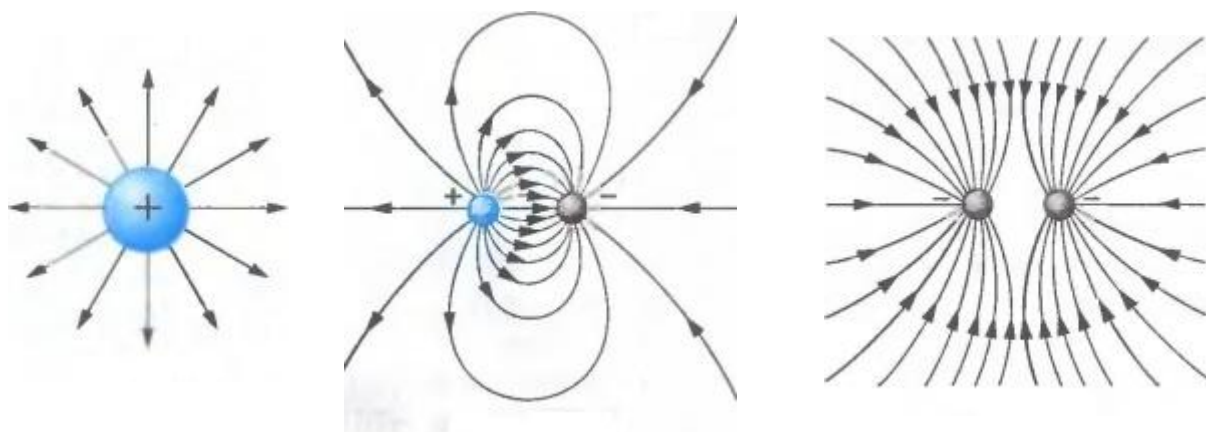
$$|E| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2}$$

Вектор E при этом направлен от заряда Q , если $Q > 0$ и к заряду, если $Q < 0$. Если электрическое поле создается несколькими зарядами, то его напряженность равна векторной сумме напряженностей каждого из полей, созданных зарядами:

$$E = E_1 + E_2 + \dots$$

Силовая линия

Электрическое поле можно изображать графически с помощью силовых линий. Силовая линия или линия напряженности – это линия, касательная к



которой в каждой точке совпадает по направлению с напряженностью поля в этой точке.

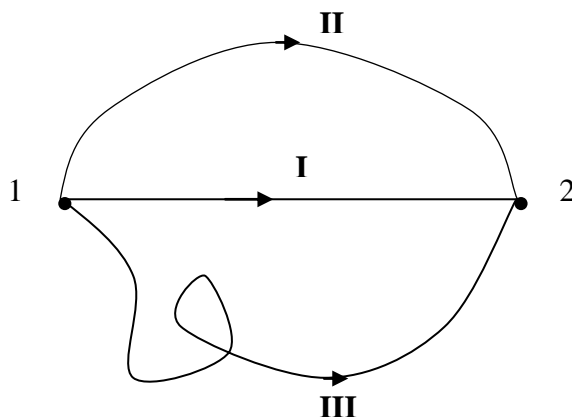
1. Силовые линии не пересекаются.
2. Они всегда начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном либо на бесконечности.
3. Чем гуще проходят линии, тем больше величина напряженности.

На рисунке показаны силовые линии положительного точечного заряда, двух точечных зарядов (разноименных и одноименных).

Потенциал электрического поля

Электростатическое поле потенциально, работа сил поля при перемещении заряда из одной точки в другую не зависит от пути, по которому заряд двигался, а определяется только начальной и конечной точками

перемещения. На рисунке показаны три способа перемещения заряда из точки 1 в точку 2. Работа сил поля во всех трех случаях одна и та же: $A_I = A_{II} = A_{III} = A_{12}$. Поэтому в электростатическом поле можно ввести понятие потенциальной энергии: $A_{12} = W_{п1} - W_{п2}$. Обычно за нуль потенциальной энергии берут точку, бесконечно удаленную от источника поля ($r \rightarrow \infty$).



Энергетической характеристикой электростатического поля является потенциал – работа, которую поле должно совершить, чтобы переместить положительный единичный заряд из бесконечности в данную точку поля, то есть потенциал – это потенциальная энергия единичного положительного заряда в электростатическом поле.

$$\varphi = \frac{W_{п}}{q}$$

Работа поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 можно записать через потенциалы

$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$ $U = \varphi_1 - \varphi_2$ - разность потенциалов или напряжение

Потенциал поля точечного заряда Q :

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Потенциалы полей нескольких источников складываются алгебраически:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots$$

Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2 , расположенных на расстоянии r друг от друга равна:

$$W_{\text{вз}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$

Связь между напряженностью и потенциалом. В однородном электрическом поле $\mathbf{E} = \text{const}$ работа сил поля по перемещению точечного заряда q в направлении вектора \mathbf{E} на расстояние d равна

$$A = qEd.$$

С другой стороны эта работа равна разности потенциальных энергий:

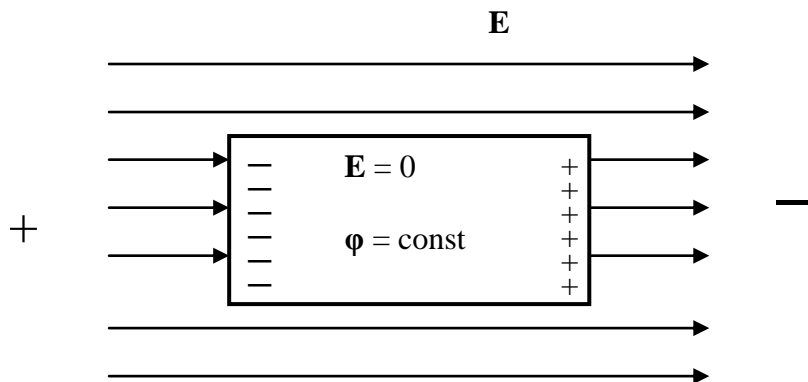
$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

Отсюда, приравнявая, получим

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) = Ed$$

Проводники в электрическом поле

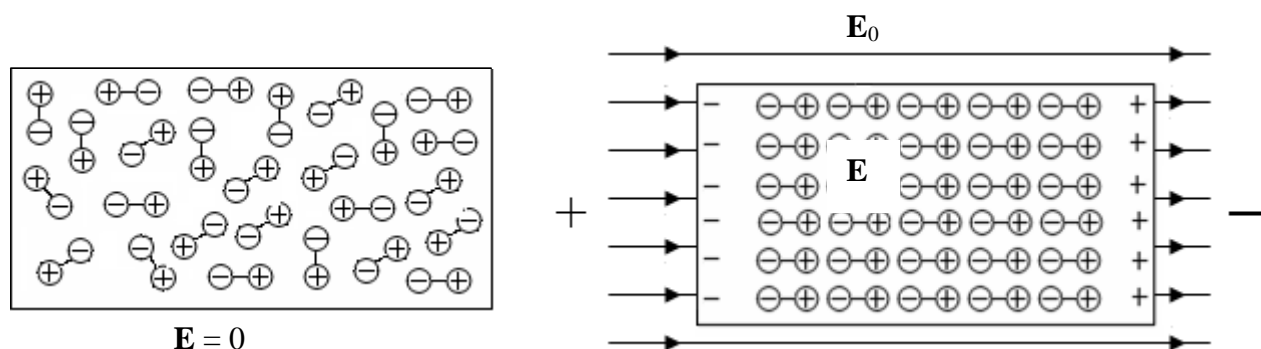
Проводниками называют вещества, которые содержат достаточное количество свободных зарядов. Это обычно металлы. Свободные заряды в металлах – это электроны, оторвавшиеся от внешних оболочек атома при образовании кристаллической решетки. Электроны могут свободно перемещаться внутри металла, но покинуть его не могут.



Основное свойство проводника, помещенного во внешнее электрическое поле – это отсутствие поля внутри проводника. Под действием внешнего поля свободные заряды распределяются на поверхности проводника и их собственное поле полностью компенсирует внешнее. Говорят, что внешнее поле экранируется. Из-за отсутствия поля внутри проводника при перемещении зарядов работа не совершается, отсюда все точки проводника находятся под одним потенциалом. Можно говорить о потенциале всего проводника в целом.

Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектриками называются вещества, не содержащие свободных зарядов. Это неметаллы. При образовании кристаллической решетки не происходит перекрытия внешних электронных оболочек атомов и свободные электроны не образуются. Но ионы в узлах кристаллической решетки представляют собой электрические диполи – пары положительных и отрицательных зарядов, связанных друг с другом. Такие диполи обладают собственным электрическим полем. В обычном состоянии все диполи ориентированы хаотически, поэтому суммарное поле от них равно нулю. Внешнее поле заставляет их разворачиваться и ориентироваться по полю:



Этот процесс называется поляризацией диэлектрика.

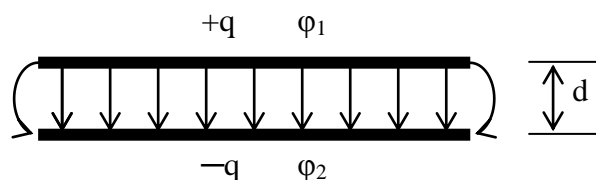
В результате внутри диэлектрика появляется дополнительное электрическое поле так, как будто на границах диэлектрика появились заряды. Эти заряды называются связанными. Дополнительное поле направлено навстречу внешнему и ослабляет его, но не экранирует полностью, как в проводниках.

Диэлектрическая проницаемость ϵ показывает во сколько раз внешнее поле E_0 ослабляется внутри диэлектрика:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

Конденсаторы

Конденсатор – это система двух проводников, заряженных разноименными зарядами. На рисунке изображен плоский конденсатор.



Конденсатор используется для накопления электрического поля. Поле при этом сосредоточено только внутри заряженного конденсатора, снаружи его нет. Поле внутри конденсатора – однородно, т.е. имеет одну величину и направление во всех точках, кроме области вблизи концов

Разность потенциалов обкладок конденсатора (напряжение) $U = \varphi_1 - \varphi_2$ пропорциональна заряду на его обкладках:

$$q = CU$$

C – емкость конденсатора. Чем больше емкость, тем больший заряд можно накопить в конденсаторе при данном напряжении.

$$C = \frac{q}{U}$$

Емкость конденсатора определяется его размерами и формой. Емкость плоского конденсатора равна:

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

S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами, ε – диэлектрическая проницаемость среды, она показывает во сколько раз диэлектрик, помещенный между пластинами конденсатора уменьшает напряженность электрического поля.

При зарядке конденсатора происходит накопление энергии электрического поля. Пусть вначале конденсатор не заряжен. Для его зарядки надо перенести некоторое количество заряда с одной пластины на другую. При этом совершается работа против электрических сил.

Можно найти связь между напряженностью и разностью потенциалов в случае однородного электростатического поля (в конденсаторе), посчитав работу по переносу заряда q_1 с верхней пластины на нижнюю по линии, перпендикулярной пластинам

$$A_{12} = q_1 E \cdot d = q_1 (\varphi_1 - \varphi_2) = q_1 U, \text{ откуда } U = Ed$$

Энергия электрического поля

Энергия конденсатора равна работе, которую надо совершить по переносу отрицательного заряда с «положительной» пластины на «отрицательную». Расчет дает для энергии конденсатора:

$$W_E = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Поскольку в конденсаторе накапливается заряд и соответственно, электрическое поле, то энергию конденсатора равна энергии электрического поля, накопленного в нем.

$$W_E = \frac{CU^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} E^2 d^2 = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2 (Sd)}{2} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2 V}{2}$$

Если энергию конденсатора разделить на его объем V , то получим плотность энергии электрического поля, т.е. энергию поля, приходящуюся на единицу объема:

$$w_E = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

Постоянный электрический ток.

Электрический ток — упорядоченное движение заряженных частиц. Хаотическое, тепловое движение частиц не создает электрического тока.

Электрический ток возникает в твердых проводниках, жидких электролитах, ионизованном газе (плазме), т.е. везде, где могут образоваться свободные заряды.

Сила тока — заряд, проходящий через поперечное сечение проводника в единицу времени:

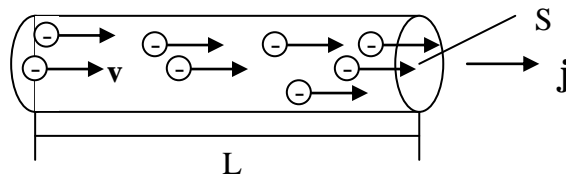
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Для постоянного тока

$$q = It$$

Плотность тока — электрический ток, протекающий через единицу площади поперечного сечения проводника.

$$j = \frac{I}{S}$$



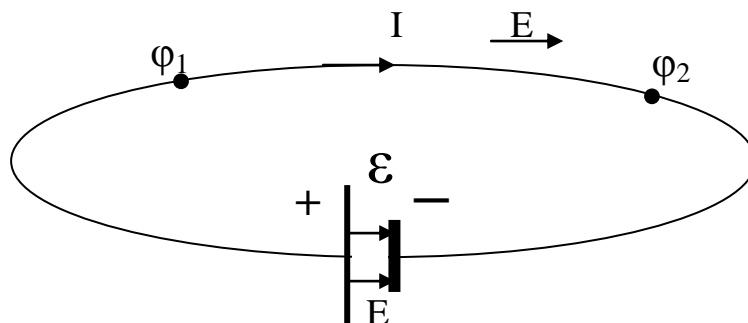
На рисунке изображен участок проводника длиной L и площадью сечения S . По проводнику движутся заряды q со скоростью v . Все заряды, находящиеся в этом участке проводника, пройдут через его сечение за время $\Delta t = \frac{L}{v}$. Общее количество частиц, находящихся в участке проводника $N = n \cdot V = nLS$, где n концентрация частиц, т.е. число частиц в единице объема проводника, $V = LS$ — объем проводника. Сила тока, протекающего через поперечное сечение проводника $I = \frac{qN}{\Delta t} = \frac{qnLSv}{L} = qnv \cdot S$. Отсюда получим выражение для плотности тока:

$$\mathbf{j} = \frac{I}{S} = qn\mathbf{v}$$

Плотность тока — это вектор, направление которого совпадает с направлением скорости движения положительных зарядов. Скорость v называется токовой скоростью.

Законы постоянного тока

Заряды, движутся по проводнику под действием электрического поля. Чтобы они не накапливались на концах проводника и не экранировали электрическое поле, проводники должны образовывать замкнутую электрическую цепь. В этом случае внутри проводника образуется однородное электрическое поле,двигающее заряды.



При перемещении заряда Δq по замкнутому контуру суммарная работа электрических сил равна нулю, так как поле потенциально. При движении внутри источника поля заряды должны перемещаться против электрического поля. Такое движение обеспечивают сторонние силы неэлектростатического происхождения, которые «работают» внутри источника тока – батареи.

Закон Ома для участка цепи.

Электрическое поле в проводнике заставляет двигаться свободные заряды – электроны. Ионы кристаллической решетки оказывают сопротивление электрическому току. Электрон под действием поля движется равноускоренно, пока не попадет в ион. При столкновении с ионами в узлах кристаллической решетки электроны теряют всю энергию, которую они получают в электрическом поле. При этом увеличивается температура проводника. В результате, несмотря на действие постоянной силы, электроны не ускоряются со временем. Токовая скорость остается постоянной.

Направленная скорость, которую приобретают электроны в проводнике, оказывается пропорциональна напряженности электрического поля, поэтому и плотность тока будет пропорциональна напряженности электрического поля:

$$j = \frac{1}{\rho} E$$

Коэффициент ρ называется удельным сопротивлением проводника. Он зависит от материала проводника.

Найдем силу тока, протекающего через проводник:

$$I = j \cdot S = \frac{ES}{\rho} = \frac{S}{l\rho} E \cdot l$$

Произведение El – это работа электрических сил по перемещению единичного заряда вдоль цепи на расстояние l . Для участка цепи между точками с потенциалами φ_1 и φ_2 эта работа равна $El = \varphi_1 - \varphi_2 = U$.

$U = \varphi_1 - \varphi_2$ — называется напряжением участка цепи или падением напряжения. Тогда:

$$I = \frac{S}{\rho l}(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{S}{\rho l}U$$

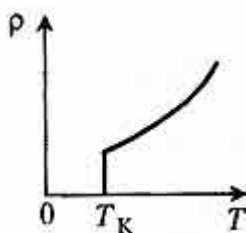
Сила тока пропорциональна напряжению на участке проводника. Это закон Ома. Он не является фундаментальным законом природы и справедлив только для твердых (металлических) проводников. В других средах закон Ома имеет другой вид. Коэффициент пропорциональности обычно записывают в виде:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

R – это сопротивление участка проводника. Окончательно можно записать закон Ома в виде:

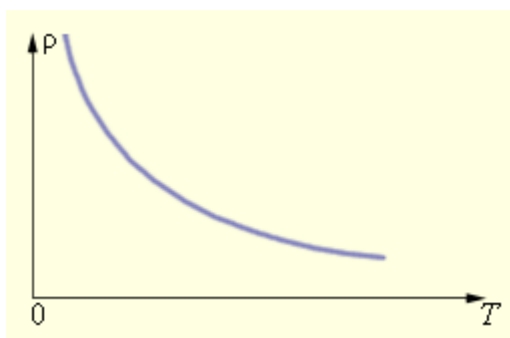
$$I = \frac{U}{R}$$

Сопротивление проводника зависит от температуры. Для металлов при повышении температуры сопротивление увеличивается.



При уменьшении температуры у некоторых металлов наступает состояние сверхпроводимости. Сопротивление падает до нуля. Это квантовый эффект. Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k составляет несколько Кельвинов.

Сопротивление полупроводников с увеличением температуры наоборот уменьшается. Это связано с увеличением числа свободных носителей тока. То же самое можно сказать и про изоляторы.



Закон Джоуля-Ленца

При передвижении заряда Δq от точки с потенциалом φ_1 к точке с потенциалом φ_2 электрическое поле совершает работу, которая вся уходит в тепло:

$$Q = \Delta q \cdot U = I \cdot U \cdot t = I^2 R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Мощность электрического тока

$$P = I^2 R = IU = \frac{U^2}{R}$$

Закон Ома для полной цепи.

При перемещении заряда Δq по замкнутой цепи работа электрического поля во внешней части цепи равна работе сторонних сил внутри источника тока:

$$\Delta q \cdot U = \Delta q IR = A_{\text{ст}}$$

Разделим все выражение на Δq :

$$IR = \frac{A_{\text{ст}}}{\Delta q} = \mathcal{E} \quad A_{\text{ст}} = \Delta q \mathcal{E} = I \mathcal{E} \Delta t$$

Работа сторонних сил по перемещению единичного заряда по замкнутой цепи называется электродвижущей силой. Полученную формулу записывают в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

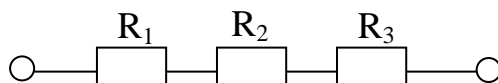
Здесь R – общее сопротивление внешней цепи, r – внутреннее сопротивление источника.

Мощность источника тока

$$P_{\mathcal{E}} = I \mathcal{E}$$

Расчет цепей

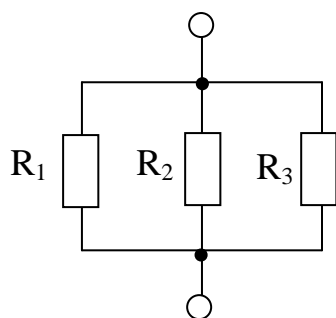
Общее сопротивление последовательно соединенных резисторов равно



$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

При последовательном соединении через резисторы идет один и тот же ток, напряжения складываются.

Общее сопротивление параллельно соединенных резисторов определяется по формуле



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

При параллельном соединении напряжение на всех резисторах одинаково, а токи складываются.

Правила Кирхгофа

1. В узлах сложной цепи алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0$$

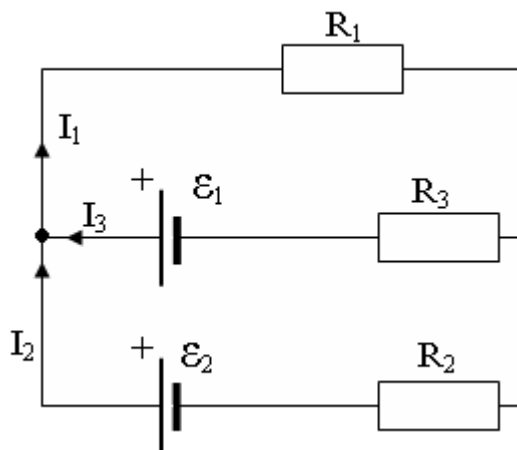
Сколько тока втекает (со знаком «+»), столько же вытекает (со знаком «-»). Это следствие закона сохранения заряда.

2. В любом замкнутом участке цепи сумма падений напряжений равна сумме ЭДС.

$$U_1 + U_2 + U_3 + \dots = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots$$

Это следствие закона сохранения энергии – работа электрических сил равна работе сторонних сил. Знаки слагаемых определяются при выборе обхода контура. Если направление тока совпадает с направлением обхода, то ток берем со знаком «+», если наоборот, то «-». Знак ЭДС выбираем из условия, что если данная ЭДС поддерживает ток в выбранном направлении обхода, знак «+», если наоборот, то «-».

Пример расчета сложной схемы.



В отмеченном узле по первому закону Кирхгофа:

$$I_2 + I_3 - I_1 = 0$$

В верхнем контуре по второму закону Кирхгофа:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1$$

В нижнем контуре по второму закону Кирхгофа:

$$I_2 R_2 - I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$$

Решая систему из трех уравнений, можно найти все токи и напряжения в цепи.

Соединения ЭДС

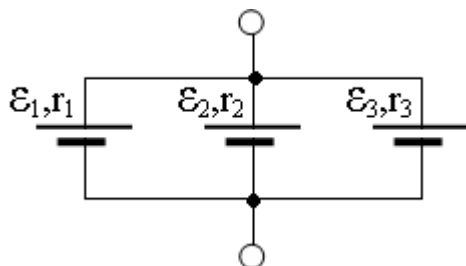
При последовательном соединении ЭДС:



$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \pm \mathcal{E}_1 \pm \mathcal{E}_2 \pm \mathcal{E}_3 \\ r &= r_1 + r_2 + r_3 \end{aligned}$$

Знак перед ЭДС определяется способом включения в цепь.

При параллельном соединении ЭДС:

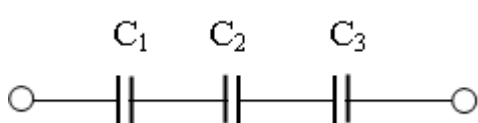


$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{E}}{r} &= \pm \frac{\mathcal{E}_1}{r_1} \pm \frac{\mathcal{E}_2}{r_2} \pm \frac{\mathcal{E}_3}{r_3} \\ \frac{1}{r} &= \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \end{aligned}$$

Формулы получены с помощью правил Кирхгофа для сложных цепей.

Соединение конденсаторов

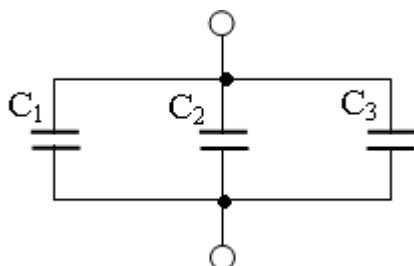
При последовательном соединении конденсаторов



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

При таком соединении заряды на конденсаторах равны, напряжения складываются.

При параллельном соединении конденсаторов

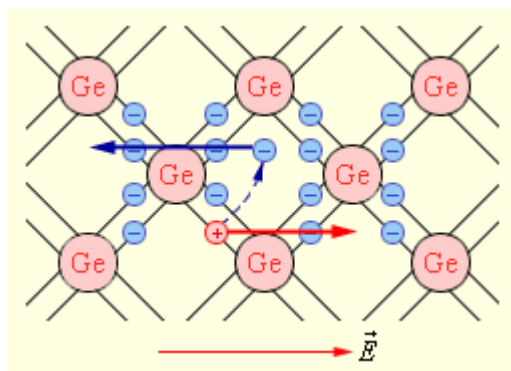


$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

При таком соединении напряжения на конденсаторах равны, заряда складываются.

Полупроводники

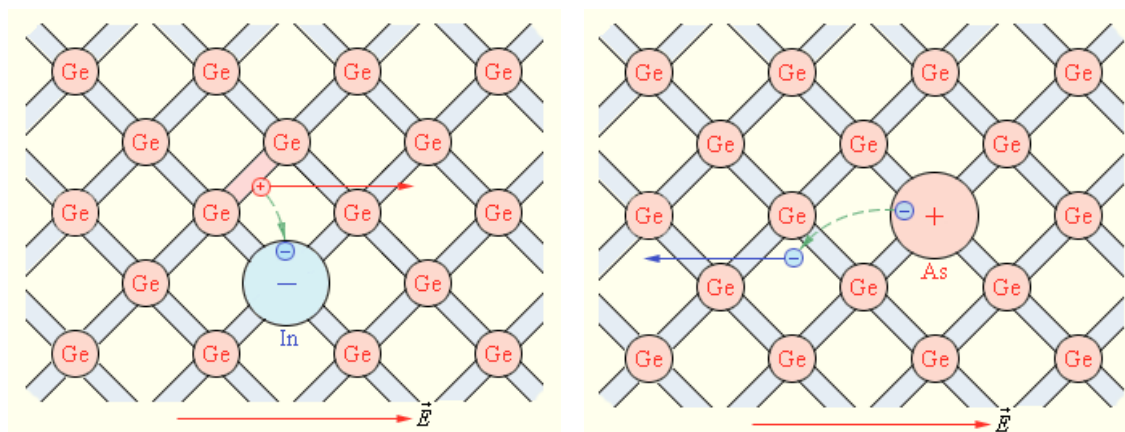
К полупроводникам относят вещества, атомы которых имеют на внешней оболочке слабо связанные электроны (4-валентный германий). Поэтому при увеличении температуры электроны отрываются от атомов и образуют



отрицательные носители тока. На месте ушедшего электроны остается «дырка». Она ведет себя как положительный заряд. «Дырка» заполняется электроном от соседнего атома и перемещается на его место. Таким образом, перемещение «дырки» в присутствии внешнего электрического поля создает ток положительных зарядов.

Собственная проводимость полупроводников образуется электронами и дырками, которых концентрации в полупроводнике одинаковы.

Примесная проводимость возникает при добавлении к чистому полупроводнику примеси, захватывающей электроны у соседних атомов полупроводника и увеличивающих концентрацию «дырок» (акцепторная примесь- 3-валентный индий) или добавляющая собственные электроны к уже имеющимся (донорная примесь- 5-валентный мышьяк).

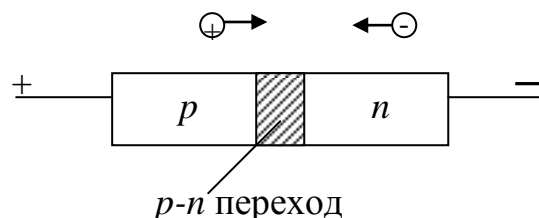


В первом случае возникает полупроводник *p*- типа, у которого в основном дырочная проводимость.

Во втором случае возникает полупроводник n - типа с электронной проводимостью.

Полупроводниковый диод

Если соединить вместе полупроводник p - типа и n - типа, то на границе раздела возникает p - n переход, то есть область, обедненная носителями тока.



Через нее ток пойдет, когда p - область присоединить к плюсу, а n - область к минусу батареи, как показано на рисунке.

Если полюса батареи поменять, то ток через диод не пойдет.

Электрический ток в разных средах.

Электропроводность среды определяется наличием свободных носителей тока и их количеством.

В жидкостях (растворах) носителями тока являются положительные и отрицательные ионы, которые образуются при диссоциации молекул вещества во время растворения. При этом в отличие от металлов при протекании тока в растворах происходит перенос массы. Это явление используется при электролизе.

В газах носители тока появляются при ионизации газа (отрыв электрона от атома и образование положительного иона). Ионизация может происходить при столкновении с атомом энергичной частицы. В электрической искре (молнии) небольшое количество имеющихся в воздухе свободных электронов ускоряются электрическим полем и сталкиваются с нейтральными атомами, вызывая ионизацию. При этом количество свободных носителей тока (электронов и ионов) увеличивается взрывным образом.

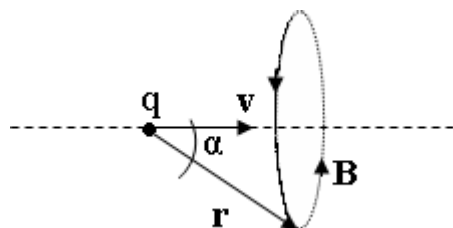
Магнитное поле

Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и воздействует на движущиеся заряды. Оно создает дополнительную силу взаимодействия – «магнитную» между движущимися зарядами. Благодаря магнитной силе одноименные заряды, движущиеся параллельно со скоростью v притягиваются друг к другу. Магнитная сила уменьшает взаимное электростатическое отталкивание одноименных движущихся зарядов.

В электродинамике магнитное поле рассматривается как малая релятивистская добавка в электрическому полю. Магнитные силы сравниваются по величине с электрическими, если скорости движения зарядов близки к скорости света. Но, благодаря тому, что в окружающем нас мире электрические заряды и, соответственно, электрические силы в большой степени скомпенсированы, магнитные силы можно обнаружить и для медленно движущихся зарядов.

Магнитная индукция

Магнитное поле численно характеризуется вектором магнитной индукции \mathbf{B} . Эта величина аналогична вектору напряженности электрического поля \mathbf{E} .



Магнитная индукция поля положительного точечного заряда q , движущегося со скоростью v , в точке, находящейся на расстоянии r от заряда, определяется выражением (аналог закона Кулона для магнитного поля):

$$|\mathbf{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{qv \sin \alpha}{r^2}$$

Радиус-вектор \mathbf{r} и скорость \mathbf{v} образуют между собой угол α . μ_0 – магнитная постоянная. Направление вектора \mathbf{B} определяется правилом правого винта:

Если вращать правый винт от направления вектора скорости к направлению радиус-вектора, то движение кончика винта покажет направление вектора магнитной индукции.

Так же, как и электрического поля, магнитного можно изображать с помощью силовых линий (линий магнитной индукции). Линии магнитной индукции проводятся так, что касательная в каждой точке совпадает по направлению с вектором магнитной индукции.

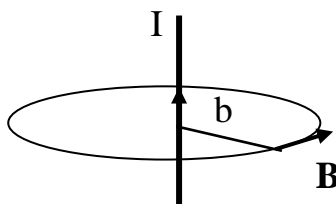
Так как в природе отсутствуют магнитные заряды, линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не начинаются и нигде не заканчиваются.

Реально источником магнитного поля являются проводники с током. Поле при этом рассчитывается с помощью суммирования (интегрирования) полей, создаваемых отдельными движущимися зарядами в проводнике.

Магнитное поле бесконечного прямолинейного проводника с током:

Если по проводнику течет ток I , то магнитная индукция на расстоянии b от него равна по модулю:

$$B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi b}$$

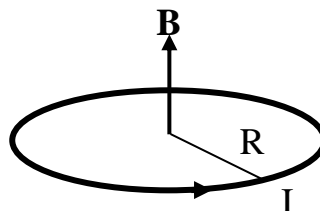


Линии магнитной индукции образуют концентрические окружности в плоскости, перпендикулярной проводнику с током с центром на проводнике. Направление вектора \mathbf{B} связано с направлением тока в проводнике правилом правого винта.

Магнитное поле в центре кругового тока.

Если по кольцу радиуса R течет ток I , то в центре кольца величина магнитной индукции определяется:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}$$

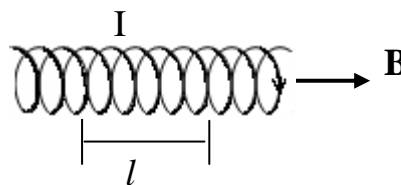


Направление вектора \mathbf{B} связано с направлением тока в кольце правилом правого винта.

Магнитное поле соленоида.

Соленоидом называют катушку с током. Внутри такой катушки создается однородное магнитное поле, вектор магнитной индукции направлен параллельно оси соленоида. Магнитная индукция поля бесконечно длинного соленоида с плотностью намотки n :

$$B = \mu_0 In = \mu_0 I \frac{N}{l}$$

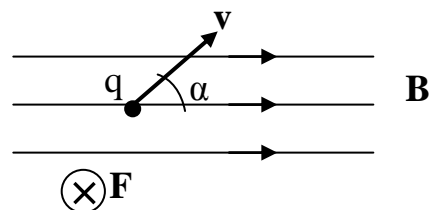


Магнитные силы

Сила Лоренца

Сила, действующая со стороны магнитного поля с магнитной индукцией \mathbf{B} на точечный заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} определяется выражением

$$|\mathbf{F}_L| = qvB \sin \alpha$$



Направление силы определяется правилом правого винта:

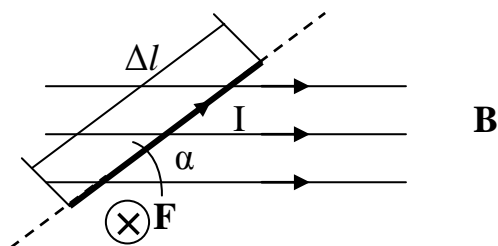
Если вращать правый винт от направления вектора скорости к направлению вектора магнитной индукции, то движение кончика винта покажет направление силы Лоренца. В случае, показанном на рисунке, сила перпендикулярна плоскости рисунка и направлена «от нас».

Закон Ампера.

В чистом виде магнитное взаимодействие проявляется для электрических токов, текущих по твердым (металлическим) проводникам. Эти токи создаются отрицательно заряженными электронами. Электростатические силы отталкивания в этом случае компенсируются положительно заряженными ионами в узлах кристаллической решетки.

Сила, действующая на участок проводника с током I длиной Δl , находящегося в однородном магнитном поле с индукцией \mathbf{B} равна:

$$|\mathbf{F}_A| = IB\Delta l \sin \alpha$$



Направление силы Ампера определяется по правилу правого винта:

Если вращать правый винт от направления тока в проводнике к направлению вектора магнитной индукции, то движение кончика винта покажет направление силы Ампера. В случае, показанном на рисунке, сила перпендикулярна плоскости рисунка и направлена «от нас».

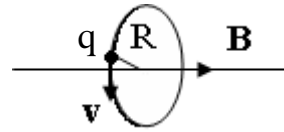
Сила Ампера – это равнодействующая всех сил, действующих на заряды, создающие электрический ток в проводнике.

Движение заряженной частицы в магнитном поле

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости, поэтому она не совершает работы и не ускоряет частицы.

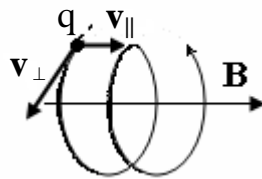
Пусть частица с зарядом q влетает в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции \mathbf{B} . Поскольку сила Лоренца перпендикулярна скорости, частица начинает двигаться по окружности с центростремительным ускорением:

$$a = \frac{F_{\perp}}{m} = \frac{qvB}{m} = \frac{v^2}{R}$$



Радиус окружности: $R = \frac{mv}{qB}$, период обращения: $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$. Период обращения не зависит от скорости.

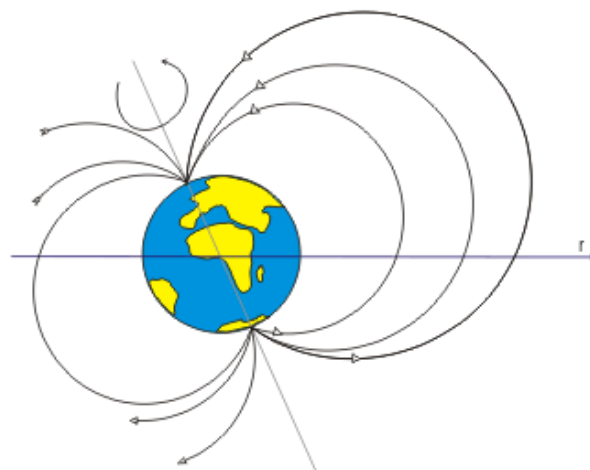
Если заряженная частица влетает в магнитное поле под некоторым углом $\alpha \neq 90^\circ$ к направлению вектора магнитной индукции, тогда ее скорость можно разложить на два компонента – вдоль и поперек \mathbf{B} : $v = v_{\parallel} + v_{\perp}$. Сила Лоренца направлена перпендикулярно \mathbf{B} . В направлении, параллельном \mathbf{B} , проекция силы Лоренца равна нулю, поэтому скорость $v_{\parallel} = \text{const}$. Это приводит к тому, что частица совершает одновременно два движения – вращение со скоростью v_{\perp} и равномерное движение вдоль \mathbf{B} со скоростью v_{\parallel} .



Таким образом частица движется по спирали вокруг силовой линии и привязана к ней. Говорят, заряженная частица «вморожена» в магнитное поле.

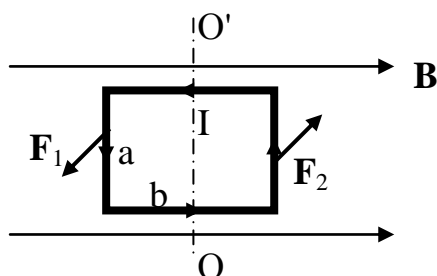
На этом свойстве основаны технологии удержания горячей плазмы магнитным полем – «магнитное удержание», которые используются в исследованиях по термоядерному синтезу.

Благодаря магнитному удержанию магнитосфера Земли не пропускает потоки заряженных частиц солнечного ветра к поверхности везде, кроме полюсов.



Рамка с током в магнитном поле

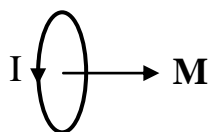
Если прямоугольную рамку со сторонами a и b поместить в магнитное поле так, чтобы плоскость рамки была параллельна вектору магнитной индукции, то на стороны, перпендикулярные \mathbf{B} будут действовать силы Ампера, образующие момент сил, стремящийся повернуть рамку.



Силы равны: $|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2| = F = IaB$, они создают вращающий момент:

$$2F \frac{b}{2} = B \cdot Iab = B \cdot M$$

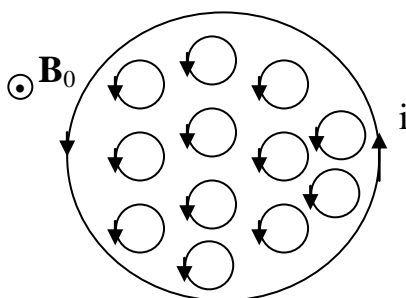
Магнитный момент рамки с током $M = I \cdot ab = I \cdot S$ - это произведение силы тока на площадь рамки. Магнитный момент – вектор, направление которого связано с направлением тока в рамке правилом правого винта:



В результате взаимодействия рамки с током и магнитного поля рамка будет поворачиваться вокруг оси OO' до тех пор, пока площадь рамки не установится перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Вещество в магнитном поле

Электроны, вращающиеся вокруг ядра атома можно рассматривать как рамку с током. Поэтому каждый атом имеет магнитный момент и создает собственное магнитное поле. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентированы хаотически и суммарное поле внутри него равно нулю. Если цилиндр из такого вещества поместить во внешнее поле, то оно разворачивает магнитные моменты атомов и ориентирует их по полю.



Магнитные моменты всех атомов складываются и появляется суммарное магнитное поле, которое изменяет внешнее поле. Этот процесс называется намагничиванием. Магнитное поле в веществе $B = \mu B_0$. μ – магнитная проницаемостью. Внутреннее поле в веществе можно рассматривать как поле, образующееся благодаря току намагничивания i – нескомпенсированному току, текущему по границам тела.

В зависимости от величины магнитной проницаемости все вещества делятся на три типа:

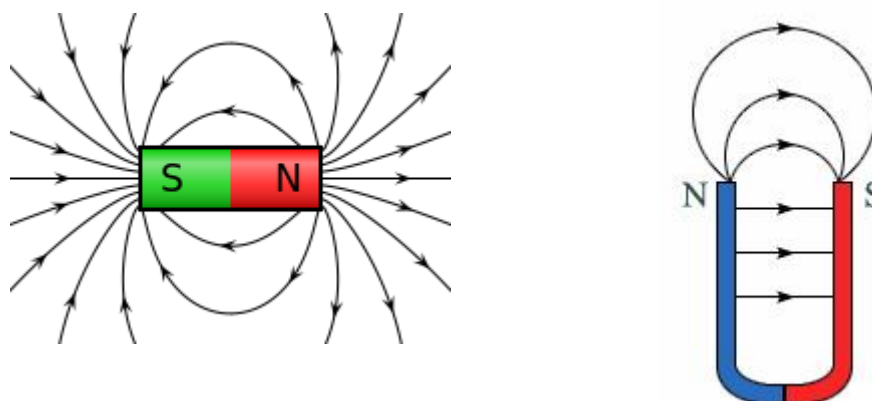
1. парамагнетики $\mu > 1$;
2. диамагнетики $\mu < 1$;
3. ферромагнетики $\mu \gg 1$.

К ферромагнетикам относятся железо, никель, различные сплавы. У ферромагнетиков магнитная проницаемость достигает $\mu = 500000$.

Постоянные магниты

Из ферромагнетиков изготавливают постоянные магниты. После намагничивания образца из ферромагнетика при удалении внешнего поля, собственное поле не исчезает, т.е. ориентация магнитных моментов атомов не разрушается. Это связано со структурой кристаллической решетки ферромагнетика. Постоянный магнит имеет два полюса, которые называются «северный» – N и «южный» – S. Линии магнитной индукции выходят из северного полюса магнита, а заходят внутрь магнита в южном полюсе. Внутри магнита они замыкаются.

Магнитное поле полосового магнита – это поле соленоида с током.



Магнитное поле подковообразного магнита между его полюсами можно считать однородным.

Рассмотрим постоянный полосовой магнит в виде цилиндра.

Элементарные токи, поверхностный ток по огибающей цилиндра, эквивалентность такого магнита соленоиду.

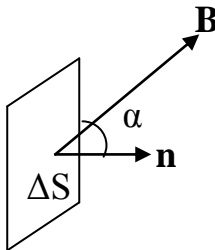
Поведение магнита (соленоида) во внешнем поле, разворот и ориентация по направлению внешнего поля.

Движение магнитов в однородном и неоднородном полях. Взаимодействие постоянных магнитов друг с другом (одноименные полюса отталкиваются, разноименные притягиваются)

Электродинамика. Электромагнитные волны.

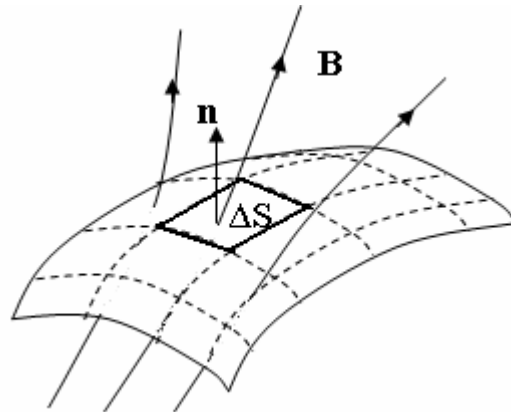
Магнитный поток

Если в магнитное поле с индукцией \mathbf{B} поместить маленькую площадку ΔS , то поток вектора магнитной индукции $\Delta\Phi$ через эту площадку (магнитный поток) определяется выражением

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


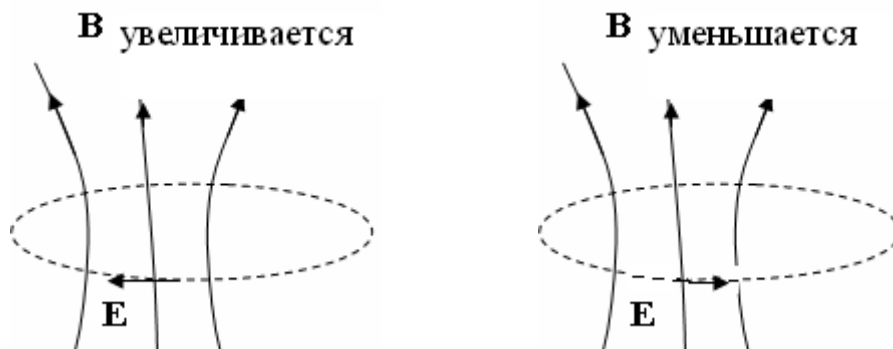
Угол α – это угол между векторами \mathbf{B} и \mathbf{n} . Вектор нормали \mathbf{n} – это единичный вектор, перпендикулярный площадке ΔS . Он характеризует ориентацию площадки в пространстве. По смыслу магнитный поток равен числу силовых линий, пронизывающих площадку.

Магнитный поток через произвольную поверхность определяют, разбивая эту поверхность на небольшие участки ΔS , и складывая потоки, посчитанные для каждого из таких участков. Такая сумма превращается в интеграл.



Явление электромагнитной индукции

Электрическое и магнитное поля можно рассматривать независимо друг от друга, только если они постоянны и не изменяются во времени.



Переменное магнитное поле порождает в пространстве вихревое электрическое поле, тоже переменное и наоборот – переменное электрическое

поле порождает магнитное. Этот факт демонстрирует фундаментальный закон природы. Он показывает связь электрического и магнитного полей, которые фактически образуют единое электромагнитное поле.

Связь электрического и магнитного поля наблюдается в виде явления электромагнитной индукции: изменение во времени магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, вызывает в нем электрический ток, который называется индукционным. Индукционный ток вызывается вихревым электрическим полем, которое создает электродвижущую силу. Величина ЭДС индукции определяется законом Фарадея:

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

Направление индукционного тока в контуре определяется правилом Ленца:

Индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им собственное магнитное поле компенсирует изменение магнитного потока. Этим же правилом определяется и направление вихревого электрического поля.

ЭДС индукции в прямом проводнике длиной l , движущемся со скоростью \mathbf{v} ($\mathbf{v} \perp \mathbf{I}$) в однородном магнитном поле:

$$|\mathcal{E}_i| = Blv \sin \alpha$$

α - угол между векторами \mathbf{B} и \mathbf{v} .

Как видно отсюда, если в лаб. системе есть магнитное поле, то в движущейся системе появляется еще и электрическое поле.

Индуктивность

Ток, текущий в замкнутом контуре, создает магнитное поле, которое образует магнитный поток, пронизывающий этот контур. Магнитный поток пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi = LI$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура и зависит от формы и размеров контура.

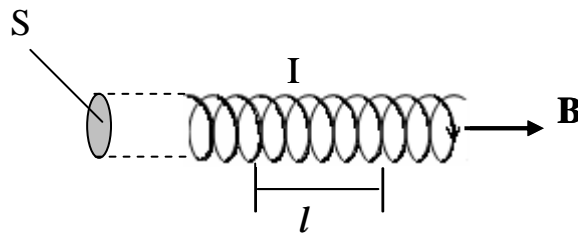
Самоиндукция

При изменении тока в витке возникает ЭДС индукции, которая препятствует изменению тока. Это явление называется самоиндукцией:

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Самоиндукцией объясняются экстратоки замыкания и размыкания.

Индуктивность соленоида



Магнитное поле соленоида:

$$B = \mu_0 \mu I n = \mu_0 \mu I \frac{N}{l}$$

Это поле создает магнитный поток:

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu I \frac{N}{l} S$$

Отсюда индуктивность одного витка соленоида:

$$L_i = \frac{\Phi}{I} = \mu_0 \mu \frac{N}{l} S$$

Поскольку витки соединены последовательно, то при изменении силы тока ЭДС индукции в каждом витке складываются и дают ЭДС индукции всего соленоида. Это означает, что и индуктивности отдельных витков должны складываться, тогда индуктивность всего соленоида:

$$L = L_i N = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S$$

Энергия магнитного поля.

Соленоид является устройством для накопления магнитного поля. Для увеличения тока в соленоиде надо совершить работу против ЭДС самоиндукции. Эта работа идет на накопление энергии магнитного поля. Энергия катушки с током:

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

Для магнитного поля эту формулу можно записать другим способом:

$$W_B = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S \left(\frac{Bl}{\mu_0 \mu N} \right)^2 = \frac{B^2 (Sl)}{2 \mu_0 \mu} = \frac{B^2 V}{2 \mu_0 \mu}$$

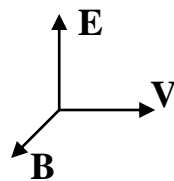
Если эту энергию разделить на объем соленоида V , то получим плотность энергии магнитного поля:

$$w_B = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}$$

Электромагнитные волны.

Электромагнитное поле полностью описывается уравнениями Максвелла. Это система четырех дифференциальных уравнений, с помощью которых можно определить в любой точке пространства электрические и магнитные поля системы зарядов и токов, которые их порождают.

Уравнения Максвелла допускают существование электрического и магнитного полей даже в отсутствии их источников – зарядов и токов. В этом случае поля переменные и существуют в виде электромагнитных волн, движущихся в пространстве со скоростью света. Скорость электромагнитных волн в вакууме можно найти из уравнений Максвелла и она равна:



$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

В электромагнитной волне выполняются соотношения $\mathbf{E} \perp \mathbf{B} \perp \mathbf{V}$, говорят, что векторы **E**, **B** и **V** образуют правую тройку векторов.

Шкала электромагнитных волн по мере уменьшения длины волны и увеличения частоты:

.....

1. Радиоволны (излучают колебания токов в антеннах)
2. Инфракрасное излучение (тепловое излучение)
3. Видимый свет (воспринимается глазом)
4. Ультрафиолетовое излучение (газоразрядные лампы с ртутью)
5. Рентгеновские волны (рентгеновская трубка)
6. Гамма-излучение (ядерные реакции)

.....

Теория относительности

Постулаты теории относительности

1. Первоначально принцип относительности был сформулирован Галилеем только для механических явлений. Эйнштейн распространил этот принцип на все явления природы:

Никакими физическими экспериментами нельзя определить движется данная система отсчета прямолинейно и равномерно или покоится.

Это означает, что все инерциальные системы отсчета равноправны.

2. В классической механике скорость распространения взаимодействия следует считать бесконечной. Силы взаимодействия частиц в некоторый момент времени определяются их координатами в этот же момент времени. При изменении координат некоторой частицы сила, с которой она действует на другие частицы меняется мгновенно. Такое положение не устраивало уже Ньютона, т.к. бесконечно быстрых движений в природе не может быть.

Поэтому можно предположить существование максимальной или абсолютной скорости c , быстрее которой не могут перемещаться материальные объекты. Из первого постулата теории относительности следует, что значение абсолютной скорости не зависит от системы отсчета.

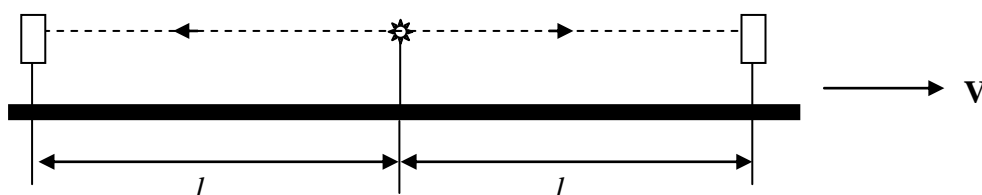
В качестве абсолютной скорости была выбрана скорость света. Экспериментально было обнаружено, что она не меняется при переходе из одной системы отсчета в другую (опыты Майкельсона).

Преобразования Лоренца.

Согласно первому постулату теории относительности все законы природы должны быть инвариантны по отношению к преобразованиям координат при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую. Преобразования координат и закон сложения скоростей Галилея не удовлетворяют этому принципу. Например, можно было бы выбрать систему отсчета, где тело движется со скоростью, большей скорости света.

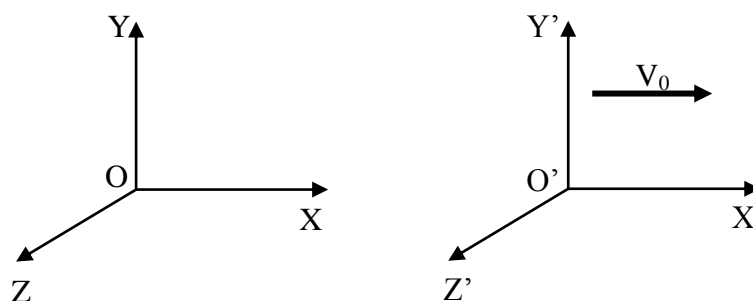
Второй постулат теории относительности изменяет природу времени. Со временем связано понятие одновременности.

На рисунке платформа, движущаяся со скоростью V , на ней находится источник света и по обе стороны от него на одинаковых расстояниях два детектора. Если источник испускает импульс света во все стороны, то в системе платформы импульс света дойдет до детекторов в один и тот же момент времени, так как свет проходит одно и то же расстояние до детекторов.



Скорость света c одинакова в любой системе отсчета, поэтому в лабораторной системе импульс света до левого детектора дойдет раньше, чем до правого, так как за время движения импульса света детекторы вместе с платформой успевают пройти какое-то расстояние. Это расстояние вычитается из полного пути для импульса света, движущегося влево и соответственно прибавляется для импульса, движущегося вправо. То есть понятие одновременности становится относительным. Это означает, что время в разных системах отсчета течет по-разному.

Преобразования Галилея в теории относительности заменяются на преобразования Лоренца. Пусть имеется две системы отсчета - покоящаяся O и O' , движущаяся относительно нее со скоростью V_0 вдоль оси X . Тогда координаты любого тела при переходе из одной системы в другую меняются следующим образом:



$$x = \frac{x' + V_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{V_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}$$

Закон сложения скоростей

Пусть скорость тела в лабораторной системе O равна $v_x = \frac{dx}{dt}$, а в движущейся O' - $v'_x = \frac{dx'}{dt'}$. Тогда связь между ними можно найти, дифференцируя преобразования Лоренца:

$$v_x = \frac{v'_x + V_0}{1 + \frac{v'_x V_0}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}{1 + \frac{v'_x V_0}{c^2}}, \quad v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}{1 + \frac{v'_x V_0}{c^2}}$$

По этому закону скорость тела не может превысить скорость света в любой системе отсчета. Кроме этого, скорость света остается одной и той же в

любой системе отсчета. При малых скоростях, когда $\frac{V_0}{c} \rightarrow 0$, получается классический закон сложения скоростей Галилея.

Сокращение размеров движущихся тел.

Пусть в системе O' покоится линейка длиной $l_0 = x'_2 - x'_1$. Тогда в системе O за длину линейки можно принять разность $l = x_2 - x_1$, измеренную в один и тот же момент времени $t_1 = t_2 = t_0$. При этом в движущейся системе концы линейки проходят метки x_1, x_2 в разные моменты времени t'_1, t'_2 . Длина линейки в лабораторной системе:

$$x_2 - x_1 = \frac{x'_2 + V_0 t'_2}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}} - \frac{x'_1 + V_0 t'_1}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}} = \frac{x'_2 - x'_1}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}} + V_0 \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}$$

Из преобразований Лоренца получим

$$t'_2 - t'_1 = \frac{-\frac{V_0}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}. \text{ Подставляя это выражение, получим:}$$

$$(x_2 - x_1) + \frac{\frac{V_0^2}{c^2}(x_2 - x_1)}{1 - \frac{V_0^2}{c^2}} = \frac{(x_2 - x_1)}{1 - \frac{V_0^2}{c^2}} = \frac{x'_2 - x'_1}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}$$

После преобразований получаем:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}$$

Движущиеся тела кажутся «сплюснутыми» вдоль направления движения.

Замедление времени

Пусть в движущейся системе в одной точке $x'_1 = x'_2$ происходят два события в разные моменты времени t'_1, t'_2 . Промежуток времени между этими событиями по часам движущейся системы $\tau = t'_2 - t'_1$. В лабораторной системе Эти события происходят в разных точках x_1, x_2 и в моменты времени t_1, t_2 . Промежуток времени между этими событиями по часам в лабораторной системе:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{(t'_2 - t'_1)}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}}}$$

Промежутки времени в лабораторной системе увеличиваются по сравнению с движущейся. Если этими событиями являются «тики» часов, то часы в собственной системе, где они покоятся, идут быстрее, чем в лабораторной, где они движутся. Из лабораторной системы все процессы в движущейся кажутся замедленными.

Пространство-время

В теории относительности пространство и время связаны между собой и образуют пространственно-временной континуум. Для его математического описания вводят 4-мерное пространство-время Минковского, то есть время становится четвертой координатой (ct) в дополнении к трем пространственным координатам (x, y, z). Переход из одной системы отсчета в другую соответствует повороту в этом пространстве.

В трехмерном Евклидовом пространстве, при любых преобразованиях координат сохраняется длина отрезка и длина вектора. Это утверждение записывается в виде $\Delta l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = \Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2 = \text{inv}$ и означает, что длина отрезка – инвариант относительно любых преобразований координат.

В четырехмерном пространстве – времени инвариантом является величина $c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2 t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2 = \text{inv}$. Эта величина представляет собой интервал между двумя событиями, которые происходят в разных точках пространства и в разные моменты времени. Знак «минус» показывает, что пространство Минковского является псевдоевклидовым. Именно такая запись интервала удовлетворяет преобразованиям Лоренца.

Релятивистский импульс и релятивистская энергия

Все законы природы должны быть записаны в релятивистско инвариантной форме. Это означает, что вместо трехмерных векторов формируются четырехмерные вектора и все уравнения записываются в четырехмерном виде. Каждый 4-вектор имеет три пространственные координаты и одну временную.

Импульс тела в теории относительности равен:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Три его координаты (p_x, p_y, p_z) представляют пространственную часть 4-вектора энергии-импульса. Временная часть этого вектора представляется в виде: $\frac{E}{c}$. Релятивистская энергия тела:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Квадрат длины вектора энергии-импульса является инвариантом относительно преобразований Лоренца:

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2c^2 = \text{inv}$$

Из формулы для импульса следует, что ни одно тело, обладающее массой не может двигаться со скоростью света. При приближении к скорости света импульс растет до бесконечности.

Это же касается и энергии тела. Единственным материальным объектом, двигающимся со скоростью света являются кванты электромагнитного поля – фотоны. Масса фотона при этом равна нулю. Импульс фотона можно определить из последней формулы:

$$p_\phi = \frac{E_\phi}{c}$$

Энергия покоя и масса тела.

В пределе малых скоростей $\frac{v}{c} \rightarrow 0$ импульс $p = mv$ и совпадает с классическим выражением для импульса. Энергия при таком переходе имеет вид:

$$E = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$$

Эта энергия включает в себя классическое выражение для кинетической энергии тела $\frac{mv^2}{2}$ и добавку, которую называют энергией покоя:

$$E_0 = mc^2$$

Энергия покоя – большая величина. Если изменение энергии в каком-то процессе значительно меньше, чем энергия покоя, то ее можно не учитывать в законе сохранения энергии (в начальном и конечном состояниях она практически одна и та же).

Энергию покоя надо учитывать в законе сохранения энергии тогда, когда происходят значительные выделения или поглощения энергии, например в ядерной физике или физике элементарных частиц.

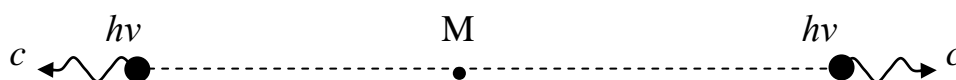
Для покоящейся в целом системы тел при скоростях составляющих ее частиц, много меньших скорости света, энергия покоя записывается в виде:

$$E_0 = Mc^2 = \sum m_i c^2 + \sum \frac{m_i v_i^2}{2} + U_{\text{вз}}$$

В правой части стоит полная энергия всех частиц, входящих в систему, включая их энергии покоя, кинетические энергии и энергию взаимодействия. Масса системы определяется из этого уравнения:

$$M = \sum m_i + \sum \frac{m_i v_i^2}{2c^2} + \frac{U_{\text{вз}}}{c^2}$$

В теории относительности масса системы уже не равна сумме масс входящих в нее частиц, как было в классической физике Ньютона. Например, масса системы двух фотонов, имеющих одну энергию и летящих со скоростью света в противоположных направлениях, равна:



$$M = \frac{2E_{\phi}}{c^2} = \frac{2hv}{c^2}$$

Масса системы двух фотонов отлична от нуля, хотя каждый из них массы не имеет.

Механические колебания и волны

Колебательное движение или колебательный процесс достаточно распространены в природе, описываются одинаковыми уравнениями и изучаются теорией колебаний.

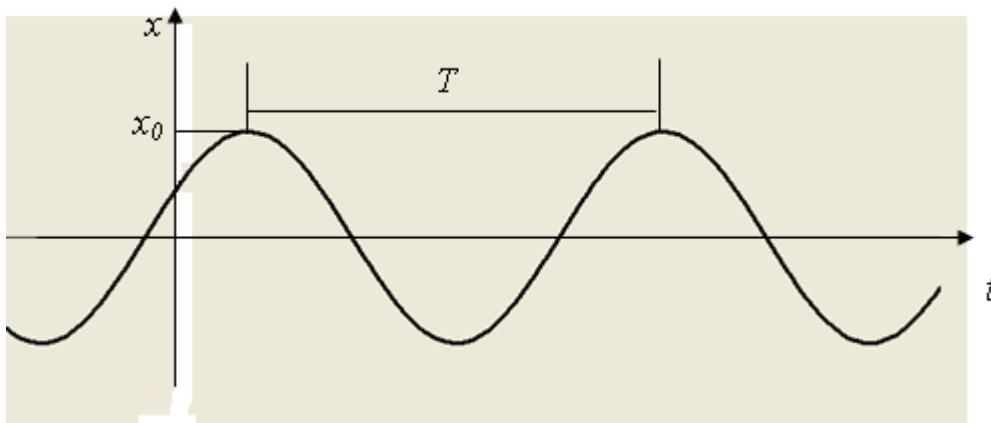
Система, совершающая колебательный процесс, периодически возвращается в первоначальное состояние.

Гармонические колебания

Простейший вид колебаний, при которых колеблющаяся величина изменяется во времени по закону синуса или косинуса:

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

График гармонических колебаний:



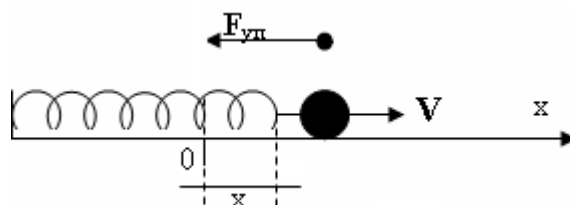
x_0 — амплитуда колебаний; T — период колебаний, время, за которое колеблющаяся величина x возвращается в первоначальное состояние.

$\nu = \frac{1}{T}$ — частота, количество колебаний за единицу времени:

$\omega = 2\pi\nu$ — циклическая частота:

$(\omega t + \varphi)$ — фаза колебаний (в радианах); φ — начальная фаза (в радианах).

Механические колебания



Рассмотрим движение груза массой m под действием упругой силы:

$$F_{уп} = -kx = ma = m\ddot{x} = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

Перенесем все слагаемые в правую часть уравнения:

$$mx'' + kx = 0$$

Разделив уравнение на m , получим дифференциальное уравнение гармонических колебаний:

$$x'' + \frac{k}{m}x = x'' + \omega^2 x = 0$$

Решением этого уравнения является функция $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$, что можно проверить непосредственной подстановкой:

$$x' = V = -x_0 \omega \sin(\omega t + \varphi); \quad x'' = -x_0 \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x(t)$$

Таким образом под действием упругой силы груз совершает гармонические колебания с циклической частотой $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Эту величину называют собственной частотой колебаний системы, а сами колебания называются собственными колебаниями системы. Период колебаний пружинного маятника:

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

Груз, подвешанный на нити, длиной l - математический маятник, тоже совершает гармонические колебания, период которых равен

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

При гармонических колебаниях сохраняется сумма кинетической и потенциальной энергий тела.

$$W_k = \frac{mV^2}{2} = \frac{mx_0^2 \omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi)}{2} = \frac{kx_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi)}{2}$$

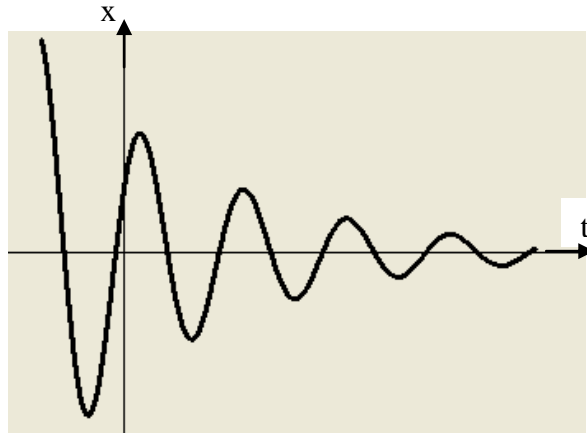
$$W_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_0^2 \cos^2(\omega t + \varphi)}{2}$$

$$W_{\text{полн}} = W_k + W_n = \frac{kx_0^2}{2} (\sin^2(\omega t + \varphi) + \cos^2(\omega t + \varphi)) = \frac{kx_0^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_0^2}{2} = \text{const}$$

При этом периодически кинетическая энергия переходит в потенциальную и наоборот.

Затухающие колебания

Если в системе присутствует трение, тогда полная энергия со временем уменьшается и колебания постепенно затухают:



Скорость затухания зависит от силы трения.

Вынужденные колебания. Резонанс.

В реальных системах колебания всегда затухают, так как всегда есть сила трения. Для того, чтобы колебания не затухали их надо «подпитывать» извне. Один из способов заключается в том, что в систему добавляют вынуждающую силу. Простейший вид вынуждающей силы – это сила, изменяющаяся во времени тоже по закону синуса или косинуса. Эта сила, деленная на массу, подставляется в правую часть уравнения гармонических колебаний:

$$x'' + \omega_0^2 x = f \cos(\omega t + \varphi)$$

Теперь в задаче есть две частоты: ω_0 – собственная частота системы и ω – частота вынуждающей силы. При наличии вынуждающей силы в системе возникают два вида колебаний – собственные с частотой ω_0 , которые со временем затухают и незатухающие колебания с частотой ω , которые называются вынужденными. Вынужденные колебания описываются формулой: $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$. Подставим эту формулу в уравнение вынужденных колебаний:

$$x' = V = -x_0 \omega \sin(\omega t + \varphi); \quad x'' = -x_0 \omega^2 \cos(\omega t + \varphi)$$

$$-x_0 \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + \omega_0^2 x_0 \cos(\omega t + \varphi) = f \cos(\omega t + \varphi)$$

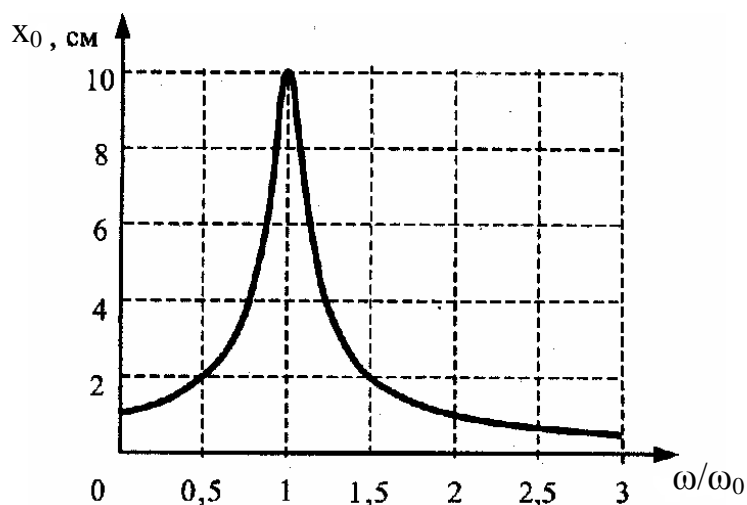
Отсюда можно получить выражение для амплитуды вынужденных колебаний:

$x_0 = \frac{f}{\omega_0^2 - \omega^2}$ и окончательно, получим решение для вынужденных колебаний:

$$x = \frac{f}{\omega_0^2 - \omega^2} \cos(\omega t + \varphi)$$

Амплитуда зависит от соотношения собственной частоты и частоты вынужденных колебаний. При $\omega \rightarrow \omega_0$ амплитуда колебаний растет неограниченно. Это явление называется резонансом. В реальных системах рост

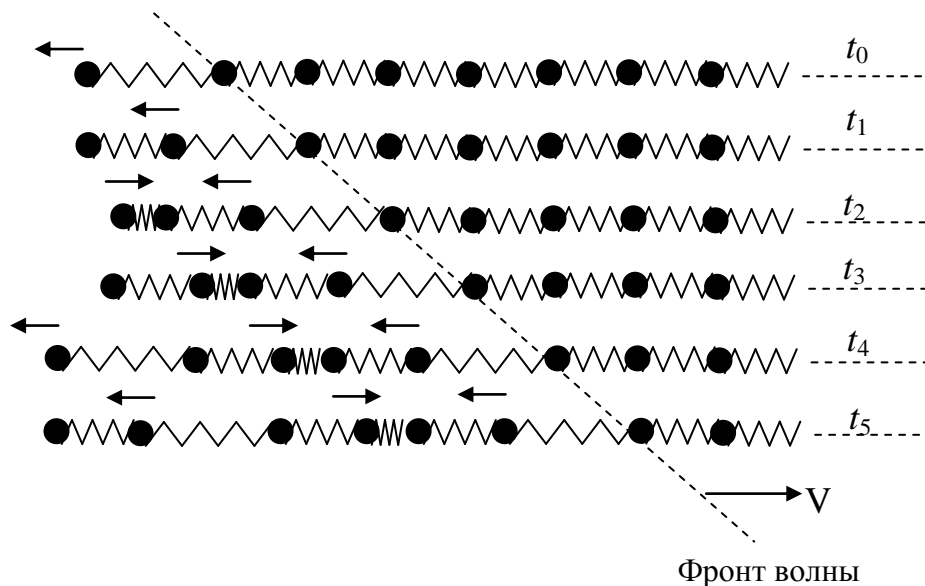
амплитуды при резонансе ограничивается силой трения, но она остается максимальной. Примерная зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы:



На рисунке резонанс соответствует значению $\omega/\omega_0=1$.

Упругие волны

Волной называют перенос состояния колебания в упругой среде с некоторой скоростью. Рассмотрим модель упругой среды, состоящую из шариков массой m , соединенных между собой одинаковыми пружинками.



Если вывести из положения равновесия крайний левых грузик (t_0), то он начнет колебаться по действием пружины. Вслед за ним начнет колебаться второй грузик (t_1), потом третий (t_2) и так вся цепочка со временем придет в колебательное движение. Колебания будут распространяться по цепочке с некоторой скоростью V , которая зависит от жесткости пружин. Грузы будут колебаться в разных фазах. Чем дальше от края цепочки находится груз, тем больше будет задержка по фазе относительно крайнего левого грузика.

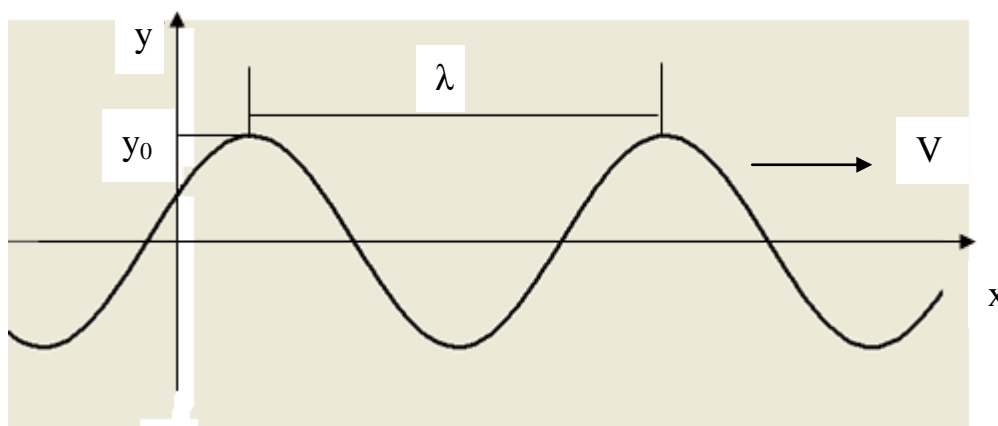
В процессе распространения волны частицы среды не перемещаются, они колеблются около положения равновесия. Перемещается фаза колебаний. Волна может передавать энергию.

Волны могут быть продольные (например звук), когда частицы среды движутся по направлению распространения волны и поперечные (например волны на воде, колебания струны), когда частицы среды движутся перпендикулярно направлению распространения волны.

Простейшая волна – это плоская гармоническая волна, которая распространяется вдоль оси X , частицы среды при этом совершают гармонические колебания (по закону синуса или косинуса). Рассмотрим поперечную волну, частицы среды в которой двигаются в направлении оси Y . Их колебания в некоторой точке x описываются формулой: $y = y_0 \cos(\omega(t - \Delta t))$. Поскольку фаза колебаний в точке x повторяет фазу колебаний в точке $x = 0$ с задержкой по времени Δt : $\Delta t = \frac{x}{V}$, тогда:

$$y = y_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{V}\right)\right) = y_0 \cos\left(\omega t - \omega \frac{x}{V}\right) = y_0 \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{TV}\right) = y_0 \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$$

$\lambda = VT$ – длина волны, расстояние, которая волна проходит за один период колебаний. Уравнение $y = y_0 \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$ называется уравнением плоской гармонической (или монохроматической) волны. Зависимость $y(x)$ в какой-то момент времени t :

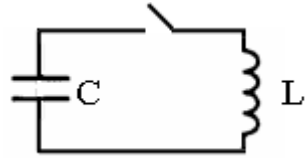


Со временем эта картина перемещается вдоль оси X со скоростью V .

Электромагнитные колебания. Переменный ток.

Колебательный контур.

Идеальный колебательный контур состоит из конденсатора емкостью C и катушки индуктивностью L , соединенных последовательно и образующих замкнутую цепь.



Если зарядить емкость до заряда q_0 и замкнуть ключ, в цепи начнутся колебания электрического тока. Из второго правила Кирхгофа:

$$U_c = \mathcal{E}_L \quad \text{или} \quad \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d^2q}{dt^2} = -Lq''$$

Здесь использовано определение силы тока: $I = \frac{dq}{dt} = q'$.

Переносим все слагаемые в левую часть и разделив уравнение на L , получим:

$$q'' + \frac{1}{LC}q = q'' + \omega^2q = 0$$

Это уравнение с точностью до обозначений совпадает с уравнением гармонических колебаний и описывает электромагнитные колебания в контуре. Решением уравнения будет функция:

$$q = q_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

Циклическая частота собственных колебаний $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Период колебаний:

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

Это формула Томсона.

Напряжение на конденсаторе: $U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} \cos(\omega t + \varphi) = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$,

Ток в цепи: $I = q' = -q_0\omega \sin(\omega t + \varphi) = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$. В процессе колебаний энергия электрического поля, запасенная в конденсаторе, переходит в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Полная энергия остается постоянной.

$$W_{\text{полн}} = W_E + W_B = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}$$

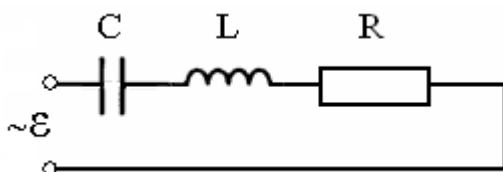
В реальном контуре всегда есть конечное сопротивление проводов, поэтому энергия со временем уменьшается (идет на нагревание проводов) и колебания затухают.

Переменный ток

Переменный ток создается генераторами, вырабатывающими напряжение, гармонически колеблющееся во времени. Для описания прохождения этого тока по цепи используют законы постоянного тока для мгновенных значений тока и напряжения. Это можно сделать для так называемого квазистационарного тока (медленно меняющегося). Критерием применимости законов постоянного тока является то, что длина электромагнитной волны значительно превышает длину контура l :

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega} \gg l.$$

Основными элементами электрической цепи для переменного тока являются резистор R , представляющий активное сопротивление, конденсатор C и катушка L , представляющие реактивные сопротивления.



Пусть все эти элементы соединены последовательно и через каждый из них проходит ток $i = I_0 \cos(\omega t)$. Из второго правила Кирхгофа следует, что:

$$u_C + u_R = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}$$

Перенесем ЭДС самоиндукции в левую часть уравнения:

$$u_C + u_R + L \frac{dI}{dt} = u_C + u_R + u_L = \varepsilon$$

Величину $u_L = L \frac{dI}{dt}$ (ЭДС самоиндукции, взятую с обратным знаком) называют напряжением на катушке.

Напряжение на резисторе при этом $u_R = iR = I_0 R \cos(\omega t) = U_R \cos(\omega t)$.

Напряжение на конденсаторе

$$u_C = \frac{q}{C} = \frac{\int i dt}{C} = \frac{I_0}{\omega C} \sin(\omega t) = U_C \sin(\omega t) = U_C \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Напряжение на катушке

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -I_0 L \omega \sin(\omega t) = -U_L \sin(\omega t) = U_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Колебания напряжения на реактивных сопротивлениях сдвинуто по фазе относительно колебаний тока. Для амплитуд колебаний напряжения (амплитудное значение) можно предложить аналог закона Ома:

$$U_R = I_0 R;$$

$$U_C = I_0 R_C = I_0 \frac{1}{\omega C};$$

$$U_L = I_0 R_L = I_0 \omega L$$

$$\boxed{R_C = \frac{1}{\omega C}} \quad \text{- емкостное сопротивление;}$$

$$\boxed{R_L = \omega L} \quad \text{- индуктивное сопротивление}$$

Мощность тепловыделения на активном сопротивлении для переменного тока – величина, быстро меняющаяся во времени: $N = I_0 U_0 \cos^2(\omega t)$. Обычно пользуются величиной, усредненной по времени. При усреднении $\cos^2(\omega t)$ по времени получается величина 0,5.

$$N_{\text{ср}} = \frac{I_0 U_0}{2} = I_{\text{д}} U_{\text{д}}$$

$$\boxed{I_{\text{д}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}}$$

$$\boxed{U_{\text{д}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}}$$

Действующие значения тока $I_{\text{д}}$ и напряжения $U_{\text{д}}$ – это значения для постоянного тока, при которых выделяется такая же энергия, как и при переменном токе.

Тригонометрия

$$1) \cos(\omega t) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} (\cos 0 + \cos(2\omega t)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \quad \text{При}$$

усреднении по времени второе слагаемое дает ноль, остается $\frac{1}{2}$.

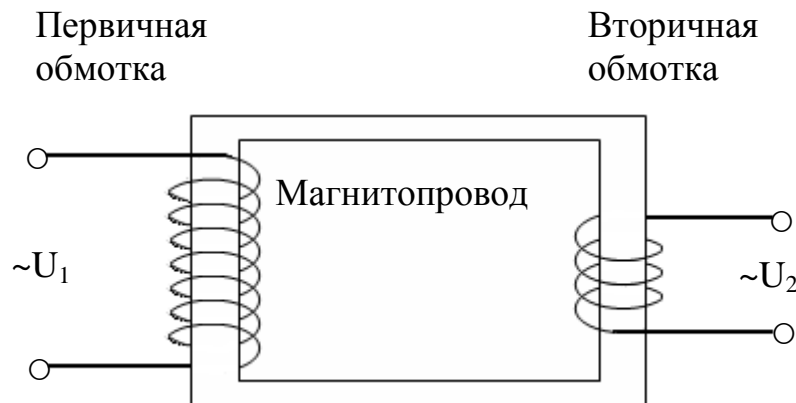
$$2) \cos(\omega t + \varphi) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} (\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)) = \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi)$$

При усреднении по времени слагаемое дает ноль, остается $\frac{1}{2} \cos \alpha$

Если есть сдвиг по фазе между колебаниями тока и напряжения, то средняя мощность определяется выражением

$N_{\text{ср}} = \frac{I_0 U_0}{2} \cos \varphi = I_{\text{д}} U_{\text{д}} \cos \varphi$. Качество потребителей электроэнергии определяется значением $\cos \varphi$, которое называется в электротехнике коэффициентом мощности.

Трансформатор



Для повышения или понижения переменного напряжения используется трансформатор. Трансформатор состоит из двух обмоток – катушек, намотанных на один каркас из ферромагнетика, который называется магнитопроводом. Число витков в первой катушке N_1 , во второй – N_2 .

Принцип действия трансформатора состоит в следующем. Так как катушки намотаны на один магнитопровод, то, когда через первичную катушку идет переменный ток, обе катушки пронизывает один и тот же магнитный поток Φ . В каждом витке обеих катушек возникает ЭДС индукции $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Все витки каждой катушки соединены параллельно, поэтому электродвижущие силы складываются и тогда напряжения на катушках будут равны:

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad U_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Отсюда следует, что:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

Если $N_2 < N_1$, то $U_2 < U_1$ и трансформатор называется понижающим.

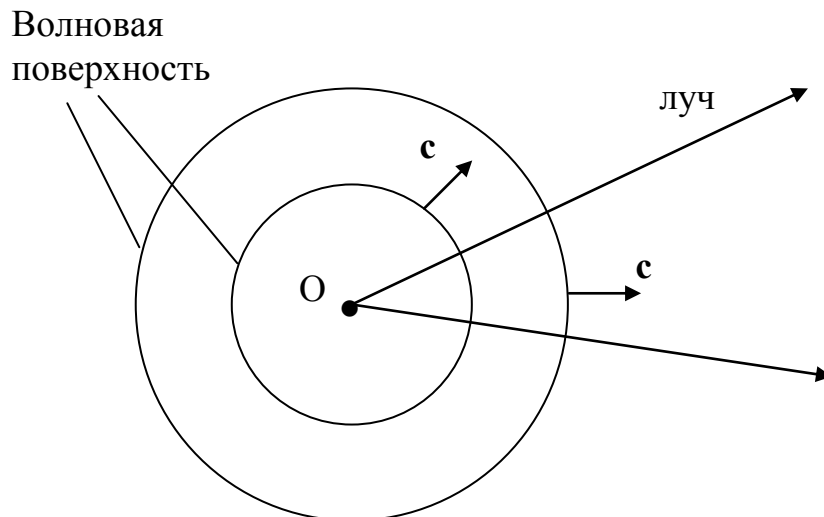
Если $N_2 > N_1$, то $U_2 > U_1$ и трансформатор называется повышающим.

Идеальный трансформатор передает мощность без потерь, то есть:

$$\boxed{U_1 I_1 = U_2 I_2}$$

Геометрическая оптика

Видимый свет представляет собой электромагнитную волну с очень малой длиной волны λ . Законы геометрической оптики являются предельным случаем законов волновой оптики, когда длина волны значительно меньше размеров задачи (расстояний, которые проходит свет, размеров линз, экранов, оптических систем и так далее).



Любой протяженный источник света можно представить как набор точечных источников. Рассмотрим точечный источник света O . Он является источником электромагнитной волны, которая расходится из него во все стороны со скоростью c . Это сферическая волна. Точки пространства, в которых колебания электрического поля происходят в одной фазе, образуют волновые поверхности. Для сферической волны эти поверхности являются концентрическими сферами с центром в точке O . Скорость распространения волны перпендикулярна волновой поверхности во всех ее точках. Аналогом сферической волны являются круги на воде, которые расходятся от брошенного в воду камня.

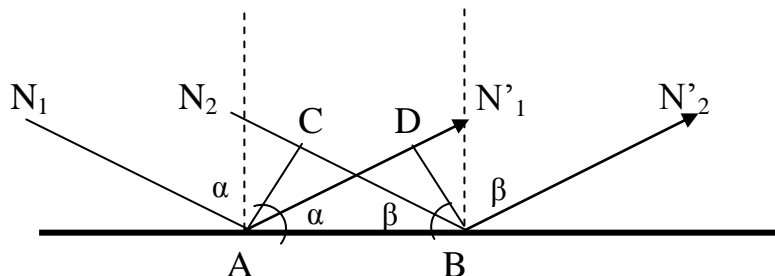
Лучом называют линию, направленную вдоль скорости распространения волны. При распространении света в однородной среде лучи являются прямыми линиями, выходящими из источника света. В этом смысле говорят о прямолинейном распространении света. Вдоль лучей переносится энергия волны.

Попадая в глаз, пучок лучей фокусируется в точку на сетчатке. В этом месте концентрируется весь поток энергии от точечного источника, который попал в глаз. Мы видим изображение источника света в виде точки. Глаз фиксирует усредненную по времени энергию электромагнитных колебаний, попадающую в единицу времени на единицу поверхности сетчатки. Эта величина называется интенсивностью света.

С помощью лучей можно определить положение источника, как точки, где эти лучи пересекаются. Построением лучей света и определением положения источника или его изображения занимается геометрическая оптика.

Отражение света

Свет, попадая на гладкую поверхность испытывает отражение, при этом ход лучей меняется. Ход лучей при отражении можно определить построения волновых поверхностей падающей и отраженной волны.



Рассмотрим два параллельных падающих луча N_1 и N_2 . Угол падения – α . Волновая поверхность падающей волны представляет собой плоскость, перпендикулярную лучам. На рисунке – это линия AC , перпендикулярная N_1 и N_2 . Электрическое поле в точках A и C колеблется синхронно в одной фазе. Для отраженной волны это лучи N'_1 и N'_2 и волновая поверхность представлена линией BD , перпендикулярной N'_1 и N'_2 . Угол отражения β . Точки B и D также колеблются в одной фазе. Когда падающая волна (луч N_2) пройдет расстояние CB , отраженная (луч N'_1), двигаясь с той же скоростью, пройдет расстояние AD .

$$AD = CB$$

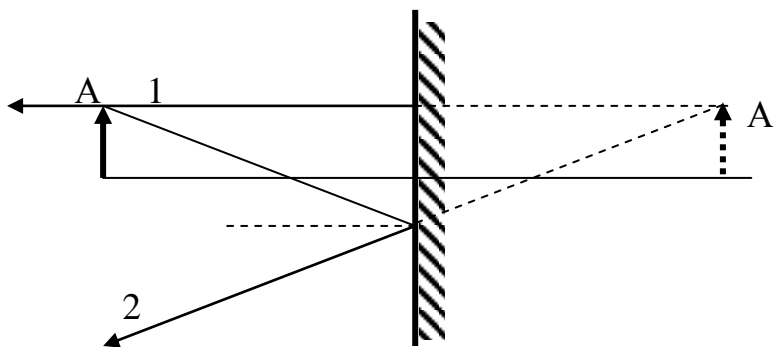
Из этого равенства следует равенство прямоугольных треугольников $\triangle ABC$ и $\triangle ABD$ (у них общая гипотенуза AB и равные катеты AD и BC). Тогда и углы $\angle CAB = \alpha$ и $\angle DAB = \beta$ будут равны между собой.

Таким образом получили закон отражения:

Угол падения равен углу отражения

Плоское зеркало

Для построения изображения в плоском зеркале используют два луча. Один идет от предмета A перпендикулярно поверхности зеркала. После

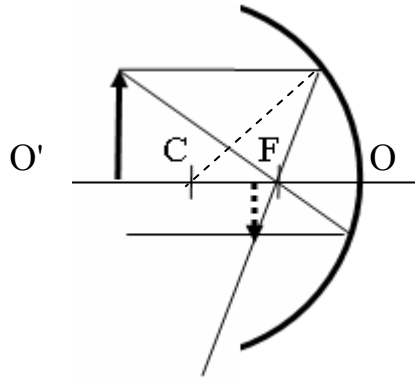


отражения он возвращается по тому же пути назад (1). Второй луч идет под

произвольным углом α , отражается по закону отражения и возвращается в виде луча 2. Изображение предмета находим на пересечении продолжения лучей 1 и 2 за зеркалом (A'). Это мнимое изображение.

Сферическое зеркало

Отражающей поверхностью сферического зеркала является сфера. Зеркала бывают вогнутые и выпуклые.



Линия $O'O$, проходящая через центр сферы C вдоль ее радиуса, называется главной оптической осью. Точка F , расположенная на половине расстояния от центра до зеркала, называется фокусом зеркала.

$$OF = \frac{OC}{2} = \frac{R}{2}$$

Можно выделить три луча, используя любые два из которых, можно построить изображение предмета в зеркале.

1) Луч, идущий от предмета параллельно главной оптической оси, отражаясь от зеркала проходит через фокус.

2) Луч, идущий от предмета через фокус, отражаясь от зеркала, идет параллельно главной оптической оси.

Это справедливо для малых углов отражения. Для параболического зеркала это справедливо для всех углов.

3) Луч, идущий от предмета через центр, отражается по тому же пути.

Изображение, которое получается при пересечении отраженных лучей называется действительным, изображение, которое получается при пересечении продолжения отраженных лучей, называется мнимым.

Если высота предмета y , то высоту изображения y' можно найти из соотношения:

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{d}$$

где f – расстояние от зеркала до изображения, d – расстояние от зеркала до предмета. Эти расстояния можно из формулы сферического зеркала:

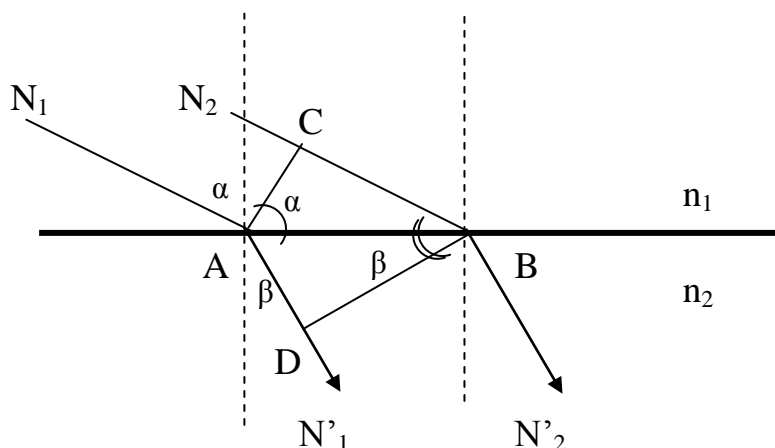
$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$$

Преломление света

Луч света на границе раздела двух сред испытывает преломление. Причиной преломления луча является изменение скорости света при переходе из одной среды в другую. Отношение скорости света в вакууме c к скорости света в среде V называется показателем преломления среды:

$$n = \frac{c}{V}$$

Рассмотрим границу раздела двух сред с показателями преломления $n_1 = \frac{c}{V_1}$ и $n_2 = \frac{c}{V_2}$. Падающая волна представлена двумя параллельными лучами N_1 и N_2 , угол падения α . Волновая поверхность – отрезок AC . Преломленная волна представлена лучами N'_1 и N'_2 , угол преломления β . Волновая



поверхность преломленной волны представлена отрезком BD .

Пока падающая волна проходит расстояние CB со скоростью $V_1 = \frac{c}{n_1}$, преломленная волна пройдет за то же время расстояние AD со скоростью $V_2 = \frac{c}{n_2}$. Из прямоугольных треугольников $\triangle ABC$ и $\triangle ABD$ найдем:

$$CB = AB \sin \alpha, \quad AD = AB \sin \beta$$

Время, за которое падающая волна проходит расстояние CB :
 $t = \frac{CB}{V_1} = \frac{CB \cdot n_1}{c} = \frac{AB \sin \alpha \cdot n_1}{c}$. Точно также найдем время, за которое

преломленная волна проходит расстояние AD: $t = \frac{AD}{V_2} = \frac{AD \cdot n_2}{c} = \frac{AB \sin \beta \cdot n_2}{c}$.

Приравнивая эти два выражения, получим:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Это закон преломления или закон Снеллиуса.

Когда свет распространяется из оптически более плотной среды в менее плотную ($n_1 > n_2$), угол преломления больше угла падения. В пределе, когда при увеличении угла падения α угол преломления $\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}$, свет не выходит из первой среды во вторую. Это явление называется полным внутренним отражением. Угол падения, при котором возникает эффект полного внутреннего отражения можно найти из выражения:

$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

Линзы

Линза – это оптический прибор, представляющий собой стеклянный объем ограниченный двумя сферическими поверхностями. У тонкой линзы радиусы поверхностей одинаковы и значительно превышают диаметр самой линзы. Линзы бывают собирающие (двояковыпуклые) и рассеивающие (двояковогнутые).

Лучи света, проходя через линзу, преломляются и изменяют свое направление. Чем дальше они проходят от центра линзы, тем сильнее отклонение от первоначального направления.

Параллельные лучи, идущие вдоль главной оптической оси NN после прохождения линзы собираются в ее фокусе F. Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой линзы:

$$D = \frac{1}{F}$$

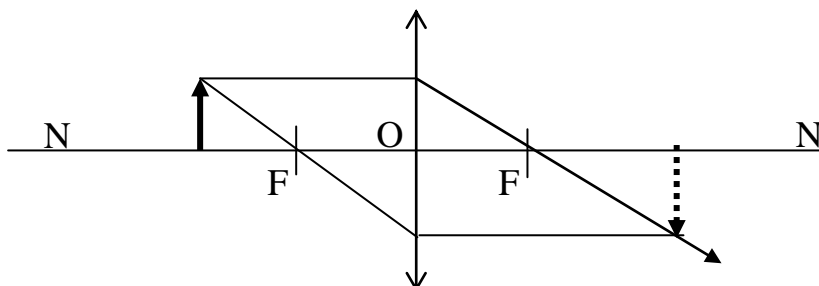
Выделяют три луча, используя любые два из которых, можно построить изображение предмета в линзе.

1) Луч, идущий от предмета параллельно главной оптической оси, после линзы идет через ее фокус.

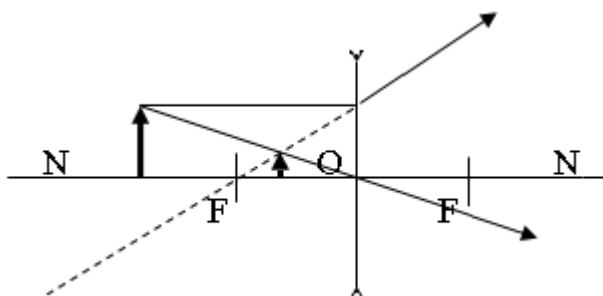
2) Луч, идущий от предмета через фокус, после линзы идет параллельно главной оптической оси.

3) Луч, идущий от предмета через центр линзы не изменяет своего направления.

Построение изображения в собирающей линзе:



Построение изображения в рассеивающей линзе:



Фокальная плоскость - добавить

Формула линзы

Если d – расстояние от центра линзы до предмета, f – расстояние от центра линзы до изображения, то справедлива формула линзы:

$$\pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F}$$

Знак «+» соответствует действительному предмету, действительному изображению и собирающей линзе, знак «-» соответствует мнимому предмету, мнимому изображению и рассеивающей линзе.

Дисперсия света

Скорость света (и показатель преломления n) в среде зависит от длины волны излучения или частоты света:

$$n^2 = 1 + \frac{A}{\omega_0 - \omega}$$

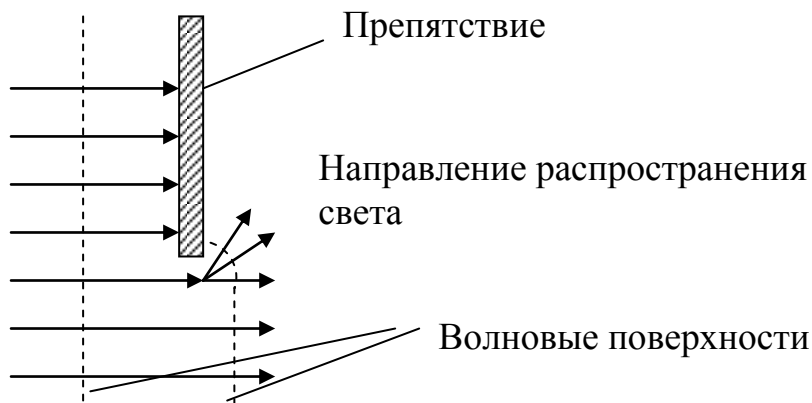
При уменьшении частоты (увеличении длины волны) показатель преломления уменьшается, при увеличении частоты n – увеличивается.

Волновая оптика

Волновые свойства света проявляются при взаимодействии с препятствиями, размеры которых сравнимы с длиной волны света (небольшие отверстия, щели, предметы, решетки и др.).

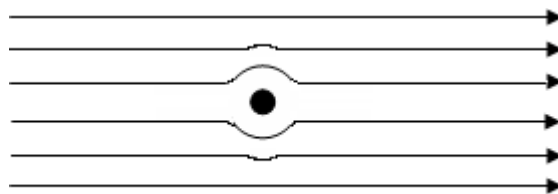
Дифракция.

Волновые свойства проявляются, как отклонения от законов геометрической оптики. Дифракция – это огибание светом препятствий, т.е. отклонение от прямолинейного распространения.



На краю препятствия происходит искривления волновой поверхности, так как каждая точка, до которой дошла волна становится источником вторичных волн. Огибающая вторичных волн будет новой волновой поверхностью. Это принцип Гюйгенса-френеля.

Если волна на своем пути встречает препятствие размером меньше длины волны ($l < \lambda$), то она огибает препятствие и распространяется дальше так, как будто его и не было («не замечает» мелкие препятствия).



Именно поэтому свет проходит сквозь прозрачное стекло, «не замечая» атомы, из которых это стекло состоит.

Интерференция.

Интерференцией называют сложение гармонических колебаний. Применительно к световым волнам – это сложение колебаний, пришедших в данную точку от разных источников.

Сложение колебаний приводит к перераспределению интенсивности света в пространстве и появлению интерференционных максимумов и минимумов.

Когерентные источники – источники волн, обладающих одной частотой и разность фаз между которыми не меняется во времени. То есть излучение происходит синхронно. Складывая излучение от таких источников, можно наблюдать интерференционную картину.

Естественные источники света не являются когерентными. Для получения когерентных волн используют один источник, излучение которого делят на две части с помощью зеркал, призм и других приспособлений.

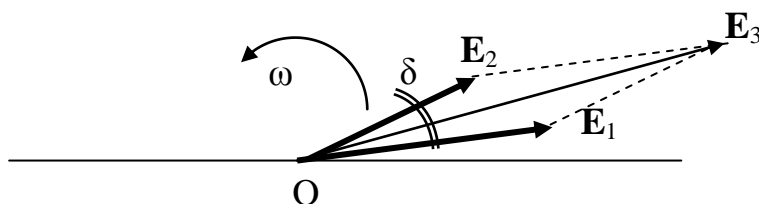
Если две волны (E_1 и E_2) пришли в одну точку пространства, то суммарное колебание напряженности электрического поля в этой точке будет суммой двух гармонических колебаний:

$$E_3 \cos(\omega t + \varphi_3) = E_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + E_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

Амплитуда суммарного колебания E_3 зависит от разности фаз $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$.

Складывать колебания удобно на векторной диаграмме, где каждое колебание представлено вектором, с длиной $|E|$, вращающимся вокруг начала координат с угловой скоростью ω .

На рисунке изображены два вектора E_1 и E_2 , вращающихся вокруг оси O с угловой скоростью ω . Начальные фазы колебаний φ_1 и φ_2 соответствуют углам, которые эти векторы составляют с горизонтальной осью. При вращении разность фаз δ (угол между векторами) остается неизменной.



Геометрическая сумма (правило «параллелограмма») двух векторов представляет собой суммарное колебание E_3 .

При сложении двух векторов можно выделить два предельных случая:

1) . $\delta = 0, 2\pi, \dots, 2k\pi$

В этом случае векторы накладываются друг на друга (колебания происходят «в фазе») и амплитуда суммарного колебания равна сумме амплитуд: $E_3 = E_1 + E_2$. Этот случай соответствует интерференционному максимуму. При одинаковых амплитудах складываемых колебаний ($E_1 = E_2 = E$) амплитуда суммарного колебания $E_3 = 2E$.

$$\delta = \pi, 3\pi, \dots, (2k+1)\pi$$

энергия

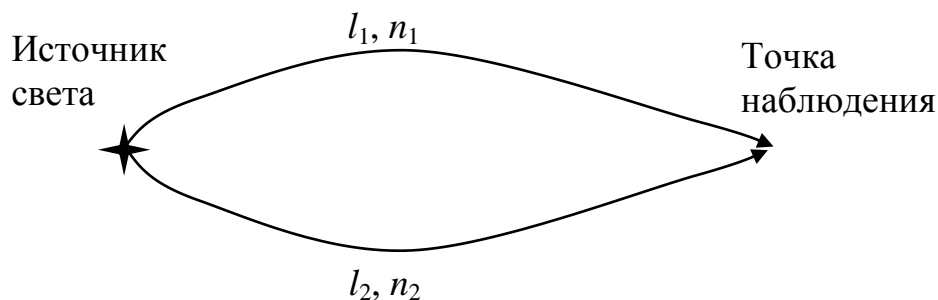
колебаний, пропорциональная квадрату амплитуды ($I \propto E^2$), равна $I_3 = 4I$. То есть в интерференционном максимуме интенсивность колебаний возрастает в четыре раза.

2).

В этом случае вектора направлены в противоположном направлении (колебания происходят в «противофазе»). При сложении они вычитаются друг из друга: $E_3 = |E_2 - E_1|$. Этот случай соответствует интерференционному минимуму. При одинаковых амплитудах складывающихся колебаний амплитуда суммарного колебания равна нулю.

Интенсивность света в минимуме также равна нулю.

При сложении двух волн, пришедших из одного источника, но двигавшихся по разным путям и с разной скоростью, разность фаз определяется задержкой во времени.



На рисунке свет из источника идет в точку наблюдения по двум световодам. Фаза первой волны в точке наблюдения

$$\varphi_1 = \varphi_0 - \frac{\omega l_1}{v_1} = \varphi_0 - \frac{\omega l_1 n_1}{c} = \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l_1 n_1$$

Для второй волны получим такое же выражение $\varphi_2 = \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l_2 n_2$.

Разность фаз колебаний в точке наблюдения: $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (l_2 n_2 - l_1 n_1) = \frac{2\pi \Delta}{\lambda}$.

Разность фаз определяется оптической разностью хода $\Delta = l_2 n_2 - l_1 n_1$.

Условием максимума интерференции является $\frac{2\pi \Delta}{\lambda} = 2k\pi$ или

$$\Delta = k\lambda$$

то есть оптическая разность хода равна целому числу длин волн.

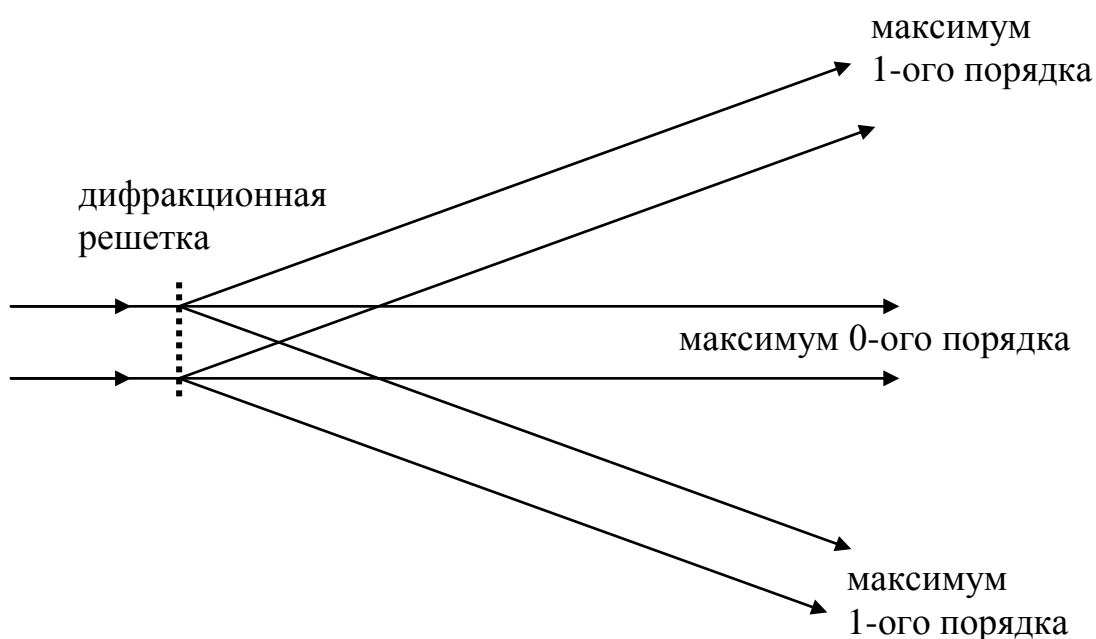
Условием минимума интерференции является $\frac{2\pi \Delta}{\lambda} = (2k+1)\pi$ или

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

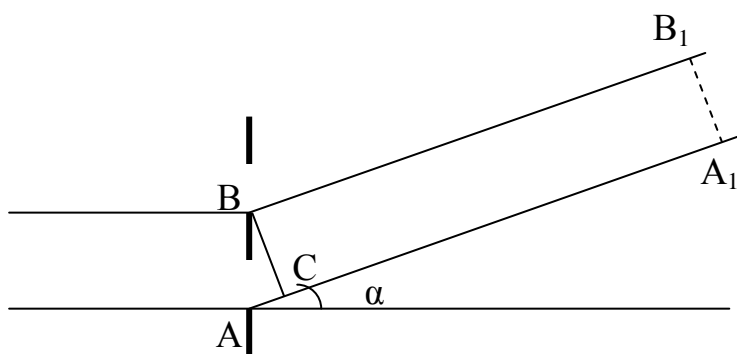
то есть оптическая разность хода в этом случае равна нечетному числу полуволен.

Дифракционная решетка

Дифракционной решеткой называется набор параллельных щелей, разделенных равными непрозрачными для света промежутками. Параллельный пучок света, падающий перпендикулярно на поверхность дифракционной решетки, выходит из нее в виде набора пучков света, идущих под разными углами к поверхности решетки. Каждый такой пучок образуется в результате сложения волн, идущих от всех щелей решетки при выполнении для них условия интерференционного максимума.



Условия интерференционного максимума можно получить, рассматривая два луча, идущих из соседних щелей решетки под углом α к перпендикуляру к поверхности решетки.



В точках А и В колебания происходят в одной фазе, так как они лежат на волновой поверхности падающей плоской волны. Разность фаз между этими колебаниями равна нулю. Колебания, распространяющиеся параллельно вдоль лучей $ВВ_1$ и $АА_1$ имеют разность хода, так как длина луча $ВВ_1$ меньше, чем

длина луча AA_1 на величину $\Delta = AC = AB \sin \alpha$. При сложении колебаний, происходящих в A_1 и B_1 , интерференционный максимум будет в случае, когда $\Delta = AB \sin \alpha = k\lambda$. Обозначая величину $AB=d$ (это постоянная дифракционной решетки), получим

$$d \sin \alpha = k\lambda$$

$k = 0, 1, 2, \dots$ - это порядок максимума. Поскольку условия интерференционного максимума совпадают для всех щелей решетки, то происходит сложение всех лучей и общая интенсивность максимума пропорционально N^2 , то есть квадрату числа щелей решетки.

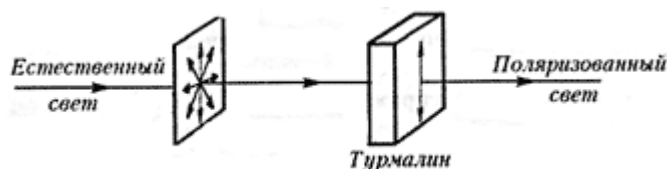
Изменение фазы колебаний при отражении.

При отражении волны от более плотной среды фаза волны меняется на π , то есть происходит потеря полуволны ($-\frac{\lambda}{2}$). Это надо учитывать при определении условия интерференции.

Поляризация света

Это эффекты, связанные с векторной природой напряженности электрического поля, колеблющегося в электромагнитной волне.

В луче света от обычного источника присутствуют колебания вектора напряженности электрического поля E всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения световой волны. Такая волна называется естественной волной.



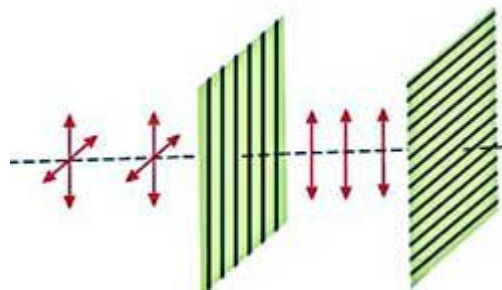
При прохождении через кристалл турмалина свет поляризуется.

У поляризованного света колебания вектора напряженности E происходят только в одной плоскости, которая совпадает с осью симметрии кристалла.

Частичная поляризация света происходит при его отражении.

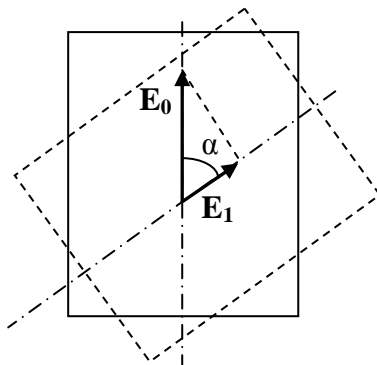
Поляризацию света можно обнаружить, если за первым кристаллом (поляризатором) поставить второй кристалл турмалина (анализатор).

При одинаково направленных осях двух кристаллов световой луч пройдет через оба и лишь чуть ослабнет за счет частичного поглощения света



кристаллами.

Если второй кристалл начать поворачивать, т.е. сместить положение оси симметрии второго кристалла относительно первого, то луч будет постепенно гаснуть и погаснет совершенно, когда положение осей симметрии обоих кристаллов станет взаимно перпендикулярным. Этот процесс виден на рисунке:



Если напряженность электрического поля света, прошедшего через поляризатор, обозначить E_0 , то напряженность электрического поля света, прошедшего через анализатор:

$$E_1 = E_0 \cos \alpha$$

Так как интенсивность света пропорциональна $\propto E^2$, то:

$$I_1 = I_0 \cos^2 \alpha$$

Это закон Малюса, который определяет, как меняется интенсивность света, прошедшего через анализатор в зависимости от угла поворота кристалла.

Явление поляризации используют для демонстрации трехмерных изображений, когда на глаза надевают очки с кристаллами вместо стекол, с повернутыми на 90° осями. В это случае каждый глаз видит свое изображение, созданное поляризованным светом.

Квантовая механика

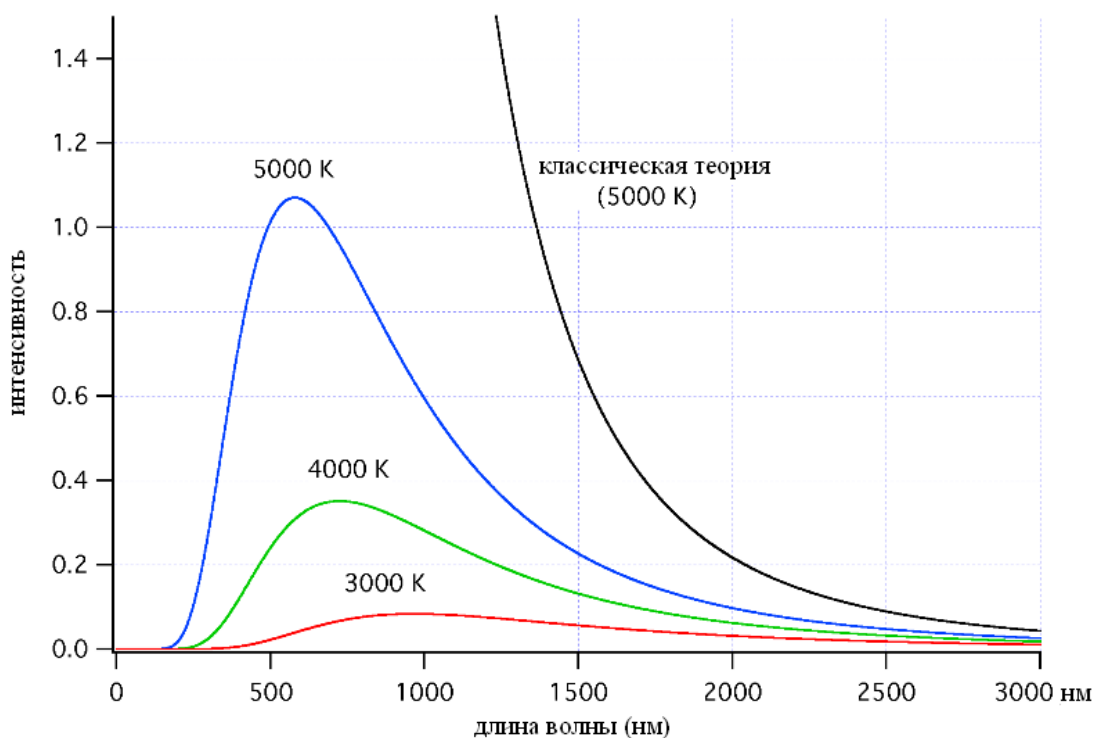
Поведение и свойства объектов микромира отличаются от поведения и свойств классической частицы – материальной точки. Экспериментальное обнаружение этого факта привело к созданию квантовой механики – физики микрочастиц.

Основным свойством микромира является то, что энергия связанных частиц (например электронов, удерживающихся в атоме) может принимать только ряд определенных (дискретных) значений. Изменяться эта энергия может только путем поглощения или испускания определенных порций, которые называются квантами. Наряду с энергией и другие характеристики частиц могут квантоваться (например импульс, момент импульса и так далее).

Причиной такого поведения является то, что каждый квантовый объект кроме корпускулярных обладает еще и свойствами волны. Это явление называют корпускулярно-волновым дуализмом.

Тепловое излучение

Тепловым излучением называют излучение электромагнитных волн нагретым телом. Излучают электроны, совершающие хаотические тепловые движения (во время колебаний, столкновений с атомами и др.). Попытка объяснить наблюдаемые свойства теплового излучения методами классической статистической физики и термодинамики привело к парадоксу: оказалось невозможным равновесие между нагретым телом и его излучением. На рисунке показан спектр теплового излучения абсолютно черного тела. Абсолютно



черным называют тело, которое поглощает все падающее на него излучение. Наряду с экспериментальными зависимостями спектра от длины волны при различных температурах приведена кривая, соответствующая классической

теории излучения (закон Рэлея-Джинса). На коротких длинах волн теория и эксперимент резко различаются. Согласно классической теории энергия излучения в коротковолновой области стремится к бесконечности. Этот парадокс получил название «ультрафиолетовая катастрофа». С точки зрения классической физики энергия постоянно переходит в коротковолновую область спектра небольшими порциями и там накапливается.

Для ликвидации парадокса Планк предложил гипотезу, согласно которой электроны могут излучать энергию только порциями – квантами, пропорциональными частоте излучения:

$$\varepsilon = h\nu$$

h – постоянная Планка. Для излучения в коротковолновой части спектра у электронов просто не хватит энергии и никакой катастрофы не будет.

Фотоэффект

Фотоэффектом называют явление испускание электронов некоторыми металлами под действием электромагнитного излучения. Электроны поглощают энергию электромагнитной волны (ускоряются электрическим полем), и становятся способными преодолеть энергетический барьер и вылететь за пределы металла.

Законы фотоэффекта:

1. Сила фототока прямо пропорциональна плотности светового потока (интенсивности света).

2. Максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света ν_0 (или максимальная длина волны λ_0), при которой ещё возможен фотоэффект, и если $\nu < \nu_0$, то фотоэффект уже не происходит.

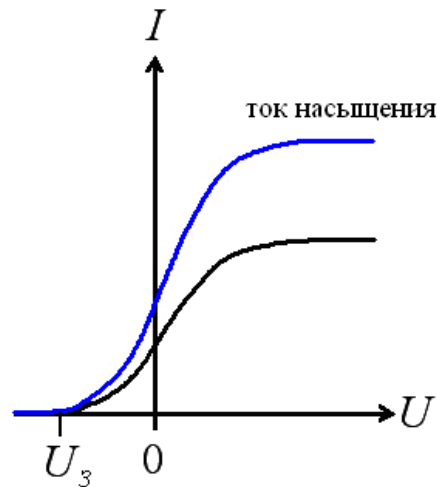
Экспериментальные законы фотоэффекта нельзя объяснить с помощью классических представлений об электронах. Эйнштейн дополнил гипотезу Планка, предположив, что электроны не только испускают энергию в виде излучения порциями-квантами, но и поглощают ее теми же порциями.

Уравнение Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{\text{макс}}$$

Оно представляет собой закон сохранения энергии во время фотоэффекта. Величина $A_{\text{вых}}$ – работа выхода металла. Это тот барьер, который электрону надо преодолеть, чтобы покинуть металл. $E_{\text{макс}}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов. Красная граница фотоэффекта определяется из формулы:

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{вых}}$$



На рисунке приведена вольт-амперная характеристика фотоэлемента. U_3 – напряжение задержки, при котором фотоэлектроны не попадают на анод. Ток насыщения соответствует условию, когда все электроны, покинувшие катод достигают анода.

ФОТОНЫ

Если электромагнитные волны излучаются квантами, поглощаются квантами, то естественно предположить, что они и распространяются квантами. Квант электромагнитного излучения получил название – фотон. Фотоны ведут себя как частицы (их называют квазичастицы, так как масса фотона равна нулю). Они обладают энергией и импульсом. Импульс можно получить по формуле теории относительности:

$$\frac{\varepsilon_{\phi}^2}{c^2} - p_{\phi}^2 = m_{\phi}^2 c^2 = 0, \text{ отсюда: } p_{\phi} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

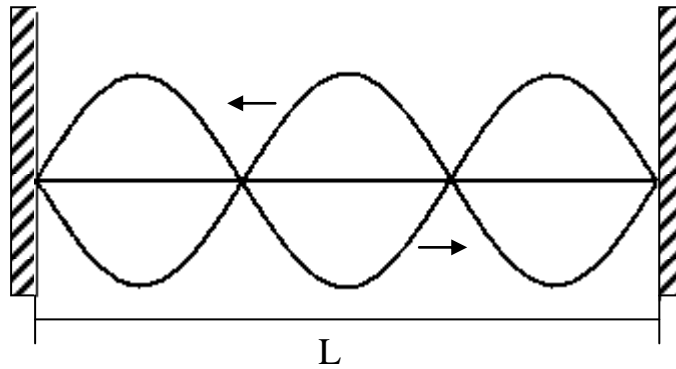
Окончательно:

$\varepsilon_{\phi} = h\nu$ $p_{\phi} = \frac{h}{\lambda}$

На примере фотонов можно наблюдать корпускулярно – волновой дуализм, когда один и тот же квантовый объект в одних экспериментах ведет себя как волна (дифракция), в других – как частица (фотоэффект).

Волны де-Бройля

Все квантовые частицы как и фотоны обладают волновыми свойствами. Квантованность значений энергии и некоторых других характеристик вызывается тем, что волна в ограниченном пространстве может существовать только как стоячая волна.



Пример одномерной стоячей волны показан на рисунке. Две волны, идущие в противоположных направлениях, отражаются от зеркал и накладываются друг на друга. Разность фаз в каждой точке не меняется со временем в том случае, когда на длине L укладывается целое число полуволен: $L = (2k + 1)\lambda$. В любом другом случае в результате интерференции падающей и отраженной волны они уничтожаются со временем.

Так же происходит и с квантовой частицей, которая движется в ограниченном пространстве (например электрон в атоме). Она может находиться только в тех состояниях, когда длина ее волны удовлетворяет условию стоячих волн.

Согласно квантовой механике с каждой частицей связана волна, которая называется волной де-Бройля.

Корпускулярные (энергия, импульс) и волновые (частота, длина волны) свойства частицы связаны между собой формулами де-Бройля:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= h\nu \\ p &= \frac{h}{\lambda} \end{aligned}$$

Волновые свойства частицы определяются ее волновой функцией. Волновая функция частицы задается при решении уравнения Шредингера, которое в квантовой механике играет роль второго закона Ньютона.

Квадрат модуля волновой функции определяет вероятность для частицы находиться в заданное время в заданном месте, поэтому волны де-Бройля еще называют волнами вероятности.

Пределы применимости классического описания частиц дают соотношения неопределенностей Гейзенберга:

$$\begin{aligned} \Delta p_x \cdot \Delta x &\geq h \\ \Delta p_y \cdot \Delta y &\geq h \\ \Delta p_z \cdot \Delta z &\geq h \end{aligned}$$

Эти соотношения связывают между собой неопределенности (погрешности) в одновременном нахождении импульса и координаты частицы. Они являются следствием волновых свойств частиц.

Из них следует, что:

- 1) квантовая частица не может находиться в покое,
- 2) у квантовой частицы нет траектории,
- 3) отсутствуют понятия потенциальной и кинетической энергии, можно говорить только о полной энергии частицы.

Атомная физика

Планетарная модель атома. Постулаты Бора.

Эксперименты Резерфорда по рассеянию α -частиц на атомах металлов показали, что атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена вся масса атома и движущихся вокруг него электронов. Радиус ядра составляет $\sim 10^{-14}$ м, в то время, как радиус атома – 10^{-10} м, то есть ядро по размеру в 10000 раз меньше самого атома. Так как силы электростатического притяжения по форме аналогичны гравитационным силам, то модель атома с электронами, вращающимися вокруг ядра, стали называть планетарной.

Существование такого атома противоречит классической электродинамике. Электроны, движущиеся вокруг ядра должны излучать электромагнитные волны и при этом терять энергию. Оценки дают время жизни такого атома не больше 10^{-11} с, что противоречит опыту.

Бор предположил правила, по которым существует атом.

Постулаты Бора.

1. Атом может находиться только в особенных стационарных или квантовых, состояниях, каждому из которых отвечает определенная энергия:

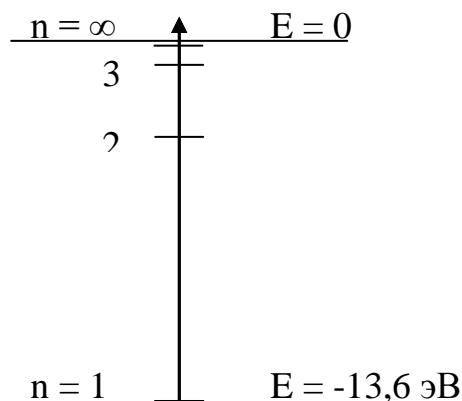
$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Число n называется главным квантовым числом. В стационарном состоянии атом не излучает электромагнитных волн.

2. При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой излучается или поглощается квант энергии.

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

При переходе с верхнего уровня на нижний энергия излучается, при переходе с нижнего на верхний — поглощается. Схема уровней изображена на рисунке.

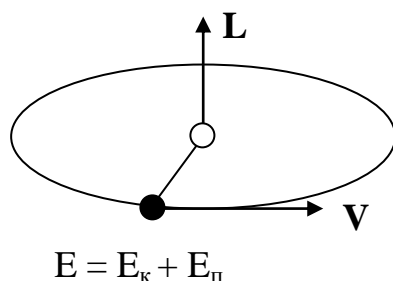


Состояние атома с $n=1$ называется основным. Состояния, не занятые электронами, называются возбужденными. Для атома водорода возбужденными являются все состояния с $n>1$. Электрон не может долго находиться в возбужденном состоянии и переходит в основное, испуская квант электромагнитного излучения.

Квантовые числа

Наличие стационарных состояний и дискретных энергетических уровней объясняется волновыми свойствами электрона, так как размер атома сравним с длиной волны электрона. Полное описание состояний атома можно получить, решая уравнение Шредингера для электрона, движущегося в электростатическом поле ядра.

Интересно проследить аналогию между движением планеты вокруг Солнца и электрона в атоме.



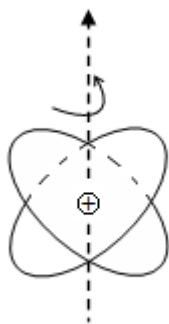
При движении планеты сохраняется полная энергия, равная сумме потенциальной и кинетической энергии. Кроме этого сохраняется момент импульса планеты, который для круговой орбиты равен по модулю $|L| = mVR$ и направлен перпендикулярно плоскости орбиты. Сохранение момента импульса обеспечивает сохранение ориентации в пространстве плоскости орбиты.

При переходе к квантовой механике стационарные состояния с определенным значением энергии соответствуют сохранению полной энергии в процессе движения на разных орбитах. Определенное значение для вектора момента импульса в квантовой механике означало бы одновременно определенные (точные) значения для импульса и координаты частицы, что невозможно.

Сохранение момента импульса в квантовой механике означает определенные, квантованные значения двух величин:

- 1) абсолютного значения момента импульса $L = \frac{h\sqrt{l(l+1)}}{2\pi} = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ и
- 2) проекции момента импульса на некоторую выделенную ось $L_z = \hbar m$

Величина L определяет «форму» электронной орбиты для данного состояния, а величина L_z характеризует наклон «орбиты» к выделенной оси. Невозможность атому иметь определенное значение момента импульса приводит к тому, что орбита прецессирует вокруг выделенной оси.



Таким образом состояние электрона в атоме определяется тремя квантовыми числами :

$$\begin{aligned}
 n & - \text{главное квантовое число} & n & = 1, 2, 3, \dots \\
 l & - \text{орбитальное квантовое число} & l & = 0, 1, \dots, n-1 \\
 m & - \text{магнитное квантовое число} & m & = -l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l
 \end{aligned}$$

Спин электрона и электронные оболочки

Все элементарные частицы кроме массы, заряда обладают еще некоторыми присущими им от природы свойствами. Таким свойством является собственный момент импульса или спин. То есть все элементарные частицы можно представить вращающимися вокруг своей оси, как «волчки». Правда расчет показывает, что при этом вращении линейная скорость на поверхности электрона может превышать скорость света.

Спин – это релятивистский параметр, он появляется в уравнениях квантовой теории поля. Спин участвует в законе сохранения момента импульса. Сложный объект – ядро атома обладает спином, равным векторной сумме спинов всех частиц ядра. Атом обладает собственным моментом импульса, равным векторной сумме спинов ядра и электронов плюс сумме всех орбитальных моментов электронов. С моментом импульса атома связан его магнитный момент.

Величина спина определяется выражением $\hbar J$, где J – спиновое квантовое число или просто спин. По величине спина все элементарные частицы делятся на фермионы с полуцелым спином и бозоны с целым спином.

К фермионам относятся элементарные частицы вещества, такие как электроны, протоны, нейтроны. У них спин равен $\hbar/2$ (квантовые состояния $s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$).

К бозонам относятся все элементарные частицы, являющиеся переносчиками взаимодействий: фотоны (электромагнитное взаимодействие), глюоны (сильное взаимодействие) и др. Спин этих частиц равен \hbar (квантовые состояния $s = +1, -1$).

Со спином связан одним из фундаментальных принципов квантовой механики – принцип Паули:

Два и более тождественных фермиона не могут одновременно находиться в одном квантовом состоянии.

Для бозонов этого ограничения не существует. Бозонов в одном квантовом состоянии может быть сколько угодно.

Благодаря принципу Паули электроны в атоме не могут все оказаться в основном состоянии. В одном состоянии, характеризующемся тремя квантовыми числами (n, l, m) могут находиться только электроны, отличающиеся проекцией своих спинов на выделенную ось. Но таких проекций только две: $s = -\frac{1}{2}$ и $s = \frac{1}{2}$. Поэтому в каждом квантовом состоянии, задаваемым тремя квантовыми числами могут находиться не больше двух электронов. При заполнении электронной оболочки атома электроны сначала заполняют основное состояние, потом все остальные по очереди. В состоянии с одной энергией, характеризующемся главным квантовым числом n , может находиться не больше $2n^2$ электронов. Они образуют заполненную оболочку атома. Степень заполнения внешней оболочки определяет все химические свойства вещества. Главное квантовое число совпадает с периодом в периодической системе Менделеева.

Фотон является бозоном, то есть частицей с целым спином. Спин фотона соответствует круговой поляризации волны. В зависимости от квантового состояния вращение вектора \mathbf{E} в волне происходит либо по часовой стрелке, либо против.

Благодаря спину фотона при его излучении атомом, момент импульса атома увеличивается или уменьшается на единицу в зависимости от ориентации спина фотона (проекция спина на выделенную ось равна $s = \pm 1$). Поэтому атом при излучении или поглощении фотона может переходить из одного состояния в другое, отличающееся величиной орбитального квантового числа на единицу. Это утверждение носит название правила отбора.

Ядерная физика

Ядро атома состоит из положительно заряженных протонов (заряд равен элементарному заряду e) и электрически нейтральных нейтронов, удерживаемых вместе ядерными силами. Протоны и нейтроны имеют спин, равный $1/2$ и практически одинаковые массы ($m_p = 1838,15 m_e$, $m_n = 1838,68 m_e$). Они имеют общее название – нуклоны. Благодаря наличию спина у нуклонов атомное ядро обладает собственным моментом импульса, который получается в результате сложения спинов всех протонов и нейтронов, и магнитным моментом.

Ядро характеризуется числом протонов Z (это заряд ядра в единицах элементарного заряда), числом нейтронов N и массовым числом $A = Z + N$. Ядро обозначают в ядерных реакциях, как



Химические свойства атомов определяются зарядом ядра. Ядра, имеющие один заряд, то есть одно и тоже количество протонов, но разное количество нейтронов называются изотопами. Изотопы с одинаковым количеством протонов обладают одинаковыми химическими свойствами.

Сильные взаимодействия

Это одно из четырёх фундаментальных взаимодействий в физике. В сильном взаимодействии участвуют кварки и глюоны и составленные из них частицы, называемые адронами (барионы и мезоны). Оно действует в масштабах порядка размера атомного ядра и менее, отвечая за связь между кварками в адронах и за притяжение между нуклонами (разновидность барионов — протоны и нейтроны) в ядрах.

Ядерные силы – короткодействующие, поэтому диаметр ядра не превышает 10^{-13} метра. Переносчиками ядерного взаимодействия являются глюоны, элементарные частицы без массы, которыми обмениваются между собой кварки, из которых состоят нуклоны и сами нуклоны в процессе взаимодействия.

Положительно заряженные протоны отталкиваются друг от друга. Нейтроны способствуют стабилизации ядра, увеличивая его размер и уменьшая тем самым электростатическое отталкивание между протонами. С увеличением Z энергия электростатического отталкивания растёт как Z^2 . Поэтому с ростом Z для устойчивости ядра требуется всё больше нейтронов.

При увеличении количества нейтронов в ядре увеличивается его размер и уменьшаются ядерные силы. В результате ядро становится неустойчивым и может развалиться.

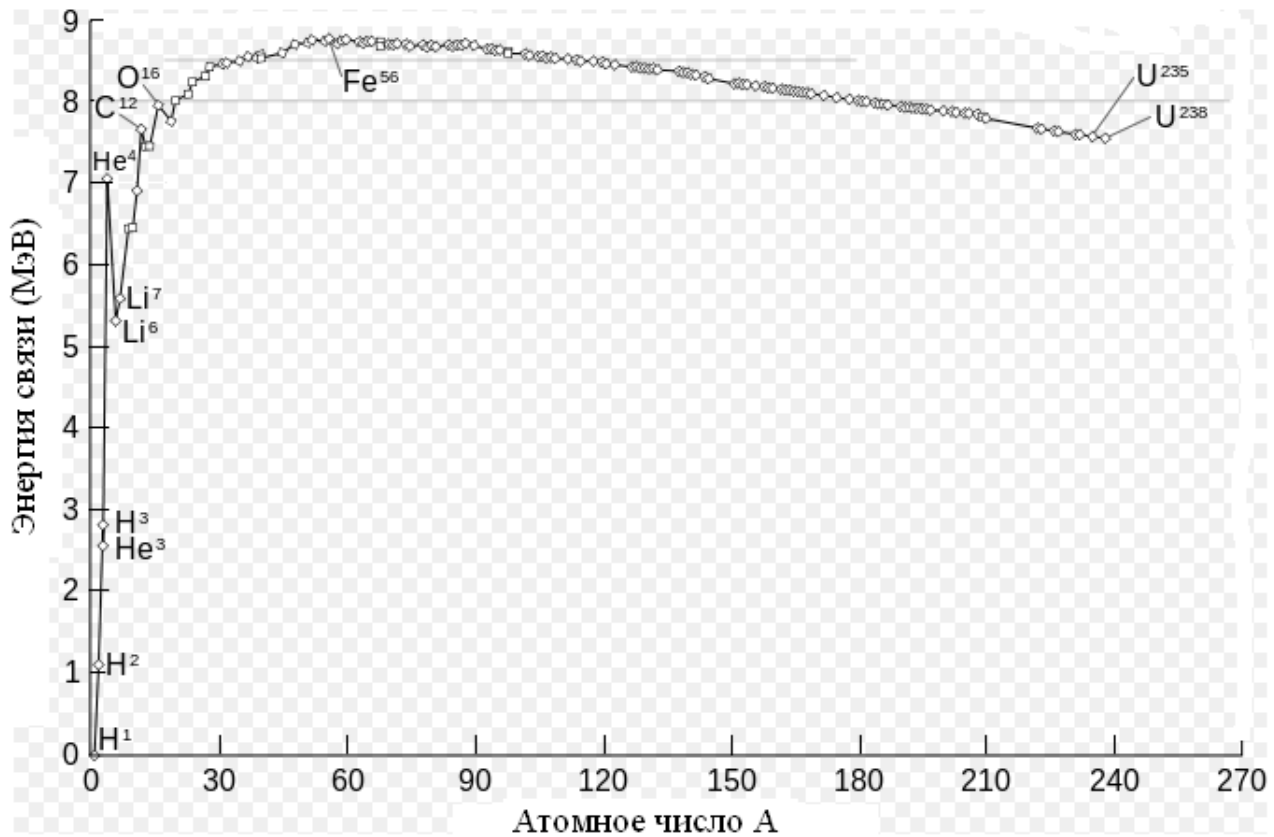
Устойчивость ядра характеризуется энергией связи. Энергия покоя ядер $M_{\text{яд}} c^2$ меньше, чем суммарная энергия покоя составляющих его нуклонов $(Zm_p + (A - Z)m_n)c^2$ на величину энергии взаимодействия:

$$M_{\text{яд}} c^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n) c^2 - U_{\text{вз}}$$

Отсюда появляется дефект масс:

$$\Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n) - M_{\text{яд}} = \frac{U_{\text{вз}}}{c^2}$$

То есть масса образованного ядра меньше, чем масса составляющих его нуклонов.



Энергия взаимодействия, приходящаяся на один нуклон называется энергией связи $E_{\text{св}}$:

$$E_{\text{св}}(A, Z) = \frac{|U_{\text{вз}}|}{A} = \frac{(Zm_p + (A - Z)m_n) c^2 - M_{\text{яд}} c^2}{A}$$

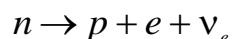
Чем больше энергия связи, тем устойчивее ядро. На рисунке изображена зависимость энергии связи от атомного числа. Наибольшей устойчивостью обладают ядра железа, у которых максимальная энергия связи. Для ядер справа от железа энергетически выгодным является процесс распада на две части. Для ядер слева от железа энергетически выгодным является процесс слияния двух ядер с образованием более тяжелого ядра – процесс синтеза.

Радиоактивность

При распаде ядер происходит превращение одних химических элементов в другие. Это превращение сопровождается испусканием излучения, которое делится на три типа:

α – излучение, излучение α - частиц, ядер гелия ${}^4_2\text{He}$. Ядра гелия являются устойчивым образованием и при распаде тяжелых ядер часто одним из осколков являются α - частицы. Энергия этих частиц составляет единицы МэВ. Проникающая способность α - частиц незначительна, поэтому это излучение может привести только к поверхностному ожогу кожи.

β – излучение, быстрые электроны или позитроны. Это излучение возникает при взаимных превращениях внутри ядра нейтрона в протон и наоборот. К испусканию электрона приводит и распад свободного нейтрона по реакции:



Эти процессы контролируются слабым взаимодействием. Энергия электронов при этом достигает десятков и сотен килоэлектронвольт. Проникающая способность электронов достаточно высока, поэтому представляет опасность для организма человека.

γ – излучение, жесткое электромагнитное излучение с громадной проникающей способностью, может вызывать поражение внутренних органов человека и приводить к лучевой болезни. γ – излучение является попутным эффектом ядерных превращений и возникает при переходе возбужденного ядра в основное состояние. Энергия квантов этого излучения составляет несколько МэВ.

Причины радиоактивности могут быть естественные:

1. Оставшиеся от первоначального количества нераспавшиеся радиоактивные ядра.

2. Поглощение стабильным ядром космического излучения и в результате превращение его в нестабильное.

Кроме этого имеются искусственные причины: ядра, облученные на ускорителях или в реакторах атомных электростанций.

Распад ядра – это случайное событие. В результате ядерного распада первоначальное количество атомов вещества уменьшается со временем по закону радиоактивного распада:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

Для характеристики интенсивности распада используют период полураспада $T_{1/2}$, то есть время, за которое распадается половина первоначального количества вещества.

Периоды полураспада ядер сильно отличаются от $1,4 \cdot 10^{10}$ лет для ${}^{232}\text{Th}$ до 16 часов для ${}^{211}\text{Rn}$. Искусственные трансурановые элементы распадаются еще быстрее.

Ядерные реакции

Для расчета ядерных реакций используют закон сохранения заряда, закон сохранения нуклонов (атомного числа)

Кроме этого, конечно, выполняются законы сохранения импульса и энергии. Для применения закона сохранения энергии надо учитывать полную энергию системы, включая энергию покоя, энергию взаимодействия нуклонов в ядре, кинетическую энергию осколков деления.

Ядерная энергетика

Цепная реакция. Практическое использование ядерных превращений для получения полезной энергии началось с открытия цепной реакции деления урана. Схема реакции приведена на рисунке.

При делении тяжелых ядер под действием нейтронов возникают новые нейтроны. Например, при каждом делении ядра урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ в среднем возникает 2,4 нейтрона. Часть этих нейтронов снова может вызвать деление ядер. Такой лавинообразный процесс называется цепной реакцией.

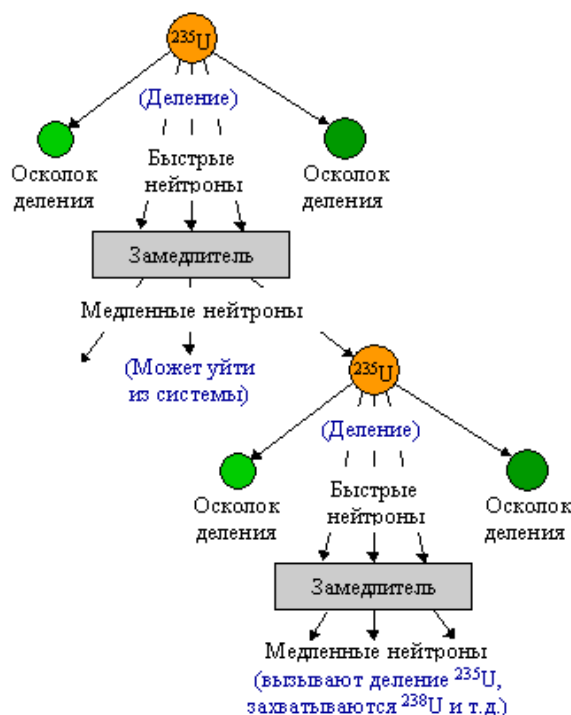
Цепная реакция деления идет в среде, в которой происходит процесс размножения нейтронов. Такая среда называется активной зоной. Важнейшей физической величиной, характеризующей интенсивность размножения нейтронов, является коэффициент размножения нейтронов в среде k . Коэффициент размножения равен отношению количества нейтронов в одном поколении к их количеству в предыдущем поколении.

При делении одного ядра урана выделяется около 200 МэВ энергии. Это кинетическая энергия осколков и свободных нейтронов.

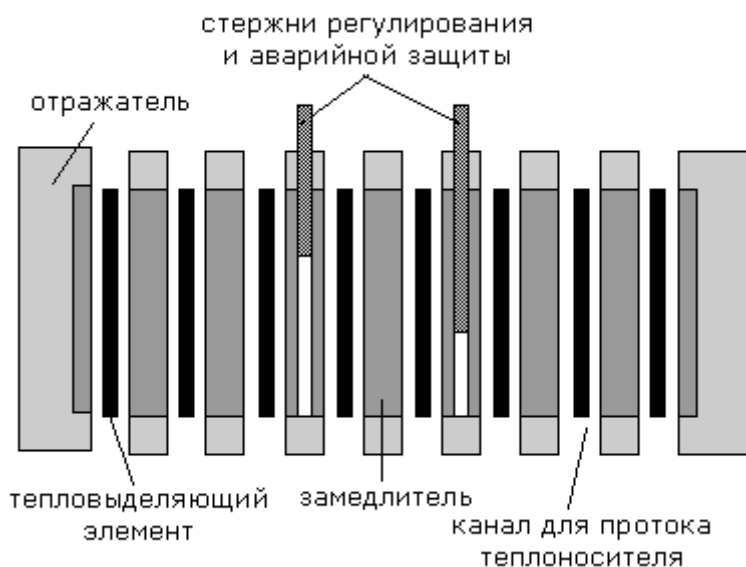
Для осуществления реакции необходим изотоп урана ${}_{92}\text{U}^{235}$. Его добывают из природного урана, в котором содержится 99,3% ${}_{92}\text{U}^{238}$ и только 0,7% ${}_{92}\text{U}^{235}$. Замедлители нейтронов используют для управления реакцией. Медленные нейтроны имеют большую вероятность захватиться ядром ${}_{92}\text{U}^{235}$ и вызвать его деление. В качестве замедлителей используют тяжелую воду и графит.

Атомная бомба. Необходимым условием осуществления цепной реакции является наличие достаточно большого количества урана – критической массы. Когда урана мало, то большинство нейтронов пролетает сквозь образец, не попав ни в одно ядро. В атомной бомбе во время детонации соединяют вместе два куска урана так, чтобы получилась масса больше критической. Возникает неуправляемая цепная реакция и взрыв. При взрыве высвобождается энергия $8,4 \cdot 10^{13}$ Дж.

Ядерный реактор. Управляемая цепная реакция происходит в ядерных реакторах.



Тепловыделяющие элементы с ядерным топливом чередуются с блоками замедлителя. Конструкция напоминает соты. Вся она помещена в котел, заполненный теплоносителем. В качестве теплоносителя используют



дистиллированную воду, жидкий натрий. Для управления реакцией используются регулировочные стержни, выполненные из материала, эффективно поглощающего нейтроны (соединения бора, кадмия). При работе реактора теплоноситель нагревается, в теплообменнике отдает тепло обычной воде, она превращается в пар, который вращает паровую турбину.

Термоядерные реакции. Энергию можно получать и в реакция синтеза, когда ядра легких элементов (водород, дейтерий, тритий) сливаются, образуя ядра гелия. При осуществлении такой реакции надо сблизить ядра исходного материала, преодолевая их электростатическое отталкивание. Для этого материал надо нагреть до температуры $10^7 - 10^8$ К. Такая температура имеется

в недрах звезд, где эти реакции и происходят, являясь источником энергии звезд.

На Земле подобные условия достигаются в атомном взрыве. Поэтому топливо для термоядерной бомбы размещают вокруг атомного заряда.

Ведутся работы по получению управляемого термоядерного синтеза. Для этого в специальной камере нагревают разреженную водородную плазму с помощью электрического тока, мощным лазером, пучками быстрых частиц. Сама плазма удерживается от контакта со стенками камеры с помощью магнитного поля. Пока не удалось достичь самоподдерживающейся управляемой термоядерной реакции с практическим выходом энергии.